

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**YÖRÜNGE TAKİBİ BENZETİMİ İÇİN DÖRT SERBESTLİK**  
**DERECELİ SU ALTI ARACININ DİNAMİK MODELİNİN**  
**ÇIKARILMASI VE SALP SÜRÜ ALGORİTMASI TABANLI**  
**KESİRLİ DERECELİ PID KONTROLÖR TASARIMI**

**GÜLTEN YILMAZ**

**KOCAELİ 2024**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**YÖRÜNGE TAKİBİ BENZETİMİ İÇİN DÖRT SERBESTLİK  
DERECELİ SU ALTI ARACININ DİNAMİK MODELİNİN  
ÇIKARILMASI VE SALP SÜRÜ ALGORİTMASI TABANLI  
KESİRLİ DERECELİ PID KONTROLÖR TASARIMI**

**GÜLTEN YILMAZ**

**Doç. Dr. Serhat YILMAZ**  
**Danışman, Kocaeli Üniv.**

.....

**Prof. Dr. Cenk ULU**  
**Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniv.**

.....

**Prof. Dr. Mustafa ÇAKIR**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

.....

**Doç. Dr. Oğuzhan KARAHAN**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

.....

**Dr. Öğr. Üyesi Dilek TÜKEL**  
**Jüri Üyesi, Doğuş Üniv.**

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 26. 06. 2024**

## ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☐ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☒ Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler, ***Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Destekleme Birimi*** tarafından ***FDK-2022-3008*** no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....  
(imza)  
Gülten YILMAZ

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***“Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....  
(imza)  
Gülten YILMAZ

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışması süresince, gösterdiği ilgi, emek ve çabalarıyla çalışmanın gerçekleşmesi ve ilerlemesini sağlayan danışmanım Sn. Doç. Dr. Serhat YILMAZ'a, her zaman değerli fikirleri ve tavsiyeleri ile katkı sunan Sn. Doç. Dr. Oğuzhan KARAHAN'a, ve Sn. Prof. Dr. Cenk ULU'ya, Kocaeli Üniversitesi Hereke Asım Kocabıyık Meslek Yüksekokulu Elektronik Otomasyon Bölüm'ü mesai arkadaşlarıma ve öğrencilerime, Systemair yazılım geliştirme uzmanı Sn. Bedri BİÇER'e, teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler, Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Destekleme Birimi tarafından FDK-2022-3008 no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir. Sağlamış olduğu maddi destekten ötürü, Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projelerini Destekleme Birimi'ne teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca, bu zorlu süreçte her zaman yanımda olan ve desteğini esirgemeyen sevgili eşim Hilmi YILMAZ'a, sabırlarından ötürü kızım Av. Ayşegül YILMAZ'a ve oğlum Eren YILMAZ'a, hayatım boyunca maddi ve manevi destekleri ile yanımda olan annem, babam ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Haziran-2024

Gülten YILMAZ

## İÇİNDEKİLER

|                                                                  |      |
|------------------------------------------------------------------|------|
| ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....                        | i    |
| YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....                         | ii   |
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....                                           | iii  |
| İÇİNDEKİLER.....                                                 | iv   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                             | vii  |
| TABLolar DİZİNİ.....                                             | viii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                              | ix   |
| ÖZET.....                                                        | xiii |
| ABSTRACT.....                                                    | xiv  |
| 1. GİRİŞ.....                                                    | 1    |
| 2. LİTERATÜR İNCELEMESİ.....                                     | 4    |
| 2.1. Su Altı Araçları Üzerine Araştırma Eğilimleri.....          | 6    |
| 2.1.1. Fiziksel Tasarım Üzerine Araştırma Eğilimleri.....        | 6    |
| 2.1.2. Kontrolör Tasarımı Üzerine Araştırma Eğilimleri.....      | 7    |
| 2.1.3. Rehberlik ve Navigasyon Üzerine Araştırma Eğilimleri..... | 8    |
| 2.1.4. Göreve Dayalı Kontrol Üzerine Araştırma Eğilimleri.....   | 9    |
| 2.2. OSA'nın Modellenmesi ve Kontrolü Konulu Çalışmalar.....     | 10   |
| 2.2.1. Su Altı Aracı Modelleme Çalışmaları.....                  | 10   |
| 2.2.2. Su Altı Aracı Kontrol Çalışmaları.....                    | 12   |
| 2.3. Çalışmanın Amacı ve Literatüre Katkıları.....               | 17   |
| 3. OSA TASARIMIYLA İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR.....                   | 18   |
| 3.1. OSA'nın Hareket Serbestlikleri.....                         | 18   |
| 3.2. OSA Tasarımıyla İlgili Kavramlar.....                       | 18   |
| 3.2.1. Yüzdürme.....                                             | 19   |
| 3.2.2. Hidrodinamik Sönümlleme.....                              | 19   |
| 3.2.3. Denge Durumu.....                                         | 19   |
| 3.2.4. Coriolis Etkisi.....                                      | 21   |
| 3.2.5. Ek Kütle.....                                             | 21   |
| 3.2.6. Çevresel Kuvvetler.....                                   | 21   |
| 3.2.7. Basınç.....                                               | 22   |
| 3.3. Bir OSA'nın Genel Tasarımı.....                             | 22   |
| 3.3.1. Gövde Tasarımı.....                                       | 22   |
| 3.3.2. Tahrik Sistemi.....                                       | 22   |
| 3.3.3. Batırma Sistemi.....                                      | 23   |
| 3.3.4. Elektriksel Güç Kaynağı.....                              | 24   |
| 3.4. RedFin'in Mekanik ve Elektriksel Tasarımı.....              | 24   |
| 4. KİNEMATİK VE DİNAMİK MODELLEMEYİLE İLGİLİ KAVRAMLAR.....      | 27   |
| 4.1. Modelleme İlkeleri.....                                     | 27   |
| 4.2. Kinematik Modelleme.....                                    | 28   |
| 4.3. Su Altı Araçlarının Katı Gövde Dinamiği.....                | 30   |
| 4.4. Su Altı Araçlarında Hidrodinamik Etkiler.....               | 31   |
| 4.4.1. Hidrostatik Kuvvetler.....                                | 33   |
| 4.4.2. Ek Kütle.....                                             | 33   |
| 4.4.3. Sönümlleme Etkisi.....                                    | 35   |
| 4.5. İtme Sistemi Modeli.....                                    | 36   |
| 4.6. RedFin'in 4-DOF Dinamik Modeli.....                         | 37   |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5. DİNAMİK MODELİN TANIMLANMASI VE DOĞRULANMASI.....                            | 40  |
| 5.1. Katı Gövde Kütle Atalet Matrisi.....                                       | 40  |
| 5.2. Ek Kütle Matrisinin Tahmini.....                                           | 42  |
| 5.3. Sönümleme Matrisinin Tahmini.....                                          | 46  |
| 5.3.1. Morison Denklemi Analizi.....                                            | 47  |
| 5.3.2. ANSYS-FLUENT Sönümleme Analizi.....                                      | 49  |
| 5.3.3. Dönme Hareketi (yaw) için Sönümleme Analizi.....                         | 53  |
| 5.4. Model Doğrulama Çalışmaları.....                                           | 56  |
| 5.4.1. İtki Sistemi Ölçümleri.....                                              | 57  |
| 5.4.2. Tasarlanan Havuz Deneyleri.....                                          | 60  |
| 5.4.3. Deneysel Çalışmaların Sonuçları ve Analizi.....                          | 61  |
| 6. KONTROL ÇALIŞMALARI.....                                                     | 67  |
| 6.1. Salp Sürü Algoritması (SSA) ve Mevcut Probleme Uygulanması.....            | 68  |
| 6.2. PID Kontrolör ve Mevcut Probleme Uygulanması.....                          | 72  |
| 6.3. KDPID Kontrolör ve Mevcut Probleme Uygulanması.....                        | 75  |
| 6.4. Trs Kinematik Kontrol Bloğu.....                                           | 77  |
| 6.5. İtki Sistem Bloğu.....                                                     | 78  |
| 6.6. OSA Sistemi Matlab Modeli.....                                             | 80  |
| 7. YÖRÜNGE TAKİBİ BENZETİM ÇALIŞMALARI.....                                     | 83  |
| 7.1. SSA ve GA Yakınsama Davranışları.....                                      | 83  |
| 7.2. Uygunluk Fonksiyonu.....                                                   | 86  |
| 7.3. Referans Yörüngeler.....                                                   | 87  |
| 7.4. SSA-PID, SSA-KDPID ve GA-KDPID Kontrolörler ile Benzetim<br>Sonuçları..... | 88  |
| 7.5. Kontrolörün Sağlamlık Testi.....                                           | 97  |
| 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....                                                    | 101 |
| 8.1. Gelecek Çalışmalar için Öneriler.....                                      | 102 |
| KAYNAKLAR.....                                                                  | 104 |
| EKLER.....                                                                      | 112 |
| KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....                                                   | 122 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                   | 123 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|             |                                                                                                                   |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1.  | Literatürde yer alan farklı OSA modelleri.....                                                                    | 5  |
| Şekil 3.1.  | OSA koordinat sistemi ve 6-DOF.....                                                                               | 18 |
| Şekil 3.2.  | Sualtı aracının dengede olduğu ve dengenin bozulduğu durum.....                                                   | 20 |
| Şekil 3.3.  | Aracın yuvarlanma veya yunuslama hareketi nedeni ile oluşan doğrultu momenti.....                                 | 20 |
| Şekil 3.4.  | Dört serbestlik dereceli sualtı aracı RedFin ve CAD modeli.....                                                   | 25 |
| Şekil 3.5.  | RedFin için SolidWorks tasarım ve montaj resmi.....                                                               | 26 |
| Şekil 4.1.  | B ve NED çerçevelerde 6-DOF'un gösterimi.....                                                                     | 28 |
| Şekil 5.1.  | RedFin'in 3B CAD modeli ve parçaları.....                                                                         | 41 |
| Şekil 5.2.  | Silindir ve küre için $C_D$ -Reynolds sayısı ilişkisi.....                                                        | 48 |
| Şekil 5.3.  | Sualtı aracı RedFin'in basitleştirilmiş 3D CAD modeli.....                                                        | 49 |
| Şekil 5.4.  | Fiziksel model ve bilgisayar HAD analiz modeli kullanımı.....                                                     | 50 |
| Şekil 5.5.  | Çekme testi analizi için tasarlanmış hesaplamalı akış alanı.....                                                  | 50 |
| Şekil 5.6.  | Araç gövdesi ve hesaplama alanı için orta ağ yapısı.....                                                          | 51 |
| Şekil 5.7.  | ANSYS-FLUENT sönümleme analizi için akış hızı çizgileri.....                                                      | 52 |
| Şekil 5.8.  | HAD analizlerinden hesaplanan sönümleme kuvvetlerinin hıza bağlı değişimleri .....                                | 53 |
| Şekil 5.9.  | Dönen kol testi şematik gösterimi ve hesaplama alanı.....                                                         | 54 |
| Şekil 5.10. | Sapma serbestliği HAD modeli çalışma uzayı ve araç gövdesi ağ yapısı.....                                         | 55 |
| Şekil 5.11. | Sapma serbestlik derecesi HAD modeli ve hız değişimleri.....                                                      | 56 |
| Şekil 5.12. | Dönen kol test analizinde açısız hızlara bağlı olarak momentin değişimi.....                                      | 56 |
| Şekil 5.13. | İticiilerin araç üzerindeki yerleşimleri.....                                                                     | 57 |
| Şekil 5.14. | Kuvvet ölçümlerinde kullanılan dinamometre ve dikey iticilerin itki kuvvetlerinin ölçümü.....                     | 58 |
| Şekil 5.15. | RedFin OSA'nın itki kuvvetleri ve torklarının ölçüm sonuçları.....                                                | 59 |
| Şekil 5.16. | Sabit itki kuvvetleri için hızların yakınsaması.....                                                              | 62 |
| Şekil 5.17. | RedFin OSA'nın ilerleme yönündeki sönümleme ve hız ilişkisinin deneysel ve hesapsal karşılaştırması.....          | 63 |
| Şekil 5.18. | RedFin OSA'nın batma yönündeki sönümleme ve hız ilişkisinin deneysel ve hesapsal karşılaştırması.....             | 64 |
| Şekil 5.19. | RedFin OSA'nın sapma yönündeki sönümleme momenti ve hız ilişkisinin deneysel ve (b) hesapsal karşılaştırması..... | 64 |
| Şekil 6.1.  | Kontrol sistemi blok diyagramı.....                                                                               | 67 |
| Şekil 6.2.  | Salp deniz canlısı ve salplerden oluşan sürü.....                                                                 | 69 |
| Şekil 6.3.  | OSA yörünge takibi kontrolünde kullanılan SSA Tekniğinin akış şeması.....                                         | 71 |
| Şekil 6.4.  | PID Kontrolör blok yapısı.....                                                                                    | 72 |
| Şekil 6.5.  | PID konum kontrolör blok yapısı.....                                                                              | 73 |
| Şekil 6.6.  | SSA-PID kontrolör blok yapısı.....                                                                                | 74 |
| Şekil 6.7.  | KDPID kontrolör blok şeması.....                                                                                  | 76 |
| Şekil 6.8.  | Genelleştirilmiş KDPID kontrolör.....                                                                             | 76 |
| Şekil 6.9.  | SSA-KDPID kontrolör blok yapısı.....                                                                              | 76 |
| Şekil 6.10. | Dört adet 1 DOF sabit iticiye sahip RedFin OSA.....                                                               | 77 |
| Şekil 6.11. | İtici sistemi Simulink modeli.....                                                                                | 80 |

|             |                                                                                                                                                   |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 6.12. | OSA Dinamik Modeli (MATLAB/SİMULİNK).....                                                                                                         | 82  |
| Şekil 7.1.  | KDPID kontrolör için SSA uygunluk değeri yakınsaması.....                                                                                         | 85  |
| Şekil 7.2.  | KDPID kontrolör için SSA yakınsamalarının popülasyona<br>bağlı değişimleri.....                                                                   | 85  |
| Şekil 7.3.  | GA ile optimizasyon yakınsama eğrisi.....                                                                                                         | 86  |
| Şekil 7.4.  | Optimizasyon benzetimlerinde kullanılan 3B yörünge.....                                                                                           | 88  |
| Şekil 7.5.  | Test amaçlı benzetimler için 3B yörünge.....                                                                                                      | 88  |
| Şekil 7.6.  | Operasyonel alanda yörünge takibi kontrolü benzetim<br>performansları.....                                                                        | 90  |
| Şekil 7.7.  | 3B spiral yörünge için x ve z eksenlerinde, zamana bağlı pozisyon<br>değişimleri ile sapma açısının değişimi (SSA-PID için).....                  | 91  |
| Şekil 7.8.  | 3B spiral yörünge için x ve z eksenlerinde, zamana bağlı pozisyon<br>değişimleri ile sapma açısının değişimi (SSA-KDPID için).....                | 91  |
| Şekil 7.9.  | 3B spiral yörünge için y eksenindeki hareketin zamana bağlı<br>değişimleri.....                                                                   | 92  |
| Şekil 7.10. | Yörünge izleme performansları.....                                                                                                                | 92  |
| Şekil 7.11. | Yörünge takibi sırasında oluşan y-ekseni konum hataları.....                                                                                      | 93  |
| Şekil 7.12. | SSA-PID, GA-KDPID ve SSA-KDPID için sistem kontrol<br>girişleri.....                                                                              | 94  |
| Şekil 7.13. | SSA-PID, GA-KDPID ve SSA-KDPID için yörünge takibi<br>konum hataları.....                                                                         | 95  |
| Şekil 7.14. | Kontrolörlerin sağlamlık testi için kullanılan test yörüngesini<br>takip performansları.....                                                      | 97  |
| Şekil 7.15. | Test yörüngesi takibi sırasında (a) x-ekseni referansına göre konum<br>performansları (b) $\psi$ açısal konum referansına göre performanslar..... | 98  |
| Şekil 7.16. | SSA-PID, GA-KDPID ve SSA-KDPID yörünge takibi konum<br>hatalarının ve üretilen itki kuvvetlerinin karşılaştırılması.....                          | 98  |
| Şekil A. 1. | RedFin gövde yapısı genel görünüm.....                                                                                                            | 113 |
| Şekil A.2.  | Elektronik ekipmanlar için tüp hazne.....                                                                                                         | 114 |
| Şekil A.3.  | Su geçirmez fırçasız DC motor.....                                                                                                                | 114 |
| Şekil A.4.  | DC motor sürücü.....                                                                                                                              | 115 |
| Şekil A.5.  | Analog kamera.....                                                                                                                                | 115 |
| Şekil A.6.  | Güç dağıtım kartı.....                                                                                                                            | 116 |
| Şekil A.7.  | Su altı aracı kontrol kartı.....                                                                                                                  | 116 |
| Şekil A.8.  | Arduino NANO mikroişlemci kartı.....                                                                                                              | 117 |
| Şekil A.9.  | Bar30 Basınç Sensörü ve MPU6050 Gyro İvme ölçer sensör.....                                                                                       | 117 |

## TABLolar DİZİNİ

|             |                                                                                                                               |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 4.1.  | Deniz araçları için SNAME notasyonu.....                                                                                      | 28 |
| Tablo 5.1.  | RedFin'in kütsel ve fiziksel özellikleri.....                                                                                 | 42 |
| Tablo 5.2.  | (x-y), (x-z), (y-z) iz düşümsel alanlarının tanımlanması.....                                                                 | 43 |
| Tablo 5.3.  | DNV standardına göre dikdörtgen prizma için ek kütle verileri.....                                                            | 43 |
| Tablo 5.4.  | Analitik yöntemle hesaplanan ek kütle ve atalet matrisi elemanları.....                                                       | 46 |
| Tablo 5.5.  | HAD analizleri için ANSYS-FLUENT parametreleri.....                                                                           | 52 |
| Tablo 5.6.  | RedFin OSA için farklı akış hızlarında hesaplanan sönümler<br>kuvvetleri.....                                                 | 52 |
| Tablo 5.7.  | HAD analiz sonuçlarına eğri uydurma sonucu elde edilen polinomlar.....                                                        | 53 |
| Tablo 5.8.  | Motor pervane hızlarının Yaw serbestlik derecesi CFD modeli için<br>belirlenmesi.....                                         | 55 |
| Tablo 5.9.  | Su altı aracı modelinin dönen kol testi analizinin sayısal<br>sonuçları.....                                                  | 55 |
| Tablo 5.10. | İki dikey motorun batma yönünde ürettikleri itki kuvvetleri.....                                                              | 58 |
| Tablo 5.11. | İki yatay motorun ilerleme yönünde ürettikleri itki kuvvetleri.....                                                           | 59 |
| Tablo 5.12. | İki yatay motorun sapma (yaw) yönünde ürettikleri dönme<br>momentleri.....                                                    | 59 |
| Tablo 5.13. | Dalgalanma (surge) için 2 yatay itici kullanıldığında ulaşılan hızlar.....                                                    | 63 |
| Tablo 5.14. | Batma (heave) için 2 dikey itici kullanıldığında ulaşılan hızlar.....                                                         | 63 |
| Tablo 5.15. | Sapma (yaw) için 2 yatay itici kullanıldığında ulaşılan hızlar.....                                                           | 63 |
| Tablo 5.16. | Eğri uydurma deneysel sonuçları.....                                                                                          | 65 |
| Tablo 5.17. | Analitik hesaplamalar, HAD analizleri ve deneysel ölçümlerden elde<br>edilen sadeleştirilmiş dinamik model parametreleri..... | 66 |
| Tablo 7.1.  | SSA-PID ve SSA-KDPID benzetim parametreleri .....                                                                             | 86 |
| Tablo 7.2.  | Benzetimler için kullanılan sistem özellikleri ve değerleri.....                                                              | 89 |
| Tablo 7.3.  | Yörünge takibi kontrol benzetimi uygunluk değerleri.....                                                                      | 95 |
| Tablo 7.4.  | 3B spiral yörünge takibi için SSA ile optimize edilen konum kontrolörü<br>parametreleri.....                                  | 95 |
| Tablo 7.5.  | 3B spiral yörünge takibi için SSA ile optimize edilen hız kontrolörü<br>parametreleri.....                                    | 95 |
| Tablo 7.6.  | GA ile ayarlanan KDPID kontrolör parametreleri.....                                                                           | 95 |
| Tablo 7.7.  | Test yörüngesi takibi için konum hatalarının uygunluk değerleri.....                                                          | 99 |
| Tablo 7.8.  | Test yörünge için konum hatalarının RMS değerleri.....                                                                        | 99 |
| Tablo 7.9.  | Test yörüngesinin takibi için üretilen kuvvetler ve momentlerin<br>RMS değerleri.....                                         | 99 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|             |                                                                                                     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A$         | : Akışa maruz kalan yüzey alanı                                                                     |
| $A^{mn}$    | : Toplam yüzey alanı                                                                                |
| $A_p^{mn}$  | : Akış yönündeki izdüşümsel yüzey alanı                                                             |
| $B$         | : Araca uygulanan kaldırma kuvveti                                                                  |
| $C_A$       | : Ek Coriolis ve merkezkaç kuvvetler matrisi                                                        |
| $C_B$       | : Yüzdürme merkezi                                                                                  |
| $C_D$       | : Sürüklenme katsayısı                                                                              |
| $C_M$       | : Ağırlık merkezi                                                                                   |
| $C_p^{mn}$  | : Ölçeklendirme katsayısı                                                                           |
| $C_{RB}$    | : Katı gövde Coriolis ve merkezkaç kuvvetler vektörü                                                |
| $D_L$       | : Lineer sönümleme matrisi                                                                          |
| $D_Q$       | : Kuadratik sönümleme matrisi                                                                       |
| $e$         | : Hata                                                                                              |
| $g$         | : Yerçekimi ivmesi                                                                                  |
| $G_b$       | : Kaldırma kuvvetinden dolayı oluşan kinetik enerji                                                 |
| $G_k$       | : Ortalama hız gradyanları nedeniyle oluşan türbülans enerjisi                                      |
| $I_x$       | : Kütle merkezi x-eksenine göre atalet momenti katsayısı                                            |
| $I_y$       | : Kütle merkezi y-eksenine göre atalet momenti katsayısı                                            |
| $I_z$       | : Kütle merkezi z-eksenine göre atalet momenti katsayısı                                            |
| $J(\eta_1)$ | : B-çerçeveden, W-çerçeveye doğrusal hızlar dönüşüm matrisi                                         |
| $J(\eta_2)$ | : B-çerçeveden, W-çerçeveye açısal hızlar dönüşüm matrisi                                           |
| $K$         | : Araca uygulanan x-ekseni yönündeki moment                                                         |
| $K_j^1$     | : Salp sürüsünde liderin konumu                                                                     |
| $K_p$       | : Orantı etki kazancı                                                                               |
| $K_i$       | : İntegral etki kazancı                                                                             |
| $K_d$       | : Türev etki kazancı                                                                                |
| $L$         | : İtki motorları yerleşim matrisi                                                                   |
| $m$         | : Aracın kütlesi                                                                                    |
| $M_A$       | : Ek kütle ve atalet matrisi                                                                        |
| $M$         | : Araca uygulanan y-ekseni yönündeki moment                                                         |
| $M_{RB}$    | : Katı gövde kütle ve atalet matrisi                                                                |
| $N$         | : Araca uygulanan z-ekseni yönündeki moment                                                         |
| $O_B$       | : Araç gövdesi üzerindeki koordinat ekseninin orijini                                               |
| $O_W$       | : Dünya sabit koordinat ekseninin orijini                                                           |
| $\eta_1$    | : Pozisyon vektörü                                                                                  |
| $\eta_2$    | : Yönelim vektörü                                                                                   |
| $R$         | : Hesaplama alanının yarıçapı                                                                       |
| $R_B^W$     | : Gövde koordinat ekseninden dünya sabit koordinat eksenine dönüşüm matrisi                         |
| $R_M$       | : Bir cismin ağırlık merkezi ile yüzdürme merkezi arasındaki mesafenin yarattığı momentin büyüklüğü |
| $U$         | : İtki kuvvetleri vektörü                                                                           |
| $u$         | : Aracın, B-çerçeveye göre x-eksenindeki hızı (surge)                                               |
| $v$         | : Aracın, B-çerçeveye göre y-eksenindeki hızı (sway)                                                |
| $w$         | : Aracın, B-çerçeveye göre z-eksenindeki hızı (heave)                                               |

|               |                                                              |
|---------------|--------------------------------------------------------------|
| $\ddot{u}$    | : B-çerçeve için x-ekseni yönlü doğrusal ivme                |
| $\ddot{v}$    | : B-çerçeve için y-ekseni yönlü doğrusal ivme                |
| $\ddot{w}$    | : B-çerçeve için z-ekseni yönlü doğrusal ivme                |
| $p$           | : Aracın, B-çerçeveye göre x-eksenindeki açısal hızı (roll)  |
| $q$           | : Aracın, B-çerçeveye göre y-eksenindeki açısal hızı (pitch) |
| $r$           | : Aracın, B-çerçeveye göre z-eksenindeki açısal hızı (yaw)   |
| $r_B$         | : Yüzdürme merkezi koordinatlar vektörü                      |
| $r_G$         | : Ağırlık merkezi koordinatlar vektörü                       |
| $K_{\dot{p}}$ | : Yuvarlanma (roll) serbestliği için ek kütle katsayısı      |
| $M_{\dot{q}}$ | : Yunuslama (pitch) serbestliği için ek kütle katsayısı      |
| $N_{\dot{r}}$ | : Sapma (yaw) serbestliği için ek kütle katsayısı            |
| $K_p$         | : Yuvarlanma serbestliği için lineer sönümleme katsayısı     |
| $M_q$         | : Yunuslama serbestliği için lineer sönümleme katsayısı      |
| $N_r$         | : Sapma serbestliği için lineer sönümleme katsayısı          |
| $X$           | : Araca uygulanan x-ekseni yönündeki kuvvet                  |
| $Y$           | : Araca uygulanan y-ekseni yönündeki kuvvet                  |
| $Y_M$         | : Sıkıştırılabilir türbülansa dalgalı genişleme dağılımı     |
| $Z$           | : Araca uygulanan z-ekseni yönündeki kuvvet                  |
| $X_u$         | : Dalgalanma serbestliği için lineer sönümleme katsayısı     |
| $Y_v$         | : Kayma serbestliği için lineer sönümleme katsayısı          |
| $Z_w$         | : Kaldırma serbestliği için lineer sönümleme katsayısı       |
| $X_{\dot{u}}$ | : Dalgalanma (surge) serbestliği için ek kütle katsayısı     |
| $Y_{\dot{v}}$ | : Kayma (sway) serbestliği için ek kütle katsayısı           |
| $Z_{\dot{w}}$ | : Kaldırma (heave) serbestliği için ek kütle katsayısı       |
| $X_{ u u}$    | : Dalgalanma serbestliği için kuadratik sönüm katsayısı      |
| $Y_{vv}$      | : Kayma serbestliği için kuadratik sönümleme katsayısı       |
| $Z_{ w w}$    | : Kaldırma serbestliği için kuadratik sönüm katsayısı        |
| $K_{ p p}$    | : Yuvarlanma serbestliği için kuadratik sönüm katsayısı      |
| $M_{ q q}$    | : Yunuslama serbestliği için kuadratik sönüm katsayısı       |
| $N_{ r r}$    | : Sapma serbestliği için kuadratik sönüm katsayısı           |
| $\dot{x}$     | : Aracın, W-çerçeveye göre x-eksenindeki doğrusal hızı       |
| $\dot{y}$     | : Aracın, W-çerçeveye göre y-eksenindeki doğrusal hızı       |
| $\dot{z}$     | : Aracın, W-çerçeveye göre z-eksenindeki doğrusal hızı       |
| $x$           | : Araç konumunun, W-çerçeveye göre x bileşeni                |
| $y$           | : Araç konumunun, W-çerçeveye göre y bileşeni                |
| $z$           | : Araç konumunun, W-çerçeveye göre z bileşeni                |
| $v$           | : Akış hızı                                                  |
| $v_1$         | : Doğrusal hızlar vektörü                                    |
| $v_2$         | : Açısal hızlar vektörü                                      |
| $V$           | : Aracın hacmi                                               |
| $W$           | : Aracın ağırlığı                                            |
| $\rho$        | : Suyun yoğunluğu                                            |
| $\dot{n}_1$   | : W-çerçeveye tanımlı doğrusal hızlar vektörü                |
| $\dot{n}_2$   | : W-çerçeveye tanımlı açısal hızlar vektörü                  |
| $\varphi$     | : Aracın, W-çerçeveye tanımlı x-ekseninde dönme açısı        |
| $\theta$      | : Aracın, W-çerçeveye tanımlı y-ekseninde dönme açısı        |

|                                    |                                                       |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| $\Psi$                             | : Aracın, W-çerçevede tanımlı z-ekseninde dönme açısı |
| $\tau$                             | : Kuvvet ve tork durum vektörü                        |
| $\dot{\phi}$                       | : Aracın, W-çerçeveye göre x-eksenindeki açısal hızı  |
| $\dot{\theta}$                     | : Aracın, W-çerçeveye göre y-eksenindeki açısal hızı  |
| $\dot{\psi}$                       | : Aracın, W-çerçeveye göre z-eksenindeki açısal hızı  |
| $\nabla$                           | : Yer değiştiren su kütesinin hacmi                   |
| $\lambda$                          | : Şerit teorisi ile 3B hesaplamalar arasındaki oran   |
| $p$                                | : Basınç terimi                                       |
| $t$                                | : Akış hareketinin fiziksel zamanı                    |
| $\delta$                           | : Kronecker deltası                                   |
| $\nu$                              | : Dinamik viskozite                                   |
| $-\rho \overline{u'_i u'_j}$       | : Reynolds tensörü                                    |
| $u_i, u_j$                         | : i ve j yönlü akış hızları                           |
| $k - \varepsilon$                  | : Türbülans modeli                                    |
| $\alpha_c$                         | : Atak açısı                                          |
| $\alpha_k$ ve $\alpha_\varepsilon$ | : k ve $\varepsilon$ için ters prandtl sayıları       |
| $\beta_c$                          | : Yanal kayma açısı                                   |
| $\omega$                           | : Açısal hız                                          |
| $\hat{\sigma}$                     | : Standart sapma                                      |
| $\mu$                              | : Türev terimin kesir derecesi                        |
| $\lambda$                          | : İntegral terimin kesir derecesi                     |
| $M_i$                              | : Hedef yiyeceğin i. boyuttaki konumu                 |
| $ub_j$                             | : j. boyut arama uzayının üst boyutu                  |
| $lb_j$                             | : j. boyut arama uzayının alt boyutu                  |
| $\beta$                            | : Ağırlıklandırma faktörü                             |
| $v_c$                              | : Deniz akıntıları hızı                               |
| $v_r$                              | : Deniz akıntılarına göre aracın göreceli hızı        |

## Kısaltmalar

|       |                                                            |
|-------|------------------------------------------------------------|
| AC    | : Adaptive Control (Adaptif Kontrol)                       |
| CAD   | : Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)      |
| DOF   | : Degree of Freedom (Serbestlik Derecesi)                  |
| EKK   | : En Küçük Kareler                                         |
| FLC   | : Bulanık Mantık Kontrol                                   |
| GA    | : Genetik Algoritmalar                                     |
| GKF   | : Genişletilmiş Kalman Filtresi                            |
| HAD   | : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği                          |
| İSA   | : İnsansız Sualtı Aracı                                    |
| KDPID | : Kesirli Dereceli Proportional Integral Derivative        |
| KF    | : Kalman Filtresi                                          |
| LQG   | : Lineer Quadratik Gaussian Kontrol                        |
| MIMO  | : Multiple Input Multiple Output (Çok Girişli Çok Çıkışlı) |
| MÖK   | : Model Öngörülü Kontrol                                   |
| NNC   | : Neural Network Control (Sinir Ağı Kontrol)               |
| OSA   | : Otonom Sualtı Aracı                                      |

|      |                                                                                 |
|------|---------------------------------------------------------------------------------|
| PID  | : Proportional Integral Derivative (Oransal İntegral Türev)                     |
| RC   | : Robust Control (Sağlam Kontrol)                                               |
| ROV  | : Remotely Operated Vehicle (Uzaktan Çalıştırılan Araç)                         |
| SLAM | : Simultaneous Localization and Mapping (Eşzamanlı Konumlandırma ve Haritalama) |
| SMC  | : Sliding Mode Control (Kayma Modlu Kontrol)                                    |
| SSA  | : Salp Sürü Algoritması                                                         |
| PC   | : Predictive Control (Öngörülü Kontrol)                                         |
| PVC  | : Polivinil Clorür                                                              |
| YOSA | : Yarı Otonom Sualtı Aracı                                                      |

# YÖRÜNGE TAKİBİ BENZETİMİ İÇİN DÖRT SERBESTLİK DERECELİ SU ALTI ARACININ DİNAMİK MODELİNİN ÇIKARILMASI VE SALP SÜRÜ ALGORİTMASI TABANLI KESİRLİ DERECELİ PID KONTROLÖR TASARIMI

## ÖZET

Otonom su altı araçları (OSA) bilimsel, ticari ve askeri alanlar başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bu araçlar, su altındaki görevleri otonom olarak yerine getirebilmek için çeşitli rehberlik ve kontrol sistemlerine ihtiyaç duyarlar. OSA'ların modellenmesi, sistem tanımlaması ve kontrolü, hala aktif araştırma ve geliştirme alanları içinde yer almaktadır. Bu tez çalışması kapsamında; düşük hızlı, denge durumunu koruyabilen, modüler ve simetrik yapıya sahip bir su altı aracı geliştirildi. RedFin adı verilen aracın, ulusal insansız su altı sistemleri yarışmalarında Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nü temsil etmesi planlanmaktadır. Çalışmaların devamında su altı aracı RedFin'in dinamik model parametreleri tahmin edilerek matematiksel modeli elde edildi. Aracın dinamik model parametrelerinin tahmininde, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve analitik hesaplama tekniklerinden yararlanıldı. Statik ve dinamik havuz deneyleri ile model doğrulama çalışması yapıldı. Deneysel verilerden parametreleri tahmin etmek için en küçük kareler tahmin yöntemi (EKK) kullanıldı. Basit olmaları ve uygulama kolaylıkları nedeniyle PID (Orantılı-İntegral-Türevsel) denetleyiciler, birçok endüstriyel sistemin kontrolünde kullanılmaktadır. Tamsayı olmayan diferansiyel denklemler ile tanımlanan dinamik modeller için Kesir Dereceli PID (KDPID) kontrol algoritması geliştirilmiştir ve daha hassas çözümler sunmaktadır. Bu çalışmada, OSA'nın yörünge takibi kontrolü için önce PID, daha sonra KDPID kontrolör tasarlandı ve her iki kontrolörün kazanç parametrelerinin optimizasyonu için sezgisel optimizasyon algoritmalarından Salp Sürüsü Algoritması (SSA) kullanıldı. Uygunluk fonksiyonu olarak; konum hatasının mutlak değerinin integrali (IAE) seçilmiştir. Yapılan benzetimlerde, SSA-KDPID'nin, SSA-PID'ye göre OSA'nın farklı yörüngeleri izlemede daha başarılı olduğu gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), KDPID, Otonom Sualtı Aracı (OSA), PID, Salp Sürü Algoritması (SSA).

# EXTRACTION OF UNDERWATER VEHICLE MODEL WITH FOUR DEGREES OF FREEDOM AND SALP SWARM ALGORITHM BASED FRACTIONAL ORDER PID CONTROLLER DESIGN FOR SIMULATION OF TRAJECTORY TRACKING

## ABSTRACT

Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) are used in many fields, primarily in scientific, commercial, and military areas. These vehicles require various guidance and control systems to autonomously perform tasks underwater. The modeling, system identification, and control of AUVs remain active areas of research and development. In this thesis study, a low-speed, stable, modular, and symmetrical underwater vehicle was developed. The vehicle, named RedFin, is planned to represent the Department of Electronics and Communication Engineering at Kocaeli University in national unmanned underwater systems competitions. In the continuation of the studies, the dynamic model parameters of the underwater vehicle RedFin were estimated, and a mathematical model was obtained. Computational Fluid Dynamics (CFD) and analytical calculation techniques were used to estimate the dynamic model parameters of the vehicle. Model validation was carried out through static and dynamic pool tests. The least squares estimation method (LSE) was used to estimate the parameters from the experimental data. Due to their simplicity and ease of implementation, Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers are used in the control of many industrial systems. For dynamic models defined by non-integer differential equations, a Fractional Order PID (FOPID) control algorithm has been developed, offering more precise solutions. In this study, a PID controller and then a FOPID controller were designed for the trajectory tracking control of the AUV. The Salp Swarm Algorithm (SSA), one of the heuristic optimization algorithms, was used to optimize the gain parameters of both controllers. The integral of the absolute value of the position error (IAE) was selected as the fitness function. In the simulations, it was observed that the SSA-FOPID was more successful than the SSA-PID in following different trajectories of the AUV.

**Keywords:** Computational Fluid Dynamic (CFD), FOPID, Autonomou Underwater Vehicle (AUV), PID, Salp Swarm Algorithm (SSA).

## 1. GİRİŞ

OSA'lar günümüzde bilimsel, ticari ve askeri su altı uygulamaları için kullanılmaktadır. Bu araçlar su altı görevlerini yerine getirebilmek için otonom yönlendirme ve kontrol sistemlerine ihtiyaç duymaktadır ve bu sistemlerin modellenmesi, tanımlanması ve kontrolü önemli ve aktif araştırma ve geliştirme alanları içinde yer almaktadır. Literatür kısmında açıklanan başta ticari tasarımlar ve su altı sistemleri yarışmaları için yapılan tasarımlar olmak üzere, geliştirilen araçların birçoğunda dinamik parametrelerin, deneysel ve bilgisayar destekli analiz yöntemleri ile belirlenmesi, gerçekçi matematiksel modellerin çıkarılması, yorumlanması ve kontrolör optimizasyonuna yer verilmemektedir. Gövde dahil olmak üzere hidrodinamik hesaplamaları yapılmadan doğrudan monte edilip çalıştırılan mekanik ve elektriksel aksam, araçların su altında dengeli, bozucu etkilere dayanıklı, düşük enerji ile yüksek doğrulukta ve başarımda hareket etmesinin önünde en büyük engeldir. Bu tez çalışmasında Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü lisans ve lisansüstü uygulamalı çalışmaları için bir deneysel su altı aracı platformu geliştirilmiştir. Aracın matematiksel modeli yeterli doğrulukta çıkartılmış ve yeni optimizasyon yöntemleri kullanılarak aracın dinamiğine uygun kontrol parametreleri belirlenmiştir.

Aracın tasarımı ve geliştirilmesi, mekanik ve elektrik sisteminin oluşturulmasının ardından alt sistemlerin entegrasyonu şeklinde yapılmıştır. Bu sistemlerin geliştirilmesi sonucunda RedFin adını verdiğimiz; yapısal simetriye sahip, çalışması sırasında dengede kalmayı başarabilen, düşük hızlı, alttan ağır, açık çerçeveli ve modüler bir su altı aracı geliştirilmiştir.

Çalışmanın sonraki aşamasında, bir su altı aracının dinamik model denklemindeki ilgili parametreler, RedFin için tahmin edilerek aracın matematiksel modellemesi gerçekleştirilmiştir. Dinamik model parametrelerinden sönümleme katsayılarının tahmini için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımlarından yararlanılarak akış analizleri yapılmıştır. Akış analizlerinden elde edilen parametrelerin doğrulanması, yerleşik sensörlerin kullanıldığı statik ve dinamik havuz deneylerinden elde edilen tahmin değerleriyle karşılaştırılarak yapılmıştır. Elde edilen deneysel verilerden parametreleri tahmin etmek için en küçük kareler (EKK) tahmin yöntemi kullanılmıştır.

RedFin'in her görev için farklı bir yörüngeyi izlemesi gerekmektedir. Bunun için de ilgili yörüngeyi izleme sırasında gerekli hareketleri sağlayacak şekilde itki sisteminin kontrol edilmesi gerekmektedir. Kontrolör olarak, uygulama kolaylığı ve basitliği nedeniyle çok kullanılan PID (Proportional+Integral+Derivative) denetleyici ile daha hassas kontrol sağlayan Kesir Dereceli PID (KDPID) kontrolör kullanılmıştır. Bu kontrolörlerin parametreleri (PID için  $K_p, K_i, K_d$  ve KDPID için  $K_p, K_i, K_d, \mu, \lambda$ ), yakın zamanda geliştirilen ve su altı araç sistemlerinin kontrolünde henüz uygulanmamış olan sezgisel optimizasyon algoritmalarından Salp Sürüsü Algoritması (SSA) (Mirjalili, 2017) ile optimize edilmiştir. Tasarlanan kontrolör, aracın dinamiklerine uygulanmış ve sistem tanımlama sürecinde bulunan parametreler kullanılarak simüle edilmiştir. Simülasyonların sonuçları, bu tip bir kontrolörün gerçekten de su altı araç sistemlerine başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir. Yapılan sistem tanımlama, modelleme, kontrolör optimizasyon simülasyonları ve tasarım süreçleri sonucunda RedFin, istenen derinliğe dalış ve yörünge takibi gibi yarı otonom işlevleri yerine getirebilen bir su altı aracı olarak kullanılacaktır.

KOÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği öğrencileri için su altı aracı deneysel çalışmaları ve ulusal yarışmalara hazırlık için modeli bilinen ve kolay yazılım geliştirilebilen bir platform olması amaçlanmaktadır.

Bu tez çalışmasının birinci ve ikinci bölümlerinde; tezin konusu, çözülmesi hedeflenen problemin ne olduğu, konuyla ilgili literatür taraması ve bu çalışmanın literatüre katkısı anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde; su altı aracı RedFin'in tasarımı, geliştirilen mekanik ve elektronik sistemlerinin ayrıntılı bir taslağı ile birlikte sunulmaktadır. Ayrıca, alt sistemlerin entegrasyonu da tartışılmaktadır.

Dördüncü bölümde; bir su altı aracının kinematik ve dinamik model denklemleri ile serbestlik derecelerine ait hareket denklemleri açıklanmıştır. Ayrıca, dinamik modelin basitleştirilmesi ve RedFin'e uygulanması tartışılmaktadır.

Beşinci bölümde; dinamik model parametrelerinin tahmini için RedFin'in CAD modeli ile gerçekleştirilen HAD analizleri açıklanmakta ve sonuçlar yorumlanmaktadır. Ayrıca,

HAD akış analizleri ile tahmin edilen hidrodinamik katsayıların doğrulanması amacıyla yapılan havuz deneyleri açıklanmaktadır. Deneyler sırasında aracın yerleşik sensörlerinden elde edilen ölçümlerden, parametreleri tahmin etmek için kullanılan EKK yöntemi açıklanmaktadır.

Altıncı bölümde; önerilen ve tasarlanan kontrol yönteminin esasları açıklanmakta ve OSA sisteminin kontrolü için uygulanması anlatılmaktadır.

Yedinci bölümde; su altı aracı RedFin'in farklı yörünge senaryoları için Matlab/Simulink'te gerçekleştirilen kontrol benzetimleri ve kontrolörlerin performansları sunulmuştur.

Sekizinci ve son bölümde ise; RedFin'in gelecekteki versiyonları için yapılabilecek çalışmalar ve araştırma alanları için önerilerde bulunulmuş, bu tezdeki genel sonuçlar ve çalışmalar özetlenmiştir.

## 2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

İnsanoğlunun kendi yaptığı araçlarla okyanusları ve denizleri keşfetme çabaları, tarihsel gelişmeler incelendiğinde 1531’li yıllarda başlamıştır. Nitekim, Leonardo da Vinci’nin tasarımında da görüldüğü gibi iki adam Halley’in çanını kullanarak suya dalarlar (Lapierre, 2006). Günümüzde, çok sayıdaki su altı aracı, farklı su altı görevleri için farklı tiplerde tasarlanmaktadır. Burada Lapierre (Lapierre, 2006) ve (Caiti ve Calabro, 2013) raporlarına dayanarak, kısaca su altı araçları geçmişi anlatılmaktadır.

İlk araştırmalarda, İnsan Tarafından Kullanılan Araç (HOV) tasarımına odaklanılmıştır. 1776’da David Brushell, yüzey gemilerine saldırması için kaplumbağa adını verdiği ilk su altı aracını tasarlamıştır. 1960 yılında, Jacques Piccard ve Teğmen Don Walsh, ABD’nin sahip olduğu HOV Trieste deniz aracını kullanarak, Mariana Çukuru’nun en derin noktasına ulaşmışlardır (10916 m). 2012 yılında, Çin’in Jiao Long HOV su altı aracı, Mariana Çukuru yakınlarında 7000 metreye kadar bir derinliğe ulaşmıştır.

HOV’lerin kaza riskini azaltmak amacıyla, İnsansız Sualtı Araçları (UUV) geliştirmek fikri doğmuştur. HOV’ler gibi, UUV tasarımları da uzun bir geçmişe sahiptir. 1866 yılında, Robert Whitehead dünyanın ilk torpidosunu tasarlamıştır. 1960’lar ve 70’lerde, ABD ve Fransa sırasıyla en erken SPURV (Kendi Kendine Hareket Eden Su Altı Araştırma Aracı) ve Epaulard UUV’yi tasarlamışlardır. UUV Bluefin 21, MH370 uçağının kara kutusunun aranması görevinde kullanılmıştır (Caiti ve Calabro, 2013).

HOV ve UUV arasında genellikle tasarım, maliyet ve otonomi verimliliği açısından farklar bulunur. Güvenlik nedeniyle HOV’lerin, UUV’ye kıyasla, kritik yaşam destek sistemlerine sahip olacak şekilde tasarlanmaları gerektiğinden, çok yüksek maliyetler gerektirirler. UUV’lar, insan yerine geçecek oto-pilotlar tarafından yönetilir ve bu da araçlar üzerinde daha az otonomi gerektirir. UUV’nin otonomi seviyesini artıran çalışmalar önem kazanmıştır (Yuh, 2000).

UUV’ler, pil kapasitesine bağlı olarak 24 saat boyunca kesintisiz olarak zorlu ortamlarda çalışabilirler. Yaşam destek kısıtlamalarıyla ilgilenmeye gerek yoktur. UUV ile ilgili rehberlik, navigasyon, konum belirleme, hareket kontrolü ve yapay-zeka araştırmaları hızla gelişmektedir. Bu tezde, odaklanılan konu UUV sistemlerine yöneliktir.

Otonom Sualtı Araçları (OSA), en yaygın kullanılan araçlardır. OSA'lar, yüzlerce metre derinliklerden binlerce metre derinliklere kadar otonom görevler için yaygın olarak kullanılmaktadır. OSA'lar, insan müdahalesi olmadan onlarca saat boyunca çalışabilirler. Şekil 2.1.a' da, Blue Fin 21'in öncüsü Blue Fin 9 OSA görülmektedir. Kayıp MH370 uçağının kara kutusunu bulmak için kullanılmıştır (Normile, 2014 ve LeHardy, 2014). Görünüm ve dinamik özelliklere göre, OSA'lar torpido şekilli ve küp şekilli olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Torpido şekilli OSA'lar genellikle uzun menzilli görevler için tasarlanmış olup, kontrol kanatları ve ilerleme pervaneleri gibi kısıtlı etkileme düzeni (actuation configuration) nedeniyle genellikle süzülemez ve bir dönüş yönlendirmesi yapamazlar. Torpido şekilli OSA'nın dar bir alanda hassas hareketi gerçekleştirmesi zordur. Ancak Avalon (Hildebrandt vd., 2010) ve Sparus II (Carreras vd., 2013) gibi, eksik-çalışma sorunlarıyla sınırlı olmayan bazı istisnai torpido şekilli OSA tasarımları bulunmaktadır. Bu tasarımlar Şekil 2.1.b ve c' de görülmektedir. Küp şekilli OSA'lar genellikle tam-çalışmaya (6 serbestlik: 6-DOF) sahip olduklarından dolayı süzülme, dönme yönlendirmesi yapabilmekte ve kısa menzilli düşük hızlı görevlerde daha iyidirler. Şekil 2.1.d' de ki Ocean Modules V8 robotu 8 itki ünitesine sahiptir ve 6- DOF harekete izin verir. Bizim uygulamamızda, YOSA RedFin, 4 itki ünitesi ile donatılmış olup 4-DOF harekete sahiptir. Küçük OSA'lar, HOV'lar ve ROV'lerin erişemediği bölgeleri keşfetmek için kullanılabilir. (Denizaltı boru hattı kontrolü, kıyı altyapı gözlenmesi ve büyük gemilerin bakımı gibi görevlerde).



a. Blue Fin 9 OSA



b. Avalon OSA



c. Sparus II OSA



d. Ocean Modules V8 robots

Şekil 2.1 Literatürde yer alan farklı OSA modelleri

OSA'lar, su altında çeşitli görevleri yerine getirirken, pek çok zorlukla karşılaşmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için yapılan temel araştırma konuları, bir sonraki bölümde kısaca açıklanmaktadır.

## **2.1. Su Altı Araçları Üzerine Araştırma Eğilimleri**

Su altı araçları son derece entegre yapıya sahiptirler. Yeni su altı araçlarının tasarımı ile ilgili eğilimler; minyatür gövde yapısı, düşük maliyetlilik, sağlam ve çoklu araç tasarımı yönündedir. Etkin ve verimli bir su altı aracı oluşturmak için dört alanda araştırmanın kritik olduğu düşünülmektedir (Yuh, 2000). Bunlar; fiziksel tasarım üzerine araştırmalar, kontrol ile ilgili araştırmalar, rehberlik ve navigasyon ile ilgili araştırmalar ve göreve dayalı kontrol üzerine araştırmalardır.

### **2.1.1. Fiziksel Tasarım Üzerine Araştırma Eğilimleri**

Tasarımcılar, su altı aracının fiziksel sınırlamalarını kesin olarak tahmin edebilmek için deniz ortamı ve robotik sistemler hakkında yeterli bilgiye sahip olmalıdır. Örneğin, fiziksel tasarım konuları arasında aracın stabilite (dengede kalabilme) analizi, basınç konteyneri tasarımı, itki ünitesi tasarımı, hidrodinamik kaplama tasarımı, sızdırmazlık tasarımları, sensör entegrasyonu ve pil yönetimi gibi konular bulunmaktadır. Diğer tüm normal deniz araçları gibi, su altı araçlarının dalgalı deniz ortamıyla başa çıkabilmeleri için gövdeyi devirmeden stabiliteyi koruma yeteneği önemlidir. Ayrıca, su altı araçlarında korozyonu önlemek için doğru malzemelerin seçilmesi gerekmektedir. Derin suda, basınç son derece yüksektir ve araç gövdesi tonlarca kuvvetle karşı karşıyadır. Beklenmeyen çarpışmalar sırasında veri kaybını önlemek için çarpışma korumaları da düşünülmektedir. Uzun menzilli görevler için, kaplama tasarımını optimize etmek, hidrodinamik sönümleme direncini azaltacak ve çalışma aralığını genişletecektir. Yerleşik sensörler, su altı robotlarının bilinmeyen çevresini keşfetmek için gözleri gibidir. Sensör entegrasyonu, OSA tasarımında önemli bir rol oynar. Yeni çalışmalarda, daha küçük bir alanda daha fazla sensörü entegre edebilmenin yolları araştırılmaktadır. Sensörler, su altı aracının kendi başına kararlar alabilmesi için yeterli veriyi garantilemelidir. Yukarıdaki konularda çeşitli yenilikler beklenmektedir.

### 2.1.2. Kontrolör Tasarımı Üzerine Araştırma Eğilimleri

Su altı araçlarının faaliyet gösterdikleri denizler ve okyanuslar belirsizlikleri ve bozucu etkileri ile karmaşık bir çevredir. Bu nedenle, su altı araçlarının modellenmesi ve kontrolü gibi iki önemli araştırma eğilimi, tam donanımlı bir su altı aracının yüksek kaliteli manevra kabiliyetine ulaşması için esastır. Gerçekten de, hassas kontrol algoritmalarına sahip su altı araçları, lokalizasyon ve navigasyon gibi yüksek seviyeli araştırmaların karmaşıklığını azaltmada belirgin bir avantaja sahip olacaktır.

Genel olarak, su altı aracının doğru hidrodinamik modeli, çalışma dinamiğine ait fiziksel detayları belirleyebilir ve kontrolör tasarımının odak noktasını oluşturur (Ferreira vd., 2009). Hassas bir su altı aracı modelinde parametre belirsizlikleri azaldığı için kontrol performansının iyileştirilebileceği açıktır. Ancak, doğru bir su altı aracı elde etmek için mevcut modelleme yöntemlerinin maliyeti her zaman pahalıdır. Su altı araçlarının gövde yapılarının karmaşık şekillerde olduğu durumlarda, doğru modeli tahmin etmek daha da zordur. Yüksek maliyetten dolayı, su altı araçlarını yüksek doğrulukta modelleme yeteneğine yalnızca büyük kuruluşlar sahiptir (Yang ve Clement, 2014).

Su altı aracının hidrodinamik modeli genellikle doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir (Yang ve Clement, 2014). Bu da geleneksel kontrol algoritmalarının genellikle düşük hız varsayımı altında sönümleme parametrelerini ele almak için etkili olmadığı anlamına gelir (çapraz bağlamda sönümleme terimleri ve doğrusal sönümleme terimleri göz ardı edilir). Ayrıca, dinamik parametreler belirsizliklere sahiptir ve genellikle nominal modelden farklıdır. Örneğin, su altı aracına yükler eklendiğinde kütleli atalet matrisi artacaktır. Model dışı dinamikler, çevresel bozulmalar ve geri yükleme etkileri de modelleme belirsizliklerine neden olur. Son olarak, sensör gürültüsü, sinyal iletim gecikmesi ve ölçülemeyen durumlar da kontrol kararlılığını ve takip performansını etkileyebilir.

Etkili ve erişilebilir bir su altı araç kontrol sistemi oluşturmak amacıyla, bu tez çalışmasında aynı anda modelleme ve sağlam kontrol sorunlarına odaklanılmıştır. OSA modelleme ve kontrol çalışmaları ile ilgili güncel konular, bir sonraki bölümde açıklanmaktadır.

### 2.1.3. Rehberlik ve Navigasyon Üzerine Araştırma Eğilimleri

Su altı araçlarının otonomisi, insan müdahalesinden kurtulmayı amaçlamaktadır. Gelecekteki OSA'lar, çevresel bilgileri su üzerinde bir merkezde analiz edebilecek ve kendi başına kararlar alabilecektir. Bu durum, OSA otonomisi rehberlik ve navigasyon konularındaki araştırmaları gerektirir. Su altı araçlarında lokalizasyon (konum belirleme), en zor problemlerden biri olarak kabul edilir. OSA'nın sınırlı su altı bilgisi kullanarak konumunu ve duruşunu bulması esastır. OSA'nın kontrolü için, hangi zaman adımıyla hangi konumda olduğunun net ve doğru olarak ölçülmesi çok önemlidir. Gerçekçi kontrol bilgilerini yanlış konum verileri ile çözmek için doğrudan ve etkili çözümler mevcut değildir. Navigasyon sistemi, gerçek zamanlı çevresel verileri analiz eder ve OSA kontrol sistemi, engellerden kaçınmak için uygun bir yol optimizasyonu yapar. OSA rehberlik sistemi ise, aracı doğru yolda ilerletir.

Su altında konum belirleme, GPS ve radyo sinyali olmadığından zorlu bir görevdir. Karadaki yöntemler, su altı konum belirlemede uygulanamaz (Tan and Diamant, 2011). Genellikle, elektronik manyetik pusula, jiroskopik pusula, fiber optik jiroskoplu pusula, atalet navigasyon ünitesi, Doppler Hız Günlüğü (DVL), Uzun Taban Hattı (LBL) ve Ultra Kısa Taban Hattı (USBL), su altı konum belirlemede kullanılmaktadır (Bahr vd., 2009 ve Whitcomb, 1999). Klasik yöntemlerden biri olan Dead Reckoning (DR), OSA'nın başlangıç konumunu ve mevcut ivme bilgilerini kullanarak konumları tahmin etmektedir. Ancak, DR'nin dezavantajı zaman geçtikçe hatayı biriktirmesidir. DR, bazı OSA uygulamaları için basit ve verimlidir. DR ile donatılmış bazı OSA'lar, DVL ile donatılmış OSA'lara göre performans artışına sahip olmuştur (Carreno vd., 2010). LBL ve USBL yöntemleri statik referansa dayanır ve İSA'ların çalışma aralığını birkaç kilometreye sınırlar. Pascoal' a göre, lokalizasyonun ana çalışması, pozisyonların Kalman filtresi (KF), Genişletilmiş Kalman filtresi (GKF) ve tamamlayıcı filtreler kullanılarak tahmini esasına dayanmaktadır (Pascoal vd., 2000). Zorluk, doğrusal olmayan durum uzayı denklemi ve gürültü özelliklerini elde etmektir (Brown, 1992, Oliverira, 2002 ve Anonsen, 2010). Ayrıca, bir grup OSA kullanarak konum belirleme yöntemleri (Bahr, 2009, Caiti, 2013) veya su üstü merkez ve OSA arasındaki akustik iletişimi kullanan yöntemler de bugün popülerdir (Fallon ve Georgios, 2010). Önemli bir OSA konum belirleme algoritması, (Simultaneous Localization and Mapping: SLAM)dir (Paull, 2014

ve Aulinas, 2008). SLAM, çevre ve konumu hakkındaki bilgisini geliştirmek için işaret noktaları oluşturur ve tanımlar. OSA SLAM algoritmaları üzerine birçok çalışma mevcuttur (Hasan vd., 2009, Kondo vd., 2004, Mallios, 2011 ve Chu vd., 2016). Şu anda, navigasyon çalışmaları genellikle matematiksel optimizasyonlardır (Aulinas, 2011 ve Bethencourt, 2014). Navigasyon yöntemleri arasında rota noktası navigasyonu, görüş hattı yöntemi ve doğrusal olmayan rehberlik gibi yöntemler bulunmaktadır (Samson ve Abderrahim, 1990). Genellikle, navigasyon sistemi, önceden bilinen çalışma ortamına dayanarak engellerden kaçınan bir grup istenilen rota noktasını optimize eder.

#### **2.1.4. Göreve Dayalı Kontrol Üzerine Araştırma Eğilimleri**

Su altı aracının yapacağı göreve bağlı kontrol araştırmalarında araç davranışları ve insan etkileşimleri önemlidir. Göreve bağlı kontrol konuları şunları içerir: su üstü bir gemide yer alan işletim sistemi, araç-insan ara yüzü, sürü ve zeka araştırmaları, vb. OSA işletim çalışmaları farklı görevlere ayrılabilen için araç görevlerini yönetmek için birçok yazılım geliştirilmiştir. Örneğin, MOOS-IvP, operatörler arasında bilgi transferi ve yürütme işlemleri için yaygın olarak kullanılan bir OSA görev denetim sistemidir. MOOS firmasının IvP-Helm programı mesafe programlamasına dayanan bir optimizasyon programıdır (Benjamin ve Leonard, 2009). Gerçek zamanlı olarak OSA'nın hız ve yönelimini kontrol etmek için çalışır.

OSA sürülerinin, tek başına bir OSA'dan daha sağlam ve verimli çalışması beklenmektedir. Modelleme ve sağlam kontrol çalışmalarının dışında, OSA sürülerinin, sağlamlığını ve kararlılığını artırmak başka bir önemli çözüm olabilir. OSA sürüleri, optimal sayıda sensör atamak ve esnek görevler gerçekleştirmek için etkilidir. Aynı zamanda, bir veya birkaç OSA'nın başarısızlığı su altı görevini etkilemeyecektir.

Sağlamlık, gelecekteki OSA tasarımları için esas bir konudur. Bu tez, OSA sağlamlığını artırmak için modelleme ve kontrol ile ilgili çözümlere odaklanmaktadır. OSA modelleme ve kontrolleri ile ilgili güncel çalışmalara bir sonraki bölümde değinilmektedir.

## **2.2. OSA'nın Modellenmesi ve Kontrolü Konulu Çalışmalar**

Küçük OSA'ların başarılı manevra kabiliyetine ulaşması, iki temel faktöre bağlıdır. Bunlar; doğru bir hidrodinamik model ve sağlam bir kontrol sistemidir (Yamamoto, 2001). Yamamoto, araç dinamiklerinin doğru modellenmesi durumunda model tabanlı bir kontrol sisteminin daha etkili olduğunu belirtmiştir. Aynı zamanda, Ferreira ve arkadaşları, deneysel bir lineer modelin geniş bir çalışma bölgesinde OSA'nın dinamiklerini temsil etmede sık sık başarısız olduğunu göstermişlerdir (Ferreira vd., 2012). Gerçekten de, karmaşık şekle sahip bir OSA'nın hidrodinamik modellerini elde etmek, daha iyi manevra kabiliyeti için önemlidir. Ayrıca, sanal ortam içinde mühendisler, zaman, uzay ve maliyet sınırlamasına nadiren tabi olarak birçok dinamik ve hidrodinamik olayı tekrarlayabilirler. Bu bölümde, önce mevcut su altı modelleme çalışmaları için yapılan literatür taramasına yer verilecektir.

### **2.2.1. Su Altı Aracı Modelleme Çalışmaları**

Su altı araçlarını modellemek için birçok yöntem mevcuttur. Bunlar arasında; tam ölçekli deneyler, ölçekli deneyler, deneysel formül yaklaşımları ve hesaplamalı yöntemler bulunmaktadır. Tam ölçekli bir deneyin avantajı, özellikle ek kütle ve sönümleme parametrelerini elde etmek için yüksek doğruluk sunmasıdır. Ancak, tam ölçekli bir deneyin en önemli dezavantajı yüksek maliyettir. Bu deney için çekme tankları gibi çok pahalı cihazlar gerekmektedir. Ayrıca, tam ölçekli deney, kontrol odaklı değildir, yani modelleme sonuçları doğrudan kontrol tasarımı için kullanılamaz. Çekme tankları olmadan yapılan bazı deneysel yöntemler de mevcuttur, örneğin serbest sönümleme yaklaşımı Ross tarafından sunulmuştur (Ross vd., 2004).

Ölçekli deneyler, maliyet ve modelleme doğruluğu arasında bir denge sağlar. Tam ölçekli deneye göre daha az maliyetlidir, çünkü hidrodinamik deneyde sadece aracın ölçekli (küçük boyutlu) bir modeli kullanılır. Genellikle, ölçekli deneylerin modelleme sonuçları, deneysel ve hesaplamalı yöntemlere kıyasla daha güvenilirdir. Ancak, ölçekli deneyin doğruluğu ölçek etkisi nedeniyle düşüktür. Serbest sönümleme yönteminin ölçekli model kullanılarak uygulanması, Eng ve arkadaşları tarafından sunulmuş ve deneysel sonuçlar, hesaplamalı çözümlerle karşılaştırılmıştır (Eng vd., 2014).

Analitik formül yaklaşımının, genellikle ince gövdeler olarak adlandırılan torpido şekilli OSA' larının modellenmesinde iyi bir yöntem olduğu yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır (Ferreira vd., 2009, 2012). Çalışmalarda bahsedildiği gibi, bu yöntemin avantajı, sadece bir elipsoid şekli kullanan ince OSA hidrodinamik parametrelerini tahmin etmedeki basitliktir. Bununla birlikte, analitik formül yaklaşımı, OSA'yı basit bileşenlere indirgemek için daha derin bilgi ve deneyim gerektirir. Aynı zamanda, basitleştirilmiş geometri birçok ayrıntıyı göz ardı edebileceğinden, tahmin doğruluğu her zaman güvenilir olmayabilir. Özellikle, karmaşık şekilli bir OSA için basitleştirme elde etmek zordur.

Temel kütle, momentum ve enerji korunumu aksiyomlarına dayanan, potansiyel teori ve sonlu elemanlar teorisi tabanlı HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yazılımları gelişmiştir. Navier-Stokes denklemi için doğrudan bir çözüm olmasa da, hesaplamalı yaklaşımlar fiziksel bir akışkan problemini uygulamalı matematiksel bir probleme dönüştürebilmektedir (Yang vd., 2015). Ardından, hidrodinamik olaylar veya parametreler, iteratif hesaplamalarla tahmin edilmektedir. Başlangıçta, HAD programları genellikle büyük deniz taşıtları ve taşıma araçlarını analiz etmek için kullanılmakta idi. Günümüzde ise giderek daha fazla OSA için, HAD modelleme yöntemleri uygulanmaktadır.

Hesaplamalı yöntemler birçok avantaja sahiptir. Teorik olarak, HAD yaklaşımının doğruluğu, hesaplama miktarı sınırsız olduğunda sonsuz derecede küçülebilir. Aynı zamanda, HAD deneylerde gözlemlemesi zor bazı fiziksel detayları ortaya çıkarabilir. Başka bir deyişle, HAD kullanmak, herhangi bir maliyet olmadan birçok görünmez dinamik ve hidrodinamik olayı tekrarlayabilir. Daha da önemlisi, HAD, karmaşık şekilli OSA'ları basitleştirmek için daha az deneyime ihtiyaç duyar. HAD modelleme karmaşıklığı daha düşüktür ve bu, minyatür ve düşük maliyetli OSA'ların modellenmesi için avantajlı bir durumdur. HAD güvenilirliği deneysel çözümler kadar iyi olmasa da, şu anda HAD ve deneysel yaklaşımları birleştiren güvenilir modeller bulunmaktadır (Eng ve Lau, 2008). Gerçekten de, hesaplamalı modelleme yaklaşımı, gelecekteki OSA tasarımı için potansiyel bir eğilimdir.

Johansen'in belirttiği gibi, OSA'da hidrodinamik kuvvetler lineer olarak üst üste eklenebilir (Johansen, 2013). Bu nedenle, OSA hidrodinamik etkileri farklı yazılımlar

tarafından ayrı ayrı analiz edilebilir. WAMIT, Marine Craft Characteristics (MCC) gibi HAD yazılımları mevcuttur. Diğer yazılımlar arasında SHIPMO, ANSYS-CFX, ANSYS-FLUENT, ANSYS-AQWA, STAR-CCM+ ve SeaFEM bulunmaktadır. Bu yazılımlar, düşük maliyetle karmaşık şekilli bir OSA için hidrodinamik parametreleri tahmin edebilir. WAMIT'in ek kütle matrisini tahmin etmedeki etkinliği Eng ve Lau tarafından gösterilmiştir (Eng ve Lau, 2008). Ayrıca, Johansen ve Fossen, ANSYS-CFX programını OSA sönümlleme analizi için kullanmışlardır (Johansen ve Fossen, 2013).

Modelleme sürecinden bağımsız olarak, bir OSA modelinin önemi, tasarlanan kontrolörün hidrodinamik modele ne kadar sağlam ve verimli bir şekilde adapte olabildiğine bağlıdır. Bir sonraki bölümde, mevcut OSA kontrol yöntemleri, literatür örnekleriyle birlikte sunulmaktadır.

### **2.2.2. Su Altı Aracı Kontrol Çalışmaları**

Su altı araçları genellikle okyanus veya denizlerde çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle, parametre değişimleri, doğrusal olmayan hidrodinamik sönümlleme etkileri, sensör iletim gecikmeleri ve okyanus akıntısı bozucuları gibi birçok belirsizliğe sahiptirler. OSA kontrol problemlerini çözmek adına birçok su altı aracı için hareket kontrol algoritması önerilmiştir. Bunlar arasında; klasik PID kontrol, Uyarlamalı Kontrol (Adaptive Control: AC), Kayma Modlu Kontrol (SMC), Geriye Adımlamalı Kontrol (FC), Lineer Kareli Gauss Kontrol (LQG), Model Öngörülü Kontrol (MPC), Kazanç Planlamalı Kontrol (GSC), Bulanık Mantık Kontrol (FLC), Sinir Ağı Kontrolü (NNC) ve diğer hibrit kontrol yöntemleri bulunmaktadır. Su altı aracı kontrol araştırmalarının en iyi incelemelerine (Yuh, 2000, Johansen, 2013 ve Budiyo, 2009)'nın çalışmalarında rastlanabilir. Maalouf'un çalışmasında, mevcut su altı aracı kontrolörlerinin performansını özetleyen kapsamlı bir rapor bulunmaktadır (Maalouf, 2014).

Bir su altı aracını kontrol etmek karmaşıktır. Dinamik ve hidrodinamik özellikler şunları içerir: doğrusal olmayan sönümlleme, belirsiz parametre değişimleri, çevresel bozucular, sensör gürültüsü ve sinyal gecikmesi vb. İlk OSA kontrol yöntemleri genellikle uygulanması kolay yöntemlerdir. Kontrolör, OSA modeli olmadan veya OSA modelinin zamanla değişmez olduğunu varsayarak tasarlanmıştır. Genellikle, eşdeğer lineer sistemin gerçekçi olmayan doğrusal OSA davranışlarıyla aynı performansa sahip olduğu

varsayılarak doğrusallaştırma uygulanır. Ancak, bu ilk yöntemlerde sağlamlık göz önüne alınmamıştır ve bu, belirsizliklerin varlığında OSA kararlılığını ve kontrol performansını sürdürmek açısından kritiktir. Günümüzde daha hızlı, doğru ve sağlam kontrol performansına ulaşmak için modelleme ve kontrol problemlerini aynı anda ele almak gerekmektedir. Aşağıda, su altı araç kontrol cihazları iki türde, model temelli olmayan ve model temelli kontrolörler olarak kısaca açıklanmaktadır.

PID kontrolör ve türevleri, en klasik su altı aracı kontrol algoritmalarıdır. Hatta bugün yüksek hassasiyetli navigasyon ve rehberlik cihazlarıyla donatılmış birçok OSA’da hâlâ PID kontrolörler kullanılmaktadır. Çünkü PID daha az karmaşıktır ve uygulanması daha basittir. Örneğin, MacPhail ve diğerleri, Autosub-1 su altı aracında bir PD kontrolörü kullanmışlardır (McPhail ve Pebody, 1997). Ostafichuk, Dolphin OSA’nın hareketlerinin kontrolü için hibrit bir PD kontrolör kullanmıştır (Ostafichuk, 2004).

PID kontrolörün uygulanması, yalnızca orantı, integral ve türev kazançlarının ayarlanmasına bağlıdır. Orantı kazanç, yanıt hızına katkıda bulunurken, integral kazanç, kalıcı durum hatasını azaltır ve izleme performansını etkiler. Türev etki kazancı, yanıt hızını artırırken aşımı azaltır. PID, model temelli olmayan bir kontrolördür; uygulaması, üç kazancın iteratif bir şekilde ayarlanması şeklindedir. Ancak, OSA’nın belirsiz ve doğrusal olmayan davranışlarına göre, PID kontrolörler, sağlamlık açısından yetersizdir. Belirli su altı aracı uygulamaları için, doğrusallığı, dalga bozulması ve akım bozulmasını dikkate alan birçok geliştirilmiş PID kontrolör bulunmaktadır. Perrier ve arkadaşları, doğrusallığı ve bozulma etkilerini azaltıcı, geliştirilmiş bir PID kontrolörü OSA için önermişlerdir (Perrier vd., 1996). ODIN OSA’nın, dalga bozulmalarını tolere edebilmesi için bir PID kontrolör uygulanmıştır (Liu ve Wang, 2005). Doğrusal olmayan modele dayalı olarak bir PID derinlik kontrolörü oluşturmuştur (Mirhosseini vd., 2011). Yukarıda bahsedilen hibrid PID kontrolörler, daha hızlı yanıt ve bozulma düzeltme yeteneği göstermişlerdir. Ancak performanslar, uygulamalara, model doğruluğuna ve bozulma karakteristiklerine duyarlıdır. Bu tezde, PID’nin tek başına su altı araçlarının doğrusal olmayan ve sağlamlık sorunlarını çözmek için yeterli olmadığı düşünülmektedir.

LQG, model tabanlı çok girişli çok çıkışlı (MIMO) optimal durum geri besleme kontrolörüdür. Kalman filtresi ile lineer karesel bir düzenleyici kombinasyonu olarak düşünülebilir. Lineer optimal kontrolör, enerji tüketimini en aza indiren karesel bir

maliyet fonksiyonu altında türetilmiştir. Aynı zamanda diğer performans kısıtlamalarını da içerir. LQG'nin su altı araçları üzerindeki uygulamalarına rastlanabilir (Sutton vd., 2003). LQG'nin avantajı, teorik olarak optimal ve doğru kontrol tasarımıdır. Ancak, dezavantajları, LQG'nin model doğruluğuna duyarlı olması ve aynı zamanda doğrusal olmama durumuyla başa çıkma konusunda etkisiz olmasıdır. Bu da LQG kontrolörlerinin uygulanmasını çok zor hale getirmektedir.

Kazanç planlamalı kontrol, ilk olarak Silvestre tarafından önerilen model tabanlı bir lineer geri besleme kontrolörüdür (Silvestre vd., 2002). Kazanç planlamanın amacı, orijinal doğrusal olmayan sistemi birçok denge noktası etrafında elde edilen bir grup lineer sisteme yaklaştırmaktır. Gruptaki her bir lineer sistem için kontrol tasarımı, düzenli bir lineer geri besleme kontrol problemidir. Sistem üzerinde çalışırken, denge noktalarına yani çalışma durumlarına göre grup kontrolörleri arasında geçiş yapılmaktadır. Her denge noktasına yakın çalışma bölgesinde kazanç planlaması, doğrusal olmayan sistemin tam olarak doğrusallaştırılmış sistem olduğu gibi çok yüksek performans elde edebilir. Ancak kontrolörün istikrarı ve performansı, açıkça model doğruluğuna bağlıdır.

Klasik kontrol yöntemlerinin performansı, OSA model doğruluğuna duyarlıdır. Yani parametre değişiklikleri, harici bozucular ve sensör gürültüsü gibi model değişiklikleri ile başa çıkmakta etkisizdir. SAUC-E ve euRathlon gibi kuruluşlar, çalışmalarında düşük kütleye sahip bir OSA için PID kontrolörünün, sağlam kontrol yöntemine göre daha etkisiz olduğunu göstermişlerdir (Sauce-E, 2014 ve euPathlon, 2014). Ancak, gerçek OSA uygulamaları karmaşık su altı ortamında birçok belirsizlikle karşılaşır ve yukarıda bahsedilen kontrol yöntemleri bu belirsizliklere karşı sağlam değildir. Bu nedenle, 1981'de Zames, sağlamlık sorunlarını çözmek için  $H_\infty$  kontrol yöntemini önermiştir, hem istikrarı hem de yüksek performansı garanti eden  $H_\infty$  kontrol yöntemi, sistem girişinden çıkışına enerji kazançlarını  $H_\infty$  normları kullanarak sınırlar.  $H_\infty$  teorisi, MIMO durum uzayı tanımının ve frekans alanı analizinin avantajlarını birleştirmektedir. CISCREA OSA'nın sağlam  $H_\infty$  kontrolör ile sapma açısının kontrolü yapılmıştır (Yang ve Probst, 2014).

SMC yöntemi, Slotine tarafından sunulmuştur (Slotine, 1991). Bu kontrol algoritması, sistemlerin belirsizlikleri ve doğrusal olmayışları ile başa çıkmak üzerine uzmanlaşmıştır.

Kayma yüzeyi (bir denklem), takip hatalarına dayalı olarak türetilen kritik bir kavramdır. Daha sonra, kontrolör çıkışları, sistem durumlarını kayma yüzeyine doğru hareket ettirmek için hesaplanır ve bu da takip hatalarını sonsuza kadar küçük tutar. Tipik olarak, Vaganay ve diğerleri tarafından sunulan Taipan OSA üzerinde kayma modlu kontrol uygulaması bulunmaktadır (Vaganay vd., 1998). Fossen, bir adaptif kayma modlu kontrolör önermiştir (Fossen ve Sagatun, 1991). Daha fazla uygulama (Salgado, 2004, Pisano, 2004, Campa vd., 1998)'da bulunabilir. Kayma modlu kontrolörün avantajı, model doğruluğuna ve harici bozuculara karşı duyarsız olmasıdır. Bununla birlikte, dezavantajları uygulamadaki karmaşıklık ve kayma yüzeyindeki salınım sorunlarıdır (çatırtı etkisi).

Geriye adımlama kontrolü, asimptotik olarak kararlı kontrolörler üreten Lyapunov yöntemine dayanan bir doğrusal olmayan kontrol algoritmasıdır. Model parametrik belirsizliklere karşı duyarsız olması nedeniyle sağlamlık özelliğine sahiptir. OSA geriye adımlama uygulamaları bulunmaktadır (Li vd., 2004).

Uyarlamalı kontrol, kontrol edilen sistemlerin gerçek zamanlı parametrik değişimleri ve belirsizliklerine göre kontrol parametrelerini değiştirir. Kontrol parametreleri, kapalı çevrim performans değerlendirmelerini minimize etme prensibine dayanarak sisteme adapte olur. İki tür uyarlamalı kontrol yöntemi vardır. Bunlar; doğrudan yöntemler ve dolaylı yöntemler. Doğrudan yöntemler, kontrolörlerin parametrelerini değerlendirir ve tahmini sonuçları kullanarak kontrolörleri doğrudan değiştirir. Bunun aksine, dolaylı yöntemler, tahmini sistem parametrelerini kullanarak gerekli kontrolör tasarımlarını hesaplar. Sağlam kontrolle karşılaştırıldığında, uyarlamalı kontrolün belirsiz parametrelerin sınırları hakkında önceden bilgiye ihtiyacı yoktur. Uyarlamalı kontrol daha esnek olup kendilerini değiştiren kontrol yasalarıyla ilgilenirken, sağlam kontrol sabittir ve sistemlerin kontrol performansını önceki bilgi içinde garanti eder. Bu nedenle, uyarlamalı kontrolörlerin sağlamlık avantajları vardır ve OSA modelleri hakkında az bilgi gerektirir. Ancak, bazı dezavantajlar ve sınırlamalar vardır. Kontrol sistemlerinin yüksek frekanslı veya yüksek genlikli parametrik değişikliklere sahip olmamaları gerekir. Çünkü uyarlama algoritması sağlamlık özelliklerini karşılamaya çalıştığında kontrolör henüz yakınsamamış olabilir.

OSA sistemlerinde parametre değişimi karşısında, örneğin; bir yük eklemek veya çıkarmak, çalışma ortamını tatlı sudan deniz suyuna değiştirmek, vb. birçok uyarlamalı kontrol uygulaması gerçek su altı araçlarının kontrolünde başarıyla uygulanmıştır. Uyarlamalı kontrolör, OSA'nın dalış sürecini kontrol etmek için kullanılmıştır (Maalouf ve Tamanaja, 2013). Maalouf, bir mini HOV'un derinlik kontrolü için birkaç uyarlamalı kontrolörü tanıtmıştır. Mevcut OSA uyarlamalı kontrol uygulamalarını özetleyen ve karşılaştıran net bir inceleme, Antonelli tarafından sunulmuştur (Antonelli, 2007).

Durum uzayı geribildirim kontrol çerçevesinin dışında, yapay zeka kontrol alanında önemli bir rol oynamaktadır. Temel fikir, nöral yapıları veya evrimsel süreci taklit etmektir. NNC, FLC, Genetik Algoritmalar (GA) gibi teknikler bulunmaktadır. Yapay zeka kontrolleri, evrensel yaklaşımlarla, doğrusal olmama ve belirsizlik sorunlarını ele alabilir. Ancak, genellikle hesaplama yükü ağırdır. Nöral ağ kontrolü temelde iki adımdan oluşur: sistem tanımlama ve kontrol. Kontrolör, yapılandırılmış nöral ağların ağlıklıklarını (nöronlar arasındaki bağlantıları) bir giriş-çıkış veri çiftleri kümesinden öğrenir. Herhangi bir sistemin dinamiklerini yakalaması beklenir. Ardından, sistem kararlı durumu, doğrusal olmayan sistemi kontrol etmek için kullanılabilir. Bir nöral ağ kontrolünün sistem olarak OSA'ya uygulanmasına yönelik çalışmalar mevcuttur (Shi ve Qian, 2007, Szymak vd., 2008). Bulanık mantık kontrolü, doğrusal olmayan su altı aracı kontrolünde yaygındır. Bu kontrol yönteminde; kesin bir akıl yürütme yerine, mantıksal kural tabanı, giriş ve çıkış verilerinin değerini tam doğru ve tam yanlış arasında bulanıklaştırır. OSA bulanık mantık kontrol uygulamaları yapılmıştır (Chang vd., 2003, El-Fakdi vd., 2008). Genetik algoritma, doğal seçim süreciyle global uzayda optimal denetleyicileri rastgele arar (Lamas, vd., 2009).

Yukarıda bahsedilen kontrol yöntemlerinin her birinin avantajları ve dezavantajları olduğu açıktır. Bu, farklı algoritmaların avantajlarını birleştiren hibrid kontrol yöntemlerinin geliştirilmesine neden olmuştur. Fossen OSA için bir hibrid adaptif SMC'ü bir NNC, adaptif algoritmalarla birleştirilmiştir (Fossen, 1991 ve Shi vd., 2007). Diğer hibrid OSA kontrol uygulamaları referanslarda bulunabilir (Wallace vd., 2008, Marzbanrad vd., 2011).

### 2.3. Çalışmanın Amacı ve Literatüre Katkıları

Bu tezin amacı, denizlerdeki kirlilik seviyesini gözlemlemek veya yüzey gemilerinin tabanlarındaki hasarları tespit etmek için görüntüleme yapabilen bir Otonom Su Altı Aracı (OSA) geliştirmektir. Bu amaç doğrultusunda, kontrol performansını deniz altı ortamlarındaki belirsizliklerden ve bozuculardan etkilenmeyecek şekilde artırmak için iki kritik konuya odaklanılmıştır:

**Doğru Model:** Karmaşık gövde yapısına sahip RedFin OSA gibi araçlarda, deneysel cihazlara ihtiyaç duyulması, modelleme sürecinin hızlı olması ve karmaşık şekillerle başa çıkabilmesi gibi avantajlarından dolayı hesaplamalı modelleme yöntemlerinin kullanılması önerilmiştir.

**Gelişmiş Sağlam Kontrolör Tasarımı:** Belirsizliklerle başa çıkmak, kararlılığı garanti etmek ve beklenen kontrol performansını elde etmek için doğrusal olmayan RedFin OSA modelinin hareket kontrolü için parametreleri sezgisel optimizasyon algoritması SSA ile ayarlanan PID ve KDPID kontrolörler önerilmiştir.

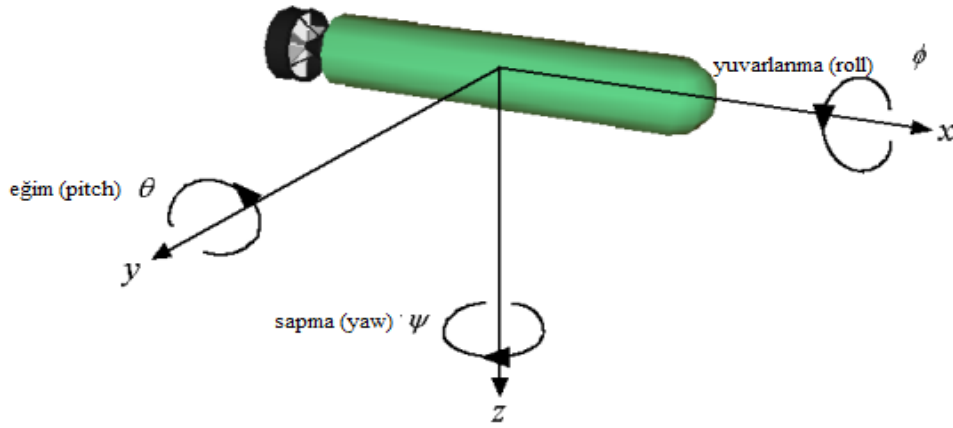
Tezin başlıca katkılarını aşağıdaki gibi sıralayabilmekteyiz;

- Karmaşık yapılı bir OSA'nın aynı anda hem tasarımı, hem dinamik modellemesi hem de sağlam bir kontrolör tasarımı yapılmıştır.
- Düşük kütleli ve karmaşık şekilli herhangi bir OSA için yeterli modelleme doğruluğuna ve verimliliğine, aynı zamanda kontrol sağlamlığına ve performansına sahip bir modelleme ve kontrol yaklaşımı sunulmuştur.
- Önerilen ve tasarlanan kontrolörün OSA hareket kontrol performansı, kaçınılmaz modelleme ve çevresel belirsizlikler, dinamik doğrusalsızlık durumları, sensör gecikmesi ve ölçülemeyen sistem durumlarıyla yüzleşmede PID kontrolörden çok daha başarılı olmuştur.
- Havuz deneyleri ile önerilen kontrolörün sağlamlığı desteklenmiştir. Önerilen modelleme ve kontrol yaklaşımı, düşük kütleli ve karmaşık şekilli su altı araçları için umut verici bir çözüm sunmaktadır.

### 3. OSA TASARIMIYLA İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR

#### 3.1. OSA'nın Hareket Serbestlikleri

Bir su altı aracı 6 serbestlik derecesine (DOF: Degr of Freedom) sahiptir. Bunlardan üçü x, y ve z eksenleri boyunca üç boyutlu uzayda doğrusal yer değiştirme hareketleri, diğer üçü ise, Euler açıları olarak tanımlanan ve aracın uzaysal duruşunu ifade eden yuvarlanma (roll)  $\phi$ , yunuslama (pitch)  $\theta$  ve sapma (yaw)  $\psi$  açısal hareketlerdir. Şekil 3.1'de sualtı aracına ait 6-DOF görülmektedir.



Şekil 3.1. OSA koordinat sistemi ve 6-DOF

x-ekseni, aracın yatay düzlemde uzunlamasına ileri ve geri ötelenmesini, y-ekseni aracın yatay düzlemde sağa ve sola kayma hareketini, z-ekseni ise dikey düzlemde aşağı yukarı hareketi temsil eder. Eksen z'nin yüzeyde sıfır olduğuna ve aşağıyı gösterdiğine dikkat edilirse, artan derinlik için pozitifdir. Bunun nedeni, OSA'nın su yüzeyinden daha yukarıya gidememesidir.

Bir su altı aracının sahip olduğu serbestlik derecelerinin miktarı, onun yapabileceği hareketleri belirler. Bununla birlikte, yüksek hareket serbestliği, tasarım sürecinde aracı dengede tutmak için her bir serbestlik derecesinin kontrolünü gerektirir. Bu ise, bir dezavantaj olabilir. Çoğu OSA, mümkün olduğu kadar çok serbestlik derecesini kontrol edebilecek şekilde tasarlanmıştır.

### 3.2. OSA Tasarımıyla İlgili Kavramlar

Herhangi bir aracı tasarlamak için, o aracı yöneten fiziksel yasalar ve çalışmasını etkileyen çevresel koşullar hakkında arka plan bilgisine ve temel kavramlara hakim olmak gerekmektedir. Bir OSA ile ilgili olarak, kaldırma kuvveti, denge koşulları, hidrodinamik sönümlenme ve basınç gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Bu bölümde, su altı araçlarının tasarımlarıyla ilgili bu temel kavram ve ilkelerin bazıları tanıtılmaktadır.

#### 3.2.1. Yüzdürme

Yüzen veya tamamen suya batmış durumda olan bir cisme etki eden kaldırma kuvveti  $B'$  nin büyüklüğü, o cismin yer değiştirdiği su hacminin ağırlığına eşittir [68]. Bir cismin yüzebilme yeteneği, cismin ağırlığının ( $W$ ) kaldırma kuvvetinden ( $B$ ) büyük olup olmasına bağlıdır. Yani,  $B > W$  ise cisim yüzer,  $B < W$  ise batar.  $B$  ve  $W$  eşitse, cisim olduğu yerde kalır.

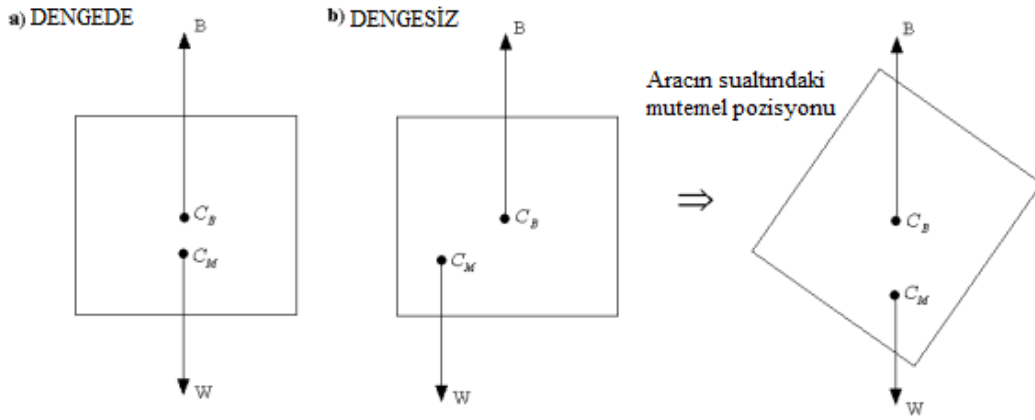
#### 3.2.2. Hidrodinamik Sönümlenme

Su içerisinde hareket eden katı bir cisme, cismin hareketiyle zıt yönde hidrodinamik sönümlenme kuvvetleri etki eder. Bu sönümlenme kuvvetleri esas olarak sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinden ve ayrıca çizgisel yüzey sürtünmesinden kaynaklanmaktadır (Chu vd., 2016). Sönümlenme kuvvetleri, bir su altı aracının dinamikleri üzerinde doğrusal olmayan bir etkiye sahiptir. Çizgisel yüzey sürtünmesi, sürüklenme kuvvetleriyle karşılaştırıldığında ihmal edilebilir düzeydedir ve bu nedenle, sönümlenme kuvvetleri hesaplanırken yalnızca sürüklenme kuvvetlerini hesaba katmak yeterlidir.

#### 3.2.3. Denge Durumu

Su hareketinin olmadığı varsayıldığında, su altında statik bir cismin dengesi, ağırlıklı olarak kütle merkezlerinin ( $C_M$ ) ve kaldırma kuvvetinin ( $C_B$ ) konumlarından etkilenir. Kaldırma kuvvetinin merkezi, cismin hacimsel yer değiştirmesinin merkezidir (Qiao vd., 2017).  $C_M$  ve  $C_B$ , uzunlamasına veya yanal yönlerde birbirleriyle dikey olarak hizalanmazsa, sıfır olmayan bir momentin ( $R_M$ ) oluşması nedeniyle kararsızlık olacaktır (Şekil 3.2).

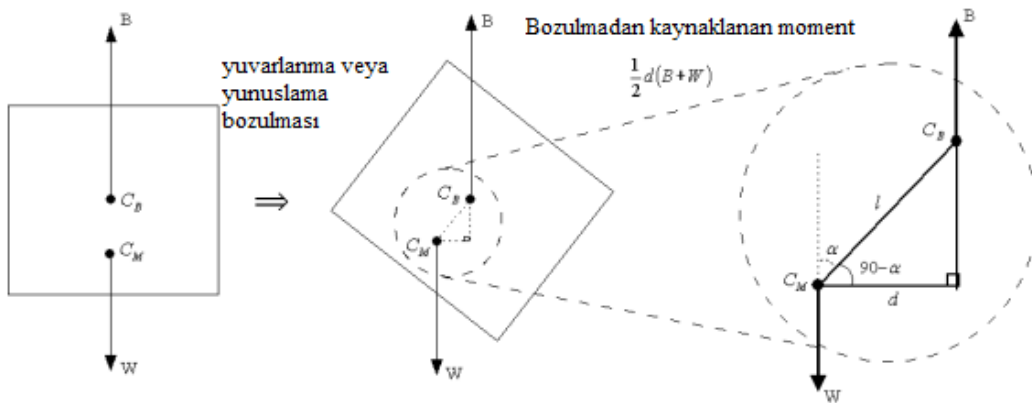
$C_M$  ve  $C_B$  uzayda aynı pozisyonda çakışırsa, araç bozulmalara karşı çok hassas olacaktır. İdeal olarak, iki merkez,  $C_B$ 'nin altında  $C_M$  ile birbirinden biraz uzakta dikey olarak hizalanmalıdır. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, bu konfigürasyon,  $C_M$  ve  $C_B$  arasındaki dikey mesafenin yanı sıra araç, yuvarlanma (roll) veya yunuslama (pitch) hareketi yaptığında hem B hem de W ile doğru orantılı olarak bir düzeltme momenti ( $R_M$ ) üretilir. Bu moment, pasif bir yuvarlanma ve yunuslama kontrol sistemi görevi görerek aracın dengesine yardımcı olur.



Şekil 3.2.a. Sualtı aracının dengede olduğu durum. b. Kütle ve yuздürme merkezlerinin yanlış hizalanması nedeniyle sualtı aracındaki pozisyon dengesizliği

$$R_M = \frac{1}{2} d (B + W) \quad (3.1)$$

Burada d, sualtı aracına etki eden B ve W kuvvetleri arasındaki dik mesafedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Aracın yuvarlanma veya yunuslama hareketi nedeni ile oluşan doğrultu momenti

$R_M$ 'nin büyüklüğü, aracın yuvarlanma veya yunuslama açısı  $\alpha$ 'nın sinüs değeri ile orantılı olarak değişir. Şekil 3.3'e göre Denklem (3.1), (3.2)'deki gibi yazılabilir;

$$R_M = \frac{1}{2} l (B + W) \sin(\alpha) \quad (3.2)$$

Burada  $l$ ,  $B$  ve  $W$  araç için sabitlerdir;  $l$  kütle ve kaldırma kuvveti merkezleri arasındaki uzaklıktır. Su altı aracının hareketli olması durumunda, denge yalnızca kütle ve kaldırma kuvveti merkezlerinden değil, aynı zamanda dış kuvvetler ve sürüklenme kuvvetleri gibi faktörlerden de etkilenir. Dinamik kararlılığı artırmak için, aracın etkin yüzey alanlarının ağırlık merkezleri tarafından belirlenen sürüklenme merkezleri, dışarıdan uygulanan kuvvetlerin merkezleriyle hizalanmalıdır. Bu sayede araç, hareket halindeyken istenmeyen özellikler sergileme eğiliminde olmayacaktır.

#### **3.2.4. Coriolis Etkisi**

Coriolis, bir cismin hareket yönüne dik yönde etki eden bir eylemsizlik kuvvetidir. Bu kuvvet, hem hız hem de koordinat sisteminin dönüşü ile orantılıdır. Coriolis kuvveti, cismin hareketi sırasında yolundan sapması sonucu ortaya çıkar. Ancak gerçekte, aracın yolu saptırılmaz, sadece öyle görünür. Bu, araç gövdesinin koordinat sisteminin araç ile birlikte hareket etmesinden kaynaklanmaktadır (Yılmaz ve Yılmaz, 2023). Bir OSA' nın koordinat sistemi başka bir referans çerçevesine göre döndüğü için, Coriolis kuvvetinin etkisi genellikle dikkate alınır ve hareket denklemlerine dahil edilir.

#### **3.2.5. Ek Kütle**

Su altı araçlarını etkileyen bir diğer olgu ise kütle eklenmesidir. Bir katı kütle su altında hareket ettiğinde, yakın çevresindeki sıvı da bu kütleyle birlikte hızlanır. Bu, aracın dinamiklerini, suyu hızlandırmak için gereken kuvvetin ek kütle olarak modellenmesi şeklinde etkiler (Abbas ve Sami, 2017). Ek kütle oldukça önemli bir etki olup, aracın kütle ve atalet değerleri ile ilgilidir.

#### **3.2.6. Çevresel Kuvvetler**

Çevresel bozucu etkiler, bir aracın hareketini ve dengesini etkileyebilir. Bu, özellikle dalgaların, akıntıların ve hatta rüzgârın aracın dengesini bozabileceği bir su altı ortamı

için geçerlidir. Araç suya tamamen batmış durumdayken, rüzgâr ve dalgaların etkisi büyük ölçüde göz ardı edilebilir. Bu durumda, su altı araçları için en önemli bozucu etki akıntılardır. Havuz gibi kontrollü bir ortamda, bu çevresel kuvvetlerin etkisi ise minimumdur (Sanchez vd., 2017).

### **3.2.7. Basınç**

Su altı basıncı, suyun bir yüzeye etki eden ağırlığından kaynaklanır. Basınç genellikle mutlak veya ortam basıncı olarak ölçülür. Deniz seviyesinde, havadan kaynaklanan basınç 14.7psi veya 1atm'dir. Her 10 m derinlik için basınç yaklaşık 1 atm artar ve bu nedenle su altında 10 m'deki mutlak basınç 2 atm'dir (Elmokadem vd., 2019). Doğası gereği lineer olmasına rağmen, derinlik arttıkça basınçtaki artış önemlidir ve su altı araçları, hayatta kalabilmek için yapısal olarak nispeten büyük miktarda basınca dayanabilmelidir.

## **3.3. Bir OSA'nın Genel Tasarımı**

Bir OSA'nın mekanik ve elektrik tasarımında dikkat edilmesi gereken çeşitli unsurlar vardır. Uluslararası Denizaltı Mühendisliği, ana tasarım unsurlarını; gövde tasarımı, tahrik sistemi, batırma ve güç kaynağı başlıkları altında tanımlamıştır (Fossen, 1995).

### **3.3.1. Gövde Tasarımı**

Bir OSA, bileşenlerini kuru, su geçirmez bir ortamda barındırmak için bir basınçlı gövde yapısına sahip olmalıdır. Gövde, bileşenlerin kolayca erişilebilir ve bakımının yapılmasına izin vermenin yanı sıra gelecekteki değişiklikler veya eklemeler durumunda modülerliğe izin vermelidir. Hafif ve güçlü olmasının yanı sıra, sert tuzlu su ortamına maruz kalacağı için gövde korozyona dayanıklı olmalıdır. Küresel gövdeler en iyi yapısal bütünlüğü sunar, ancak çoğu bileşen ve sistem dikdörtgen şeklinde olduğundan, şekil mevcut alanın verimli kullanımını engeller. Silindirik gövdeler, yüksek yapısal bütünlük ve elektronik bileşenlerin muhafazasına elverişli bir şekil içeren en iyi alternatifi sağlar.

### **3.3.2. Tahrik Sistemi**

Tüm OSA' larda bir tür tahrik sistemi gereklidir ve genellikle ana güç tüketimi kaynaklarından biridir. Çoğu OSA'da, alternatif sistemlerin az olması ve maliyet gibi

nedenlerden dolayı tahrik için motorlar kullanılır. Motorların konumu, hangi serbestlik derecelerinin kontrol edilebileceğini etkiler. Motorların konumlandırılması, pervane-gövde ve motor mili-pervane etkileşimlerinin yanı sıra, yerleşik elektronik bileşenlerle gürültü girişimini de etkileyebilir. Pervane-gövde ve motor mili-pervane etkileşimleri, bir OSA' nın dinamiklerinde istenmeyen etkilere neden olabilir.

Sabit bir hızla hareket ederken, motorlar tarafından üretilen itme kuvveti, aracın sürtünme ve sürüklenme kuvvetlerinin toplamına eşittir, yani;

$$\text{İtme kuvveti} = \text{Sürüklenme} + \text{sürtünme} = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'te;  $\rho$  su yoğunluğu,  $v$  hız,  $A$  etkin yüzey alanı ve  $C_D$  sürtünme katsayısıdır. Araç hızlandıkça tahrik sisteminin güç tüketimi önemli ölçüde artar. Bu, itme gücünün hızın küpü ile çarpımından kaynaklanır, yani itme gücü denklem (3.4)'de görüleceği üzere hızın küpüyle ilişkili bir fonksiyondur.

$$\text{İtme gücü} = \text{itme kuvveti} \times \text{hız} = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_D \quad (3.4)$$

Bu nedenle, bir OSA'nın sınırlı enerji kaynağından dolayı, çok fazla güç çekmeyen fakat aynı zamanda görevini daha kısa sürede tamamlayacak bir hızda seyahat etmesi gerekir. İdeal hızı hesaplamak, çözülmesi gereken bir optimizasyon problemidir (Sanchez, vd., 2017).

### 3.3.3. Batırma Sistemi

Suya daldırılabilir bir araçta, aracın hacmi sabit kaldığından, daha derine dalmak için kaldırma kuvvetine karşı koymak gerekir. Bunun için araç üzerine etki eden aşağı doğru itki kuvvetini artırmak gerekir. Bu da balast tankları kullanılarak, kütesini artırarak veya harici iticiler kullanılarak yapılır.

Balast tankları, daldırma için daha yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem çoğunlukla mekaniktir ve suyu almak ve çıkarmak için pompalar ve basınçlı hava kullanılır. Diğer bir yöntem, dikey iticiler kullanmaktır. Bu çok daha basit bir yöntemdir, ancak güç tüketimi açısından oldukça verimsizdir ve büyük derinliklerde çalışmalar için pek uygun değildir. Balast tanklarının boyutunu küçültmek veya suya batma işlemi için

iticilerin ihtiyaç duyduğu enerjiyi azaltmak için, OSA' lar genellikle artık yüzdürme özelliğine sahip olacak şekilde tasarlanmalıdır. Yani aracın ağırlığı, yaklaşık olarak kaldırma kuvvetine eşit olmalıdır.

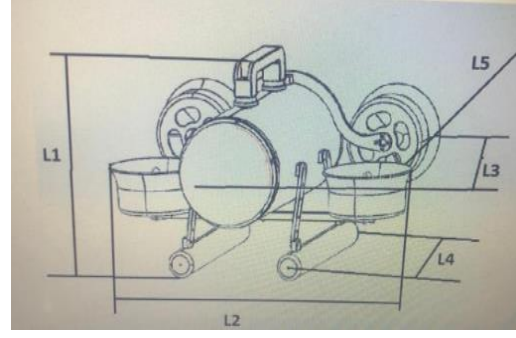
#### **3.3.4. Elektriksel Güç Kaynağı**

Elektriksel güç genellikle kapalı piller aracılığıyla sağlanır. Pillerin eşit sürede deşarj olmasını sağlamak ve piller arasında akım akışını önlemek için her birinin arasına paralel diyotlar bağlamak gerekir. Kısa devre oluşması veya bileşenlerin arızalanması durumunda aşırı akım akışını önlemek için sigortalar veya diğer koruyucu cihazlar da kullanılmalıdır. OSA' lardaki gücün kısıtlayıcı doğası, kullanılabilecek bileşen ve ekipman türlerini etkiler. Bataryaların, aracın görevini tamamlaması için gereken süreyi sağlayabilmesi için bileşenler ve donanımlar mümkün olduğunca az güç çekecek şekilde seçilmelidir.

#### **3.4. RedFin'in Mekanik ve Elektriksel Tasarımı**

Yukarıda açıklanan kavramlar dikkate alınarak YOSA RedFin, mekaniksel ve elektriksel olarak tasarlanmış ve KOÜ-BAP (Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmaları Destekleme Birimi) FDK-2022-3008 numaralı proje desteği ile geliştirilmiştir. Mekaniksel ve elektriksel tasarım süreçleri, birbirleri ile ilişkili ve birlikte yürütülmesi gereken süreçlerdir. Bu bölümde, tasarım ve yapım süreçlerinin ayrıntılarına yer verilmeyip, sadece aracın gövde yapısı, serbestlik dereceleri ve kullanılan sensörler ve elektronik sistemleri tanıtılmaktadır.

Dört serbestlik dereceli aracın (RedFin), SolidWorks'ta hazırlanan tasarım ve montaj resmi şekil 3.4'te görülmektedir. Aracın mekanik tasarımı ve elektronik ekipmanlarına ait detaylı bilgiye Ek\_A'da ulaşılabilir. Araç, şekilde de görüldüğü gibi karmaşık bir gövde yapısına sahiptir. Aracın toplam uzunluğu 0.43 m, genişliği 0.28 m, yüksekliği 0.307 m ve kuru ağırlığı yaklaşık 4.2 kg dır.



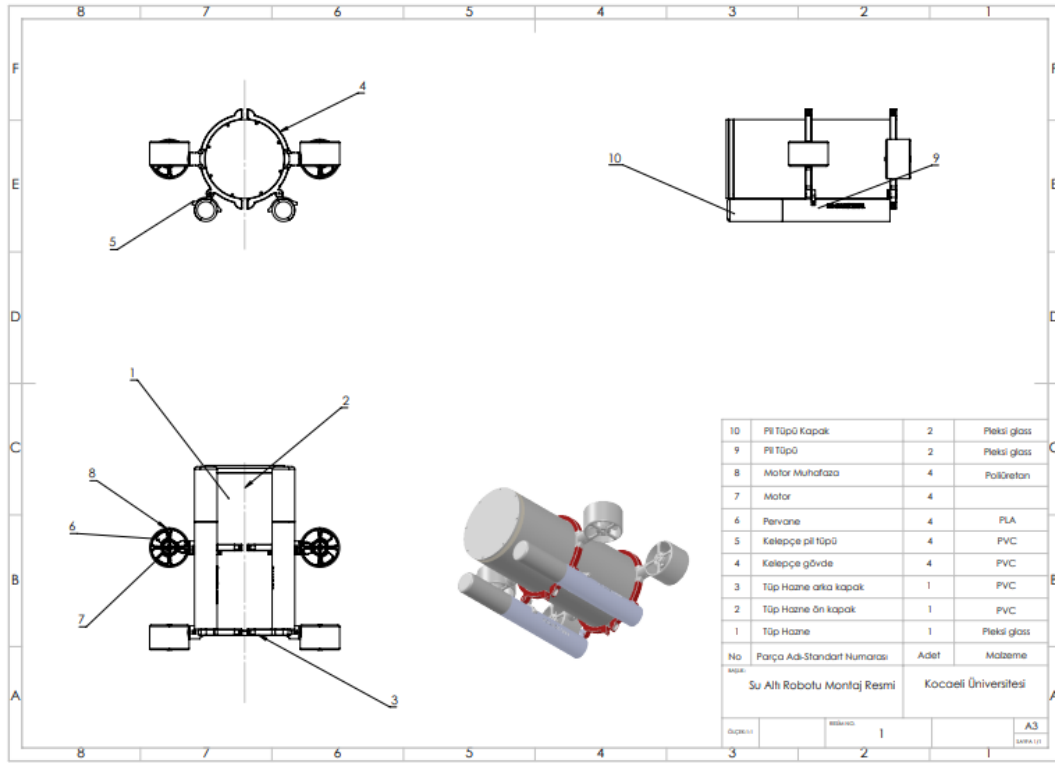
Şekil 3.4. Dört serbestlik dereceli sualtı aracı RedFin ve CAD modeli

Araç su altında hareketini, her biri 12V-8A değerlerinde dört adet fırçasız DC motor sayesinde gerçekleştirmektedir. Şekil 3.5’de görüldüğü gibi, motorlardan iki tanesi dikey konumda, diğer ikisi yatay konumdadır. Güç gereksinimi ise aracın her iki ayağını oluşturan sızdırmaz tüp hazneler içerisinde yer alan, her biri 1.2V-3700 mAh değerinde, iki adet Lityum pil grupları ile sağlanmaktadır.

Araç, ağırlığının yaklaşık %5’i kadar yüzer durumdadır. Yani, olası bir güç kaybetme durumunda yüzeye çıkabilecektir.

Araç, destekleyici bir PVC iskelet çerçevesine ayrı ayrı monte edilmiş pleksiglass’dan işlenmiş, su geçirmez silindirik bir gövdeden ve bataryaları muhafaza eden iki silindirik sentetik bloktan oluşmaktadır. RedFin’in dikey iticiler ile sağlanan dalışı, güç tasarrufu sağlamaz. Ancak karmaşık mekanik cihazlar içeren balast sistemleriyle bir karşılaştırma yapıldığında, bu iki iticiyi kullanmanın getirdiği hassasiyet ve basitlik gibi avantajlar daha ağır basmaktadır.

Yatay motorlar hem ileri hem de geri yönde dalgalanma (surge) hareketi sağlarken, dikey motorlar hem aşağı hem de yukarı yönde batıp çıkma (heave) hareketi sağlar. Yuvarlanma (roll) ve yunuslama (pitch), hareketi gerektiğinde dikey motorlar ile kontrol edilebilmesine rağmen, aracın tasarımından gelen düzeltme momenti tarafından pasif olarak kontrol edilmektedir. Araç, 4 motorun gövde üzerindeki yerleşimlerine ve yönelim açılarına göre; x ve z eksenlerinde ileri-geri öteleme ve yine bu eksenlerde dönme hareket serbestliklerine (surge, heave, roll ve yaw) sahiptir.



Şekil 3.5. RedFin için SolidWorks tasarım ve montaj resmi

RedFin' in elektronik yapısı aşağıdaki görevleri yerine getirmeye çalışmaktadır:

- Hareket kontrolünü sağlamak,
- Kamera ile görüntü alabilmek,
- Aracın bulunduğu derinliği ölçmek
- Aracın, anlık olarak uzaysal duruşunu algılamak,
- Aracın dalgalanma (surge) hızını ölçmek,
- Geniş test süreleri için yeterli gücü sağlamak.

## 4. KİNEMATİK VE DİNAMİK MODELLEMEYLE İLGİLİ KAVRAMLAR

Modelleme, su altı aracı ile akış arasındaki etkileşimli fiziksel süreçleri analiz etmek için gereklidir. Ayrıca, Su altı Aracı modeli, sağlam kontrolörleri doğrulayan etkili benzetimlerin temelini oluşturur. Tezin bu bölümünde, RedFin OSA' nın matematiksel modelleme süreci, fiziksel ilkeler doğrultusunda açıklanmaktadır.

### 4.1. Modelleme İlkeleri

Su altı araçlarının modellemesi, kinematik ve dinamik modelleme olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Kinematik, su altı araçlarına etki eden kuvvet ve torkları dikkate almadan sadece aracın pozisyonu, hızı ve ivmelenmesi arasındaki geometrik ilişkileri açıklar. Dinamik modellemede ise, su altı araçlarının ivmelenen hareketleri incelenir ve özellikle kuvvetler ve torklar dikkate alınır. Dinamik çalışma modeli, klasik katı cisim dinamiği ve hidrodinamik olmak üzere iki ana bölüme ayrılır. Deniz araçlarının modellemesi konusunda birçok makale ve kitap bulunmaktadır [Ferreira, 2012, Yang, 2014, Fossen, 2002, Vervoort, 2008).

Bu bölümde, 6 serbestlik dereceli su altı aracı dinamikleri, Fossen'in tanımladığı deniz araçları formülasyonu kullanılarak açıklanmaktadır. Bu formülasyon, Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME) [1950] terimlerini içermektedir. Deniz sistemleri için, Fossen'in önerdiği ve Şekil 4.1'de gösterildiği gibi gövde sabit referans {B} ve Kuzey Doğu Aşağı Referans (NED) olmak üzere iki koordinat sistemi kullanılır. Pozisyonlar, açılar, lineer ve açısal hızlar, kuvvet ve moment tanımları Fossen tarafından sunulduğu gibi Tablo 4.1'de tanımlanmıştır. Pozisyon vektörü  $\eta \in R^{6 \times 1}$ , hız vektörü  $v \in R^{6 \times 1}$  ve kuvvet ve tork vektörü  $\tau \in R^{6 \times 1}$  sırasıyla denklem 4.1, 4.2 ve 4.3'te tanımlanmıştır.

$$\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T \quad (4.1)$$

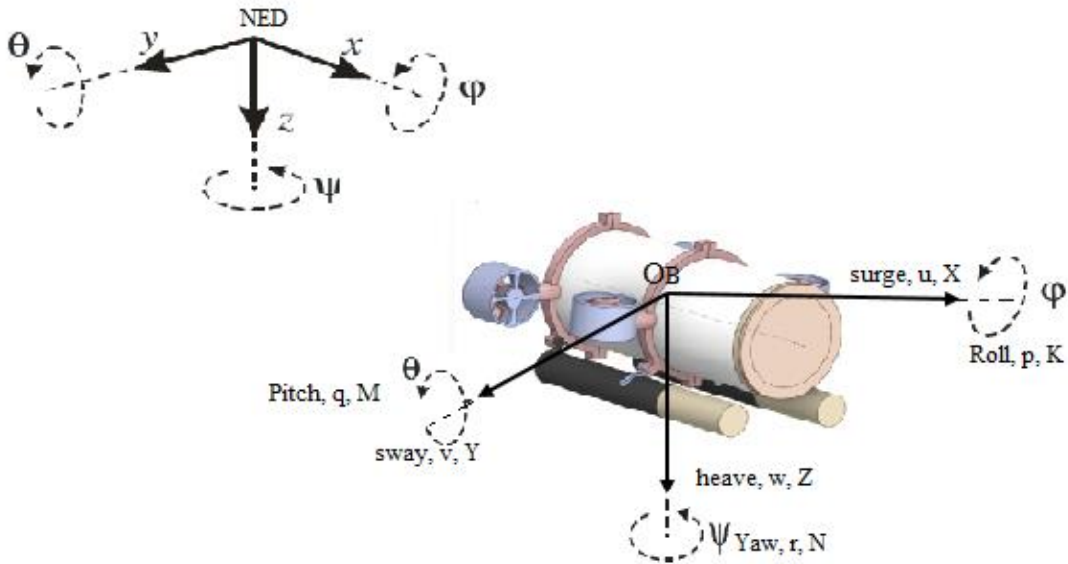
$$v = [u, v, w, p, q, r]^T \quad (4.2)$$

$$\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T \quad (4.3)$$

Burada,  $\eta$  su altı aracının NED çerçevesindeki pozisyonunu ve yönelimini belirtir,  $v$  {B} çerçevesinde tanımlı lineer ve açısal hızları belirtir ve  $\tau$  araca etki eden kuvvetleri ve momentleri, {B} çerçevesinde tanımlamak için kullanılır.

Tablo 4.1. Deniz araçları için SNAME notasyonu

| DOF                | Pozisyon ve açılar | Lineer ve açısal hızlar | Kuvvet ve Momentler |
|--------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|
|                    | NED-Çerçevede      | B-Çerçevede             | B-Çerçevede         |
| Dalgalanma (surge) | $x$                | $u$                     | $X$                 |
| Kayma (sway)       | $y$                | $v$                     | $Y$                 |
| Yükselme (heave)   | $z$                | $w$                     | $Z$                 |
| Yuvarlanma (roll)  | $\phi$             | $p$                     | $K$                 |
| Yunuslama (pitch)  | $\theta$           | $q$                     | $M$                 |
| Sapma (yaw)        | $\psi$             | $r$                     | $N$                 |



Şekil 4.1. B ve NED çerçevelerde 6-DOF'un gösterimi

## 4.2. Kinematik Modelleme

Daha önce belirtildiği gibi, kinematik, sadece su altı aracı hareketlerini geometrik açıdan ele alan, mekaniğin temel dalıdır. Deniz araçlarının veya katı cisimlerin kinematiği genellikle 6 serbestlik derecesinde olup, 6 farklı hareket bileşeni şu şekilde tanımlanır: ilerleme (surge), yana kayma (sway), dalma (heave), yuvarlanma (roll), yunuslama (pitch) ve sapma (yaw). Denklem 4.1 ve 4.2'de  $\eta$  ve  $v$  vektörlerinin ilk üç elemanı sırayla NED-çerçevede ve B-çerçevede tanımlı konum  $[x, y, z]$  ve hız  $[u, v, w]$  değerleridir.  $\eta$  ve  $v$  'nin son üç koordinatı, yani  $(\phi, \theta, \psi)$  ve  $(p, q, r)$ , sırasıyla yönelimi ve dönme açısal hızlarını temsil eder. NED çerçevesi, dünya üzerindeki sabit bir noktadır ve B çerçevesi

için referans olarak düşünülebilir. Hareketli koordinat referansı B çerçevesinin orijini, genellikle aracın kütle merkezi olarak alınır ve su altı aracının göreceli hareketini tanımlar. Özetle, kinematik yasalar, temel olarak NED çerçevesi ve B çerçevesi arasındaki konum ve hız dönüşümlerini açıklar.

Hız vektörü  $v$  ve konum vektörü  $\eta$  arasındaki kinematik ilişki, vektörel formda Denklem 4.4'deki gibi ifade edilir (Fossen, 1995).

$$v = J(\theta)\dot{\eta} \quad (4.4)$$

Burada;  $J(\theta) \in R^{6 \times 6}$ , B-frame ve NED çerçevesi arasındaki dönüş matrisini ifade eder ve  $\Theta = [\varphi, \theta, \psi]$  Euler açılarından oluşan vektördür (Şekil 4.1).

Denklem 4.4'te,  $J(\theta) \in R^{6 \times 6}$ , matrisi, su altı aracının pozisyon ve açıların zaman türevi ile lineer ve açısal hızlar arasındaki ilişkiyi ifade eder.  $J(\Theta)$ , pozisyon vektörünün türevinin ( $\dot{\eta}$ ) NED çerçevesinden B çerçevesine (ki burada hız vektörünü tanımlar) geçişini sağlamak üzere tasarlanmış bir dönüş matrisidir.

$J(\Theta)$ 'nın formülasyonu Denklem 4.5'te verilmiştir.

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} R(\theta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Burada,  $R(\theta) \in R^{3 \times 3}$  lineer hız dönüş matrisini temsil eder ve  $T(\theta) \in R^{3 \times 3}$  ise açısal hız dönüş matrisidir ve Denklem 4.6 ve 4.7'deki gibi ifade edilirler. Burada,  $s(\cdot) = \sin(\cdot)$ ,  $c(\cdot) = \cos(\cdot)$  ve  $t(\cdot) = \tan(\cdot)$  yerine kullanılmıştır.

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & s(\psi)t(\theta) & c(\varphi)t(\theta) \\ 0 & c(\varphi) & s(\varphi) \\ 0 & \frac{s(\varphi)}{c(\theta)} & \frac{c(\varphi)}{c(\theta)} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & -s(\psi)c(\varphi) + c(\psi)s(\theta)s(\varphi) & s(\psi)s(\varphi) + c(\psi)c(\varphi)s(\theta) \\ s(\psi)c(\theta) & c(\psi)c(\varphi) + s(\varphi)s(\theta)s(\psi) & -c(\psi)s(\varphi) + s(\theta)s(\psi)c(\varphi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\varphi) & c(\theta)c(\varphi) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$T(\theta)$  matrisi, yunuslama açısının  $\pi/2$  olması durumunda tanımlı değildir ki bu durum tekillik sorunu doğurmaktadır. Bu nedenle, kinematik denklemlerin alternatif bir

gösterimi quaternion kullanarak yapılır. Ancak, çoğu su altı aracı, tekilliğe izin vermeyecek şekilde çalışmaktadır.

### 4.3. Su Altı Araçlarının Katı Gövde Dinamiği

Hidrodinamik dikkate alınmazsa, su altı araçları serbest uzayda, 6 serbestlik derecesiyle hareket eden katı cisim olarak kabul edilir ve dinamik denklemleri, Newton-Euler formülasyonunu veya alternatif olarak momentum ve enerjinin korunumu yasaları kullanılarak çözülür. Bu bölümde, su altı araçlarının lineer ve açısal hareketleri, klasik Newton mekaniğine göre türetilenektir.

Su altı araçlarında, 6 serbestlik dereceli katı cisim hareketine ait dinamik denklem, Denklem 4.8'deki gibi vektörel formda ifade edilir.

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{env} + \tau_{pro} \quad (4.8)$$

Burada,  $M_{RB} \in R^{6 \times 6}$  katı gövde kütle ve eylemsizlik matrisi,  $C_{RB} \in R^{6 \times 6}$  Coriolis ve merkezkaç kuvvetler matrisi,  $\tau_{env} \in R^{6 \times 1}$  rüzgar, dalga ve akıntı gibi çevresel bozucu kuvvetler,  $\tau_{pro} \in R^{6 \times 1}$  iticilerin sağladığı itki kuvvetleri ve momentleri,  $v$  ise B-çerçeve tanımlı lineer ve açısal hızlardır.

Katı cisim kütle atalet matrisi  $M_{RB} \in R^{6 \times 6}$ , simetrik ve pozitif tanımlı bir matristir ve denklem 4.9'da tanımlanmıştır. Burada  $m$  kütle,  $I_{3 \times 3}$  birim matrisi ve  $r_G = [x_G, y_G, z_G]^T$  B çerçevesinin orijininin, aracın ağırlık merkezine olan vektördür. Eğer, aracın ağırlık merkezi ile B-koordinat çerçevesinin orijini çakışık olursa,  $M_{RB}$  matrisi basitleştirilebilir (Fossen, 1995). Ayrıca, araç gövde yapısının simetrik olması,  $M_{RB}$  matrisinin atalet bileşenlerinin sadeleştirilmesini sağlar.

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$C_{RB} \in R^{6 \times 6}$ , çarpık simetrik Coriolis ve merkezkaç kuvvetler matrisi, Denklem 4.10'dan görüleceği üzere  $M_{RB}$  katı gövde kütle ve atalet değerleri ile aracın lineer ve açısal hız vektörleri;  $v_1 = [u, v, w]$  ve  $v_2 = [p, q, r]$  değerlerine bağlıdır.

Denklem 4.8'in, 6-DOF için kuvvet ve moment eşitlikleri açık formda Denklem 4.11'deki gibi yazılır.

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & mw & -mv \\ 0 & 0 & 0 & -mw & 0 & mu \\ 0 & 0 & 0 & mv & -mu & 0 \\ 0 & -mw & mv & 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_zr & I_{yz}r + I_{xy}p - I_yq \\ -mw & 0 & -mu & I_{yz}q + I_{xz}p - I_zr & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_xp \\ mv & mu & 0 & -I_{yz}r - I_{xy}p + I_yq & I_{xz}r + I_{xy}q - I_xp & 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

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

$$Y = [\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})]$$

$$Z = [\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})]$$

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

$$+ m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \quad (4.11)$$

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

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

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

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

#### 4.4. Su Altı Araçlarında Hidrodinamik Etkiler

Deniz ortamı karmaşık bir yapıya sahiptir ve hidrodinamik etkiler, su altı araçları için kontrolör tasarımını, kara ve hava araçlarına göre oldukça zorlaştırır. Bu bölümde, su altı araçlarının okyanus veya denizlerde karşılaşabileceği farklı türdeki hidrodinamik kuvvetler ve torklar tanıtılmaktadır:

- Radyasyona Bağlı Kuvvetler :
  - Aracı çevreleyen sıvının ataletinden kaynaklanan Ek Kütle.
  - Aracı çevreleyen sıvının enerji tüketiminden kaynaklanan Hidrodinamik amortisman.
  - Arşimed prensibinden kaynaklanan Restoratif Kuvvetler (ağırlık ve kaldırma kuvveti).
- Dış bozucu etkiler (rüzgâr, dalga ve akıntılar)
- İtke sistemi tahrikleri

(Lamas, vd., 2009 ve Indiveri, 1998) tarafından belirtildiği gibi, genellikle bir katı cisim üzerindeki hidrodinamik kuvvetlerin ve momentlerin, iki alt problemin dikkate alınarak süperpozisyon ilkesi gereği doğrusal olarak üst üste bindirilebileceği varsayılır. Bu nedenle, su altı aracının hidrodinamik kuvvet ve tork vektörü,  $\tau_{hidro} \in R^{6 \times 1}$ , katı cisim dinamik denklemi 4.8'e eklenebilir ve sonuç olarak Denklem 4.12 yazılabilir.

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{env} + \tau_{hidro} + \tau_{pro} \quad (4.12)$$

Fossen'in, deniz araçlarının modellemesi konulu çalışmasında açıklandığı üzere, su altı aracına etki eden toplam hidrodinamik kuvvetler, Denklem 4.13'te gösterilen alt-hidrodinamik etkilerin toplamına eşittir (Fossen, 1995).

$$\tau_{hidro} = -M_A\dot{v} - C_A(v)v - D(|v|)v - g(\eta) \quad (4.13)$$

Burada;  $M_A \in R^{6 \times 6}$  ek kütle ve atalet matrisi,  $C_A \in R^{6 \times 6}$  ek kütlelerin sebep olduğu Coriolis ve merkezkaç kuvvetler matrisi,  $D(|v|) \in R^{6 \times 6}$  sönümlenme matrisi,  $g(\eta) \in R^{6 \times 1}$  yerçekimi ve kaldırma kuvvetleri gibi geri yükleme etkileri ve  $\tau_{hidro} \in R^{6 \times 1}$  hidrodinamik kuvvet ve momentler vektörüdür.

Su altı araçları üzerinde etkili olan akışkanın hidrodinamik etkileri iki türe ayrılabilir. Bunlar; radyasyon etkileri ve saçılma etkileridir. Su altı araçları için genellikle araç boyutu küçük olduğundan saçılma etkileri ihmal edilir ve sadece radyasyon etkileri dikkate alınır. Aşağıdaki bölümlerde bu hidrodinamik etkilerden ek kütle etkileri, hidrostatik geri yükleme etkileri ve sönümlenme etkileri açıklanmıştır.

#### 4.4.1. Hidrostatik Kuvvetler

Su altı araçları iki hidrostatik kuvvetin etkisindedir. Bunlar,  $W \in R$  yerçekimi kuvveti ve  $B \in R$  kaldırma kuvvetleridir. Aracın dengesi,  $W$  vektörü ile  $B$  vektörünün eşit olması ve bu vektörlerin dikeyde hizalı olması durumunda sağlanır. Nötr batma özelliğine sahip bir su altı aracı için, ağırlık  $W$  ile kaldırma kuvveti  $B$  yaklaşık olarak eşittir ( $B$  biraz daha büyüktür). Denklem 4.14'de, en eski mühendislik yasası olan Arşimed yasası, yerçekimi etkisini açıklamaktadır.

$$W = mg. B = \rho g \nabla \quad (4.14)$$

Burada,  $g$  yerçekimi ivmesini,  $\rho$  akışkan yoğunluğunu ve  $\nabla$  ise yer değiştiren akışkan hacmini temsil eder. Su altı araçları için, araçların nötr yüzer özelliğe sahip olacak şekilde tasarlanması yaygındır. Bu da enerji tasarrufu sağlar ve aracın batmasını önler. Fossen tarafından belirtildiği gibi, eğer su altı aracı nötr yüzer özelliğe sahipse, hidrostatik kuvvet ve moment vektörü  $g(\eta)$  Denklem 4.15'teki gibi sadeleştirilebilir (Fossen, 1995).

Hidrostatik kuvvet ve momentler vektörü  $g(\eta)$ , aracın pozisyonu ve yönelimine bağlı bir fonksiyondur ve su altı aracının dengesini belirler. Su altı aracı, dış kuvvetler etkisiyle denge durumundan uzaklaştığında,  $g(\eta)$ , denge durumlarına geri dönmek için torklar sağlayabilir. Bu, bir yay sistemine benzer; yüzdürme merkezi her zaman ağırlık merkezinden yukarıdadır ve dengeye gelmek için bir tork üretebilir. RedFin'in, yüzdürme ve ağırlık merkezleri ağırlık ekleyip çıkarma yöntemiyle belirlenmiştir.

$$g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -(y_G W) \cos(\theta) \cos(\varphi) + (z_G W) \cos(\theta) \sin(\varphi) \\ (z_G W) \sin(\theta) + (x_G W) \cos(\theta) \cos(\varphi) \\ -(x_G W) \cos(\theta) \sin(\varphi) - (y_G W) \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

#### 4.4.2. Ek Kütle

Ek kütle kuvvetleri ve momentler, yani  $\{M_A \ddot{v} + C_A(v)v\}$ , aracı çevreleyen sıvının ataleti tarafından indüklenir. Ek kütle kuvvetleri ve momentlerin genellikle bir ek kütle matrisi  $M_A \in R^{6 \times 6}$  ve bir hidrodinamik Coriolis terimleri matrisi  $C_A \in R^{6 \times 6}$  olarak ayrılması yaygındır. Ek kütle matrisi  $M_A$ , aracın ivmesi " $\ddot{v}$ " ile orantılı olan basınç kaynaklı sanal

bir kavram olarak tanımlanmıştır. Su altı araçları için, bazı serbestlikler için ek kütle, katı gövde kütesinden ve ataletinden daha büyük olabilir. Ek kütle kuvvetleri ve momentleri, su altı aracının önündeki sıvıda boş bir alan oluşturmak ve bu boşluğu aracın arkasından gelen sıvı ile doldurmak için enerji sağlar. Böylece aracın ileriye doğru hızlanması sağlanır. Ek kütle matrisi  $M_A$ , denklem 4.16'da tanımlanmıştır.

Genellikle, ek kütle matrisi  $M_A$  pozitif tanımlı bir matristir ve matrisin köşegen elemanları pozitifdir. Gerçek bir akışkan içinde,  $M_A$  matrisinin 36 elemanı tamamen farklı olabilir ve deneyimler,  $M_A = M_A^T$  olduğunu göstermiştir (Wendel 1956). Su altı araçları için, aracın hızı çok düşük olduğunda, ek kütle matrisinin köşegen olmayan elemanlarının etkisi, köşegen elemanlara göre ihmal edilebilir düzeydedir. Bu nedenle, çoğu su altı aracında  $M_A$  matrisinin köşegen formunu kullanabiliriz. Bu durum, denklem 4.17'de görülmektedir.

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$M_A = -diag\{X_{\dot{u}} \ Y_{\dot{v}} \ Z_{\dot{w}} \ K_{\dot{p}} \ M_{\dot{q}} \ N_{\dot{r}}\} \quad (4.17)$$

Ek kütle matrisi, potansiyel teorisinin uygulanmasıyla türetilebilir. Burada akışkanın viskozusuz olduğu, sirkülasyonun olmadığı ve cismin tamamen sıvı içine batmış olduğu varsayılmıştır (Fossen, 1995). Aynı zamanda,  $M_A$  parametreleri şerit teorisi uygulanarak sayısal olarak ta hesaplanabilirler. Şerit teorisi, su altı aracının batmış yüzeyini sonsuz şeritlere veya parçalara ayırır ve her bir parçadaki tüm hidrodinamik katsayıları toplar. Sonraki bölümde, RedFin OSA'nın ek kütle parametrelerini hesaplamak için kullanılan analitik hesaplama yöntemi tanıtılacaktır.

Daha önce belirtildiği gibi, ek kütle Coriolis matrisi  $C_A(v)$ ,  $C_{RB}(v)$  matrisinin yanında ihmal edilebilir olduğundan ek Coriolis etkisinin, sadece yüksek hızlarda çalışma durumlarında önemli olacağı düşünülmektedir.

#### 4.4.3. Sönümleme Etkisi

$D(|v|)$ , hidrodinamik sönümleme kuvvet ve moment parametrelerinden oluşan matristir ve  $v \in R^6$  doğrusal ve açısal hızların bir fonksiyonudur. Karmaşık şekilli su altı araçlarında sönümleme etkilerini doğru bir şekilde tahmin etmek, gerek teorik açıdan gerekse pratikte zor bir süreçtir.

Denklem (4.18)'de görüleceği üzere, sıvıdaki sönümleme etkisi dört bileşenden oluşur. Bunlar; potansiyel sönümleme  $D_P(|v|)$ , yüzey sürtünmesi  $D_S(|v|)$ , dalga sürüklenme sönümlemesi  $D_W(|v|)$ , ve girdap etkisi sönümlemesi  $D_M(|v|)$ ,

$$D(|v|) = D_P(|v|) + D_S(|v|) + D_W(|v|) + D_M(|v|) \quad (4.18)$$

Potansiyel sönüm  $D_P(|v|)$ , radyasyon kaynaklı bir sönümlemedir ve viskoz sönümlemeyle karşılaştırıldığında ihmal edilebilir düzeydedir. Yüzey sürtünmesinden kaynaklı sönümleme etkisi  $D_S(|v|)$ , sınır tabakasındaki laminar etkilerden kaynaklanan bir sönümleme türüdür ve genellikle deniz araçlarının düşük hızlı hareket analizi için önemlidir ve modellemede dikkate alınmalıdır. Doğrusal olmayan yüzey sürtünmesinden kaynaklı sönümlemeye etkisine, genellikle sınır tabakasındaki yüksek hızlarda türbülans etkileri de katkıda bulunur. Dalga sürüklenme sönümlemesi  $D_W(|v|)$ , su altı aracının hareket enerjisini, serbest yüzeyde dalgalar oluşturarak tüketir. Ancak, su altı araçları için genellikle dalgadan kaynaklı sönümleme etkisi ihmal edilebilirdir. Çünkü araç çoğu zaman su altında çalışmaktadır. D'Alembert paradoksu'na göre: sabit hızdaki su altı aracı viskoz olmayan sıvıda hiçbir kuvvet ve torkla karşılaşmaz. Ancak, viskoz sıvıda girdap, aracın enerjisinin büyük bir kısmını tüketir ve su altı araçlarının ilerleyen hareketine karşı direnç oluşturur.  $D_M(|v|)$ , Morison denkleminin önemli bir terimi olarak da kabul edilir. Model tanımlamayla ilgili Bölüm 4'te,  $D_M(|v|)$  ve Morison denklemi üzerine, RedFin OSA için tartışılmıştır.

Fossen'in açıkladığı gibi, akışkan içinde hareket eden su altı araçlarının 6 serbestlik derecesi için sönümleme etkileri oldukça doğrusal olmayan ve birbirlerini etkiler durumdadır. Bu nedenle, Fossen modeli, yüksek dereceli sönümleme etkilerini ihmal edilebileceğini varsayar ve pratik olarak farklı sönümleme terimlerinin ya doğrusal ya da

karesel sönümlemeye katkıda bulunduğunu varsaymayı önerir. Ardından, sönümleme etkisini Denklem 4.19'daki gibi tanımlar (Fossen, 1995).

$$D(|v|) = D + D_n(|v|) \quad (4.19)$$

Burada;  $D$  lineer sönümleme matrisi,  $D_n(|v|)$  karesel sönümleme matrisidir. Fossen'e göre su altı aracının hızı yeterince yüksek ise  $D$  ihmal edilebilir. Aksi halde,  $D_n(|v|)$  ihmal edilebilir. Eğer araç serbestliklerinin birbirlerine bağıllığı ihmal edilirse, sönümleme matrisinin köşegeni dışındaki elemanları ihmal edilebilir. Bu durumda, sönümleme matrisi, Denklem 4.20'de gösterildiği gibi köşegen bir forma basitleştirilebilir.

$$D(|v|) = -diag\{X_u Y_v Z_w K_p M_q N_r\} - diag\{X_{u|u}|u| Y_{v|v}|v| Z_{w|w}|w| K_{p|p}|p| M_{q|q}|q| N_{r|r}|r|\} \quad (4.20)$$

#### 4.5. İtme Sistemi Modeli

Su altı aracının pervanelerinin dinamik özellikleri çok karmaşık ve nanlineer dir (Yuh, 2000). Daha iyi kontrol performansı elde etmek için, gerekli itme kuvvetiyle pervanenin dönme hızı arasında doğrusal bir ilişki modeline sahip olmak önerilir (Antonelli, 2007 ve Maalouf, 2014). Doğru bir pervane modeli elde etmek için, akış hızını hassas bir şekilde ölçmek gereklidir (Maalouf, 2014). Şu anda, önemli engellerden biri, bu akış hızını ölçmek için etkili araçların bulunmamasıdır. Bu nedenle, su altı araçları için çoğu modelleme çalışmasında genellikle pervane dinamikleri ihmal edilmektedir. Pervane modelleme hatalarını bilinmeyen bozucular olarak ele almak yaygın bir yaklaşımdır (Chu vd., 2016).

Fossen modeline göre, pervane kuvveti ve tork vektörü  $\tau_{prop} \in R^6$ , doğrusal ve açısız hız vektörü  $v \in R^6$  ve pervane devir vektörü  $u \in R^p$  ( $p \geq 6$ )'nin doğrusal olmayan bir fonksiyonudur ve Denklem 4.21 ile ifade edilmektedir.

$$\tau_{prop} = b(v, u) \quad (4.21)$$

İlk olarak, Blanke, tek bir pervane için indüklenmiş itme  $T$  ve tork  $Q$  için birinci dereceden bir yaklaşım elde etmiştir. Bu denklemler 4.22, 4.23 ve 4.24 olarak ifade edilmiştir (Fossen, 1995).

$$T = \rho D^4 K_T (J_0) |u| u (J_0) \quad (4.22)$$

$$T(u, V_a) = T_{|u|u} |u| u + T_{|u|V_a} |u| V_a \quad (4.23)$$

$$Q(u, V_a) = Q_{|u|u} |u| u + Q_{|u|V_a} |u| V_a \quad (4.24)$$

Burada,  $D$  pervane çapını,  $\rho$  su yoğunluğunu ve  $V_a$  pervanenin ilerleme hızını (pervaneye giren suyun hızı) ifade eder.  $J_0$  ilerleme sayısı,  $K_T$  ise denklemlerde bulunan itme katsayısını temsil eder ve bu denklemler 4.25 ve 4.26'da bulunmaktadır.

$$J_0 = \frac{V_a}{u D} \quad (4.25)$$

$$K_T = \alpha_1 + \alpha_2 \frac{V_a}{u D} \quad (4.26)$$

İleri ve geri yönlü itişler asimetric olacak olsa da, çoğu uygulama için simetrik bir varsayım yapmak kolaylık sağlamaktadır (Fossen, 1995). Bu nedenle, çoğu pratik uygulamada, Denklem 4.27'deki gibi çift yönlü lineer model kullanılmıştır. Burada,  $u$  kontrolörden itki sistemine uygulanan giriş,  $B$  ise sabit bir kazanç değeridir.

$$\tau_{prop} = B u \quad (4.27)$$

Bu tezde, belirsizliklerle birlikte çift yönlü lineer modelin, su altı aracı itki sisteminin modellenmesi için yeterli olacağı düşünülmüştür.

#### 4.6. RedFin'in 4-DOF Dinamik Modeli

Yukarıdaki bölümlerde anlatılan dinamik model, karmaşık, doğrusal olmayan 6-DOF bir denklemdir. RedFin OSA, mevcut yapısıyla 4 serbestlik derecesine sahiptir ve dinamik model denkleminin 4-DOF'a indirgenmesi gerekmektedir. Ayrıca, aşağıda açıklanan varsayımlara göre dinamik model sadeleştirilmiştir:

- RedFin düşük çalışma hızına sahiptir (maksimum 1,5 m/s)
- RedFin, X-Z düzlemi etrafında simetrik ve yapısı X-Y ve Y-Z düzlemlerinde de simetriye yakındır.
- Yuvarlanma (roll) ve yunuslama (pitch) hareketi pasif olarak kontrol edilmekte ve bu nedenle ihmal edilebilir olarak kabul edilmiştir.

- Tüm manevralar sırasında aracın her zaman yatay konumunu koruduğu,
- Aracın serbestlik derecelerinin ayrıştırılabilir olduğu,
- Sallanma (sway), yani aracın y eksenine boyunca hareketinin mümkün olmadığından ihmal edilebileceği düşünülmüştür.

Yukarıda belirtilen varsayımlara göre, dinamik model; dalgalanma (surge), kaldırma (heave) ve sapma (yaw) hareketlerinde aktif, kayma (sway) hareketinde pasif olmak üzere 4 serbestlik dereceli (4-DOF) bir modele basitleştirildi. Serbestlik derecelerinin ayrılması nedeniyle hidrodinamik sönümleme matrisi diyagonal olarak kabul edildi. RedFin'in nötr yüzer olması nedeniyle hidrostatik kuvvet matrisi ihmal edilmiştir. Yuvarlanma (roll) ve yunuslama (pitch)'in her zaman sıfır olduğu düşünüldüğünde, 4-DOF sistem modeli durum uzayı formatında Denklem (4.29)'daki gibi yazılabildi. NED-koordinat çerçevesinde konum ve yönelim vektörü;  $\eta = [x \ y \ z \ \psi]^T$ , B-koordinat çerçevesinde; doğrusal ve açısal hız vektörü;  $v = [u \ v \ w \ r]^T$  ise 4-DOF model için kinematik model Denklem (4.28)'deki gibi tanımlandı.

$$\dot{x} = u \cos(\psi) - v \sin(\psi)$$

$$\dot{y} = u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \quad (4.28)$$

$$\dot{z} = w$$

$$\dot{\psi} = r$$

$$\begin{bmatrix} m + X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m + Y_{\dot{v}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m + Z_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_z + N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_G r - u) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 + T_2 \\ 0 \\ T_3 + T_4 \\ -l_{1y}T_1 + l_{2y}T_2 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$(M_{RB} + M_A)\dot{v} + (C_{RB}(v) + C_A(v))v + D_L + D_Q(v) = \tau$  şeklinde tanımlanmış olan dinamik model denklemi, (4.29)'da durum uzayı formatında ifade edilmiştir. Burada; m aracın kütlesi,  $I_z$  z-ekseni için atalet momentidir. W ağırlık, B kaldırma kuvvetidir.  $X_{\dot{u}}$ ,  $Y_{\dot{v}}$ ,  $Z_{\dot{w}}$  ve  $N_{\dot{r}}$  sırasıyla surge, sway, heave ve yaw serbestlikleri için ek kütle katsayılarıdır.  $X_u$ ,  $Y_v$ ,  $Z_w$  ve  $N_r$  lineer hidrodinamik sönümleme katsayılarıdır;

$X_{|u|u}, Y_{|v|v}, Z_{|\omega|\omega}$  ve  $N_{|r|r}$  ikinci dereceden hidrodinamik sönümleme katsayılarıdır.  $\tau_u$ ,  $\tau_\omega$  ve  $\tau_r$ , dört pervaneyi kontrol eden eksik çalıştırılan su altı aracının kontrol girişleridir. Su altı aracının yerçekimi kuvveti, neredeyse kaldırma kuvvetine eşittir. Bu nedenle, HAD analizlerinde, (W- B) sıfır olarak alınmıştır.

## 5. DİNAMİK MODELİN TANIMLANMASI VE DOĞRULANMASI

Bu bölüm, RedFin OSA modelinin önemli dinamik ve hidrodinamik parametrelerini açıklamaya ayrılmıştır. Bunlar; katı gövde kütle ve atalet matrisi  $M_{RB}$ , ek kütle matrisi  $M_A$  ve sönümlleme matrisi  $D(|v|)$ ' dir. Karmaşık yapısı nedeniyle, geleneksel empirik hesaplama yaklaşımı, genellikle ince şekilli OSA'larda olduğu kadar verimli değildir (Wang ve Clark, 2001). Ayrıca, tam ölçekli ve ölçekli hidrodinamik deneyler genellikle maliyetlidir (Ferreira, 2009, Yang, 20015, Sahoo, 2020). Bu nedenle, karmaşık şekilli su altı araçlarının modelleme sorunlarını çözmek için hidrodinamik parametreleri sayısal olarak HAD yazılımını kullanarak tanımlama yöntemi tercih edilmiştir. RedFin'in güçlü hareket kontrolü tasarımı için her hidrodinamik parametrenin doğru tanımlanması amaçlanmaktadır.

Aracın, katı gövde kütle ve atalet değerlerinin ve ağırlık merkezinin belirlenmesi için CAD yazılımı SolidWorks™ kullanılmıştır. Ek kütle ve atalet değerlerinin belirlenmesi için araç gövde geometrisi prizmaya yakınsanarak ilgili analitik hesaplama teknikleri kullanılmıştır.

surge, sway ve heave serbestlikleri için sönümlleme davranışını tahmin etmek amacıyla ANSYS-FLUENT™ hidrodinamik hesaplama programından yararlanılmıştır. Dönme hareketi sönümlleme etkileri, ANSYS-FLUENT™ içinde hareketli referans ve örtülü ağ teknikleri kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir.

### 5.1. Katı Gövde Kütle Atalet Matrisi

Farklı yoğunluk bileşenlerinden dolayı, RedFin'in kütle atalet değerleri denklem (5.1)'den doğrudan hesaplamayla bulunamaz (Kılıcı, 2020).

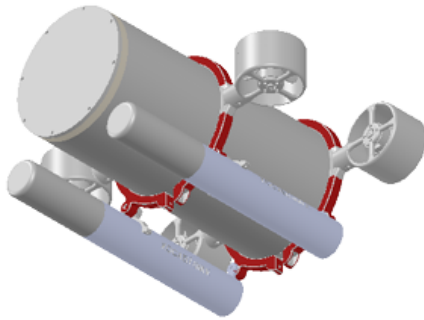
$$m = \int \rho_m dV, \quad I = \int r^2 \rho_m dV \quad (5.1)$$

Burada,  $\rho_m$ , ilgili temel hacmin yoğunluğudur,  $V$  araç gövdesinin toplam hacmidir,  $r$  ise birim hacim  $dV$  ve CG arasındaki mesafedir. Aracın kütlesi  $m$ , B-çerçeveye göre atalet momentleri  $I_0$ 'dır ve denklem (5.2)'deki gibi ifade edilir.

$$I_0 = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yz} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Solid Works™ CAD yazılımı kullanılarak RedFin'in gövde parçaları ayrı ayrı çizildikten sonra birleştirilerek 3B araç modeline atanmıştır. Ayrılan bileşenlerin sabit bir yoğunluğa sahip olduğu varsayılmıştır. 3D su altı aracının CAD görünümü Şekil 5.1' de gösterilmiştir. Son olarak, SolidWorks™ yazılımı ile kütle atalet matrisi  $M_{RB}$  ve kütle merkezinin koordinatları  $C_G$  sayısal olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.1' de görüleceği üzere, su altı aracı RedFin'in basitleştirilmiş modeli şu bileşenlerden oluşmaktadır: 4 pervane, bir tanesi elektronik parçaları diğer iki tanesi bataryaları muhafaza etmek üzere, su geçirmez 3 adet silindirik kutu, parçaları birleştiren PVC destekler, PVC taşıma kulpu. Diğer parçalar, genellikle farklı görevler için değiştirildiğinden, bunlar  $M_{RB}$  tahmininde ihmal edilmiştir. Sualtı aracı RedFin'e ait kütle-atalet değerleri ile ağırlık merkezi koordinatları ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 5.1' de görülmektedir.



| 10                                     | Pil Tüpü Kapak              | 2    | Pleksi glass         |
|----------------------------------------|-----------------------------|------|----------------------|
| 9                                      | Pil Tüpü                    | 2    | Pleksi glass         |
| 8                                      | Motor Muhafaza              | 4    | Poliüretan           |
| 7                                      | Motor                       | 4    |                      |
| 6                                      | Pervane                     | 4    | PLA                  |
| 5                                      | Kelepçe pil tüpü            | 4    | PVC                  |
| 4                                      | Kelepçe gövde               | 4    | PVC                  |
| 3                                      | Tüp Hazne arka kapak        | 1    | PVC                  |
| 2                                      | Tüp Hazne ön kapak          | 1    | PVC                  |
| 1                                      | Tüp Hazne                   | 1    | Pleksi glass         |
| No                                     | Parça Adı-Standart Numarası | Adet | Malzeme              |
| BAŞLIK:<br>Su Altı Robotu Montaj Resmi |                             |      | Kocaeli Üniversitesi |

Şekil 5.1. RedFin'in 3B CAD modeli ve parçaları

Diyagonal eksen dışındaki atalet momentleri, bu eksendeki atalet momentlerine göre ihmal edilebilecek ölçüde küçük hesaplandığından, atalet momentleri matrisinin sadece 3 elemanı kullanılmıştır ( $I_x, I_y, I_z$ ).

Tablo 5.1. RedFin'in kütsel ve fiziksel özellikleri

| Özellik              | Değer                | Özellik          | Değer                    |
|----------------------|----------------------|------------------|--------------------------|
| Toplam kütle (m)     | 4.21 kg              | $x_G$            | 0 m                      |
| Hacim (V)            | 0.002 m <sup>3</sup> | $y_G$            | 0 m                      |
| Uzunluk (l)          | 0.43 m               | $z_G$            | 0.03 m                   |
| Genişlik (d)         | 0.37 m               | $I_x$ (atalet-x) | 0.0604 kg.m <sup>2</sup> |
| Yükseklik (h)        | 0.26 m               | $I_y$ (atalet-y) | 0.0463 kg.m <sup>2</sup> |
| Yerçekimi (W)        | 41.3 N               | $I_z$ (atalet-z) | 0.874 m <sup>2</sup>     |
| Kaldırma kuvveti (B) | 43.2 N               |                  |                          |

## 5.2. Ek Kütle Matrisinin Tahmini

Bu bölümde, tipik çalışma sınıfı bir su altı aracı için hidrodinamik parametreleri tahmin etmeye yönelik analitik bir yöntem tanıtılarak, RedFin'e uygulanması açıklanmaktadır. Yöntem, mevcut temel empirik ve analitik veriler üzerine inşa edilmiştir ve herhangi bir geometrik şekil üzerinde kullanılabilir. Bu yöntemin odak noktası, makul bir doğrulukla hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilecek temel bir tahmin oluşturmaktır. Bu nedenle yöntem, araç hakkında çok az bilgi gerektirmektedir.

Kütle matrisindeki terimler çok basit, geometriye bağlı niceliklerdir. Aracın bir CAD modeli varsa, katsayıların kesin değeri kolaylıkla bulunabilir (Bölüm 5.1).

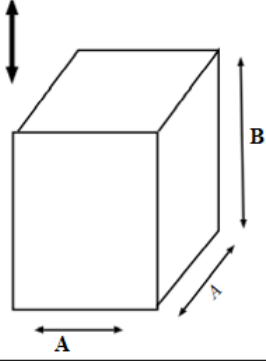
Ek kütle parametrelerini tahmin için literatürde birçok standart analitik yöntem vardır, ancak bu tezde DNV standardı referans olarak kullanılacaktır. DNV standardı, referans olarak 3 kenardan 2'sinin eşit olduğu bir dikdörtgen prizma kullanır. Bu varsayım, SF-30k, AC-ROV 100, Seabotics LBV600-6 ve Videoray PRO-4 için uygulanmıştır. Tüm bu ROV'lar yaklaşık olarak eşit yükseklik ve genişliğe sahiptir. Analitik yöntemle ek kütle parametreleri hesaplanırken ROV'un yükseklik ve genişliğinin ortalama değeri kullanılacaktır (Eidsvik, 2018).

Analitik hesaplamalar ile ilgili referanslarda ROV'un gövde yapısının katı bir prizma olduğu varsayılır. Gerçekte ise ROV tamamen katı olmadığı için sonuçların nüfuz eden akışı hesaba katacak şekilde ayarlanması gerekir. Bu, bir ölçeklendirme katsayısı  $C_p^{mn}$  dahil edilerek yapılmaktadır. Bu katsayı, prizmanın akışa karşı olan yüzeyinin izdüşümsel alanının gerçek alana bölümü ile bulunur. Yani  $C_p^{mn} = A_p^{mn} / A^{mn}$ . Aşağıdaki tabloda, mn ile ifade edilen düzlemler ve referans eksen tanımlanmıştır.

Tablo 5.2. (x-y), (x-z), (y-z) izdüşümsel alanlarının tanımlanması

| Serbestlik Derecesi | m | N | o |
|---------------------|---|---|---|
| Surge & roll        | X | Y | Z |
| Sway & pitch        | Y | Z | X |
| Heave & yaw         | Z | X | Y |

Tablo 5.3. DNV standardına göre dikdörtgen prizma için ek kütle verileri (Eidsvik, 2018)

| Gövde şekli                                                                        | Boyutlar B/A | Ek kütle katsayısı |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------|
|  | 1.0          | 0.68               |
|                                                                                    | 2.0          | 0.36               |
|                                                                                    | 3.0          | 0.24               |
|                                                                                    | 4.0          | 0.19               |
|                                                                                    | 5.0          | 0.15               |
|                                                                                    | 6.0          | 0.13               |
|                                                                                    | 7.0          | 0.11               |
|                                                                                    | 10.0         | 0.08               |

Dönme serbestlik dereceleri için 3B şekillerde parametre hesaplanmasına yönelik empirik yöntem bulunmamaktadır. Bu nedenle farklı bir yaklaşım önerilmiştir [92]. Benzer şekiller ile ilgili bilgileri kullanarak, bir küre (3B) ve aynı yarıçaplı (2B) sonsuz uzunluktaki bir silindir için ek kütle tahminleri arasındaki farkın %50 olduğu gözlenmiştir. Bu ilişkiyi eldeki probleme uyarlayarak, dönme serbestlik dereceleri için bir prosedür oluşturulmuştur (Eidsvik, 2018). Bu prosedür aşağıda açıklanmıştır.

- DeneySEL 3B verileri kullanarak doğrusal serbestlikler için ek kütle bulunur.
- 2B veri ve şerit teorisi kullanılarak doğrusal serbestlikler için ek kütle bulunur.
- İki yöntem arasındaki fark hesaplanır.(Ölçekleme faktörü)
- 2B verileri ve şerit teorisi kullanılarak dönme serbestlikleri için ek kütle bulunur.
- Sonuçlar ölçekle çarpılır.

Bu yöntemi kullanarak, ek kütle matrisindeki tüm köşegen terimleri bulmak mümkündür.

Bu tezde, ek kütle katsayıları, daha önce belirtildiği gibi izdüşümsel alan kullanılarak ölçeklenecektir. Bu değerler, SolidWorks'te bir model oluşturularak ve her 3 düzlemde de izdüşümsel alan ölçülerek bulunmuştur. İzdüşümsel alan, tam boyutlu ROV manuel

olarak ölçülerek de bulunabilir. İzdüşümsel alan daha sonra  $C_p^{mn}$  katsayılarını hesaplamak için kullanılır.

$$C_P^{XY} = \frac{A_P^{XY}}{A} = \frac{A_P^{XY}}{L*W} \quad (5.3)$$

$$C_P^{YZ} = \frac{A_P^{YZ}}{A} = \frac{A_P^{YZ}}{H*W} \quad (5.4)$$

$$C_P^{ZX} = \frac{A_P^{ZX}}{A} = \frac{A_P^{ZX}}{L*H} \quad (5.5)$$

Prosedür ilk önce dalgalanma (surge) serbestlik derecesi için gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.3'te başvurulmuş minimum (B/A) değerinin 1.0 olduğu görülmektedir. Bu, 3B verilerin yalnızca, uzunluğun ROV'nin hem genişliğinden hem de yüksekliğinden daha büyük olduğu varsayıldığında, dalgalanma serbestliği için geçerli olduğu anlamına gelmektedir. Bu durum literatürde yer alan beş ROV için de geçerlidir.

İlk olarak, ek kütle matrisinin ilk elemanı olan  $A_{11}$  için ampirik 3B katsayıları bulunacaktır. Tablo değerlerine bakmak için ROV'nin genişlik-yükseklik ilişkisi (b/a) gerekmektedir. Tablo yalnızca belirli sayıda veri noktası içerdiğinden, veri kümesi (b/a) değerinin bulunduğu iki değer arasında doğrusallaştırılır.

Noktalar arasındaki mesafenin lineerleştirilmesi, empirik değeri elde etmek için aşağıdaki formülü verir:

$$C_a(b/a) = \frac{C_a(2) - C_a(1)}{X_2 - X_1} * (X - X_2) + C_a(2) \quad (5.6)$$

Daha sonra referans hacminin hesaplanması gerekir:

$$V_R = b * a^2 \quad (5.7)$$

Ek kütle hesaplamak için türetilmiş formül en son haliyle eşitlik (5.8)'daki gibi yazılır.

$$A_{IJ} = C_a V_R \rho_{su} (C_p^{n0})^2 (C_p^{m0}) (C_p^{mn}) \quad (5.8)$$

Surge serbestlik derecesi için 2D veri için ek kütle katsayısı hesaplanırken birim hacim yerine birim alan kullanılır

$$A_r = \pi * (a^2) \quad (5.9)$$

Ek kütle katsayısı 2D için eşitlik (5.10)'daki gibi olur.

$$A_{11}^{2D} = \rho * C_a A_r (C_p^{no})^2 (C_p^{m0}) (C_p^{mn}) \quad (5.10)$$

Daha sonra şerit teorisi uygulanarak, eklenen 2B kütle, gövdenin tüm uzunluğu boyunca integral alınarak hesaplanır. Bu durumda, şerit teorisi kullanılarak hesaplanan 3B ek kütle (5.11)'deki gibi olur.

$$A_{11} = \int_{L/2}^{L/2} A_{11}^{2D} dx \quad (5.11)$$

Şerit teorisi ile 3B hesaplamalar arasındaki oranı ( $\lambda$ ) bulmak için Denklem (5.12)'den yararlanılır:

$$\lambda = \frac{A_{11}^{ampirik-3D}}{A_{11}^{ampirik-2D}} \quad (5.12)$$

Ölçekleme faktörü  $\lambda$ , iki yöntem arasındaki ilişkidir. Bu nedenle, bu ilişki oranı tüm serbestlikler için geçerliyse, ek kütlelerin şerit teorisi kullanılarak hesaplanabileceği ve daha sonra doğru ek kütle tahminini elde etmek için ölçeklendirilebileceği açıktır.

Dönme serbestlik dereceleri için ek kütle katsayıları şerit teorisi kullanılarak bulunmuştur ve lineer hareket serbestlik dereceleriyle aynı şekilde ölçeklendirilmiştir. 2B ek kütle katsayıları yine DNV standardından bulunmuştur (Eidsvik, 2018). Dönme serbestlik dereceleri için 2B ek kütle formülü eşitlik (5.13)'deki gibidir.

$$A_{ii}^{2D} = \rho * C_a * \pi * a^4 (C_p^{n0}) (C_p^{m0}) (C_p^{mn}) \quad (5.13)$$

Tüm araç gövdesi boyunca integral alınarak ve son olarak  $\lambda$  ölçeği ile çarpılarak dönme serbestlikleri için ek kütle değerleri hesaplanır.

$$A'_{ii} = \int_{-(L,B,H)/2}^{(L,B,H)/2} A_{ii}^{2D} dx \quad (5.14)$$

$$A_{ii} = A'_{ii} \lambda [kgm^2] \quad (5.15)$$

Ek kütle ve atalet matrisinin tüm köşegen elemanlarının, burada açıklanan ampirik yöntem ile hesaplandığı Matlab kodu **EK-B**'de bulunmaktadır. RedFin'in, AYE yöntemi ile bulunan ek kütle ve atalet katsayıları, Tablo 5.4'te verilmektedir.

Tablo 5.4. Analitik yöntemle hesaplanan ek kütle ve atalet matrisi elemanları

| Ek kütle | $X_{\ddot{u}}$ (Ns <sup>2</sup> /m) | $Y_{\ddot{v}}$ (Ns <sup>2</sup> /m) | $Z_{\ddot{w}}$ (Ns <sup>2</sup> /m) | $K_p$ (Ns <sup>2</sup> /rad) | $M_{\dot{q}}$ (Ns <sup>2</sup> /rad) | $N_{\dot{r}}$ (Ns <sup>2</sup> /rad) |
|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|          | 1.208                               | 2.75                                | 3.23                                | 0.0149                       | 0.0475                               | 0.0359                               |

### 5.3. Sönümlleme Matrisinin Tahmini

Bir önceki bölümde belirtildiği gibi, su içerisinde hareket eden araçların 6-DOF için sönümlleme etkileri birbirine bağlı, doğrusal olmayan yapıdadır ve bu etkileri ayırmak zordur. Özellikle, Fossen'in sönümlleme formülünden (Denklem 4.18), görüleceği üzere farklı sönümlleme terimleri ya doğrusal ya da karesel sönümllemeye katkıda bulunur. Hem pratikte hem de teoride, karmaşık şekilli su altı araçları için 6-DOF sönümlleme etkilerini kesin bir şekilde tanımlamak oldukça zordur. Ancak, gelişmiş su altı araçlarının manevra yeteneklerini, aynı zamanda navigasyon veya konum belirleme yeteneklerini iyileştirmek için doğru sönümlleme matrisinin tahmin edilmesi önemlidir.

Bu nedenle, bu bölümde, karmaşık şekilli RedFin OSA için sönümlleme matrisi  $D(|v|)$ 'yi tahmin etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı ANSYS-FLUENT™ ile yapılan çalışmalar açıklanacaktır.

Aşağıda, RedFin OSA'nın sönümlleme analizi çalışması dört bölüme ayrılmıştır:

- Morison denklemi, su altı araçlarının doğrusal ve karesel sönümlleme etkilerinden gelen katkıları tanımlamak için kullanıldı.
- Sönümlleme kuvvetleri ile araç hızları arasındaki ilişki, ANSYS-FLUENT yazılımı kullanılarak dalgalanma (surge), kayma (sway) ve yükselme (heave) lineer hareketleri için yaklaşık olarak belirlendi.
- OSA'nın dikey eksen etrafında dönme hareketi (yaw) sönümlleme etkisi, ANSYS-FLUENT'te hareketli referans tekniği kullanılarak analiz edildi.
- Her analizden elde edilen sayısal değerler birleştirilerek RedFin OSA'nın sönümlleme matrisi  $D(|v|)$  elde edildi.

### 5.3.1. Morison Denklemi Analizi

Bölüm 3'te açıklandığı üzere, yüzey sürtünme sönümlemesi  $D_S(|v|)$  ve girdap etkisi sönümlemesi  $D_M(|v|)$ , tek etkili parametrelerdir. Fossen'ın sönümleme modeline göre (bkz. Denklem 4.19), yüksek dereceden sönümleme etkilerinin ihmal edilebileceği ve düşük dereceden sönümleme etkilerinin bağlantılı olmadığı varsayılmıştır. Hıza bağlı sönümleme matrisi, Denklem 5. 16'daki gibi gösterilir.

$$D(|v|) = \begin{bmatrix} |v|^T D_1 \\ |v|^T D_2 \\ |v|^T D_3 \\ |v|^T D_4 \\ |v|^T D_5 \\ |v|^T D_6 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Burada;  $|v|^T = [|u|, |v|, |w|, |p|, |q|, |r|]$  lineer ve açısal hız vektörü ve  $D_i \in R^{6 \times 6}$  sönümleme matrisi elemanlarıdır. Fossen'e göre, su altı aracının hızı yeterince yüksek ise lineer sönümleme (D) ihmal edilebilir. Aksi durum için karesel sönümleme katsayıları ( $D_n(|v|)$ ) ihmal edilebilir.

OSA modelleme ve denetleyici tasarımı için önemli bir konu, hem yüzey sürtünme sönümleme etkisi  $D_S(|v|)$  hem de girdap etki sönümlemesi  $D_M(|v|)$ 'nin aynı anda lineer ve karesel sönümleme matrisine katkıda bulunmasıdır. Bu durumda, baskın etkiyi belirlemek zordur. Bu nedenle, Morison formülünü kullanarak RedFin OSA'nın sönümleme davranışları kabaca belirlenmiştir. Morison sönümleme formülü Denklem 5.17' de verilmiştir (Sabet vd., 2017).

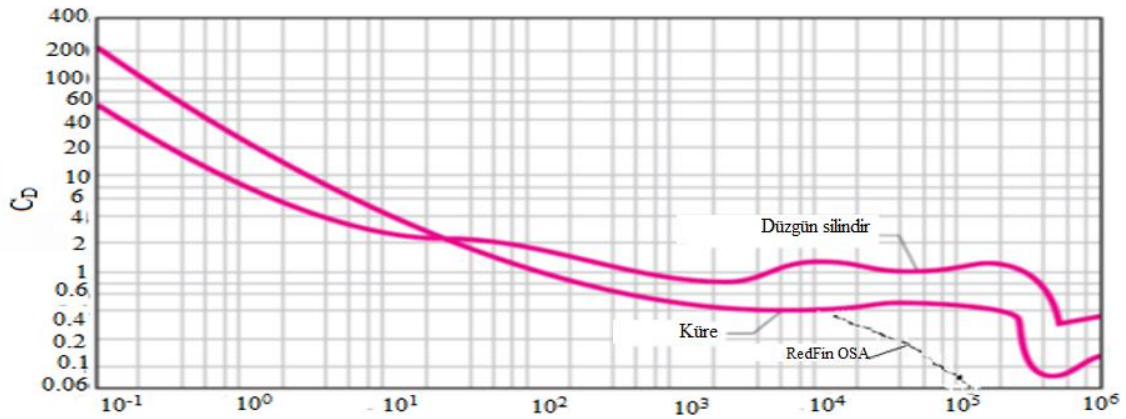
$$f(U) = -\frac{1}{2} \rho_d C_D(R_n) A U |U| \quad (5.17)$$

Burada,  $U$  aracın hızı,  $\rho_d$  akışkan yoğunluğu,  $A$  akışkana maruz kalan kesit alanı,  $R_n$  Reynolds sayısı ve  $C_D$  Reynolds sayısının fonksiyonu olan sönümleme katsayısıdır ve Reynolds sayısı, Denklem 5.18'deki gibi hesaplanır.

$$R_n = \frac{\rho_d U D_{CL}}{\mu_{is}} \quad (5.18)$$

Burada,  $v_{is}$  akışkan viskozitesi ve  $D_{CL}$  karakteristik uzunluk, yani akışın içinden veya etrafından geçtiği nesnenin uzunluğudur. Genellikle, kürelerin ve silindirlerin Reynolds sayısı için  $C_D(R_n)$  değerleri çeşitli akış hızlarında yapılan deneyler ve veri uyumu ile elde edilmiştir.

Uygulamamızda, akışkanın deniz suyu olduğu düşünülmekte ve dolayısıyla viskozitesi  $v_{is} = 1,56 \times 10^{-6}$  kg/(m.s) olarak, yoğunluğu ise 20 °C'de ve % 35 tuzlulukta  $\rho_d = 998,2$  kg/m<sup>3</sup> olarak alınmıştır. RedFin genellikle herhangi bir lineer yönde 0 ila 1,5 m/sn hız aralığında çalışır. Aracın karakteristik uzunluğu yaklaşık olarak 0.4 m'dir. Bu durumda, RedFin'in Reynolds sayısı  $10^8$  ila  $10^9$  arasındadır. (Amini, 2021)'e göre, kürelerin ve silindirlerin standart sönümlenme deneylerinde, Reynolds sayısı  $10^5$  ila  $10^6$  arasında, yani kritik bölgededir ve bu bölgede laminar ve türbülans akışları arasında belirgin bir geçiş olmaktadır. Sönümlenme katsayısı  $C_D$ 'nin Reynolds sayısına göre değişimi silindir ve küre için Şekil 5.2'de görülebilir (Yılmaz, 2023).



Şekil 5.2 Silindir ve küre için  $C_D$ -Reynolds sayısı ilişkisi

Reynolds sayısının  $10^6$ 'dan büyük olduğu kritik bölgenin uzağında, sönümlenme katsayısı  $C_D$  sabit bir değere yaklaşır. Bizim çalışmamızda, RedFin 0,4 m çapında bir silindir veya prizma olarak kabul edilmiştir. Su altı aracının sönümlenme kuvveti, aracın hızına bağlı olarak Denklem 5.19'daki gibi tanımlanır.

$$f(U) = -\frac{1}{2} \rho_d C_D A U |U| \quad (5.19)$$

Teorik olarak, nonlinear karesel sönümlenme  $D_n(|v|)$ 'nin, RedFin OSA'nın sönümlenme matrisinde daha baskın olduğunu söyleyebiliriz. Ancak, RedFin'in karmaşık şekilli yapısı

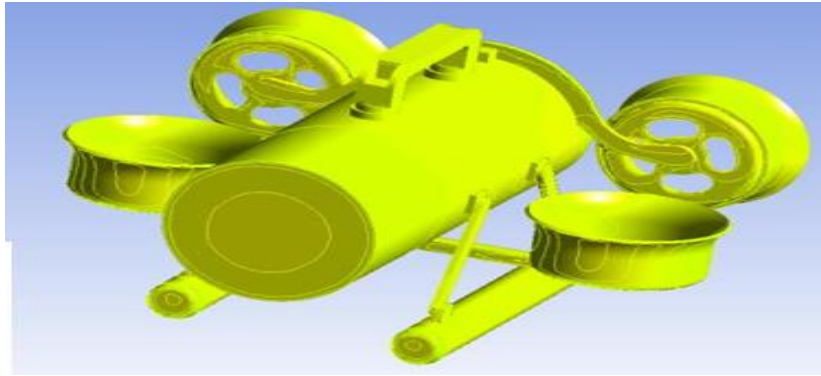
nedeniyle Morison denklemi kesin sönümlleme tahminleri veremez. Bu nedenle, aşağıdaki bölümlerde HAD yazılımı ANSYS-FLUENT kullanılarak daha hassas ve nicel sönümlleme etkilerini hesaplamak amaçlanmıştır.

### 5.3.2. ANSYS-FLUENT Sönümlleme Analizi

ANSYS-FLUENT HAD yazılımı kullanılarak su altı araçlarının sönümlleme analizi beş adıma ayrılabilir:

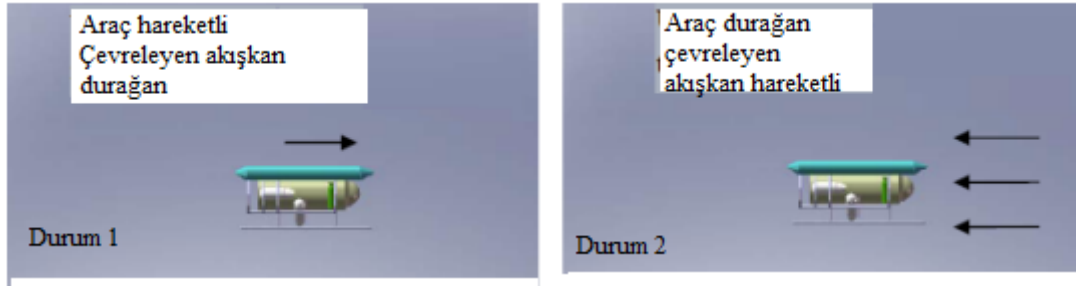
- Su altı aracının basitleştirilmiş 3D modelinin ve hidrodinamik analiz için su tankının oluşturulması,
- Su tankını ve su altı aracını sonlu eleman yöntemi (SEY) ile hesaplamalar için ağ yapısının oluşturulması,
- (SEY) ile hesaplamalar için sınır ve durma koşullarının belirlenmesi,
- Yinelemeli (SEY) ile hesaplamaların, uygunluğa ulaşana kadar gerçekleştirilmesi,
- (SEY) verilerinin işlenerek ilgili hidrodinamik parametrelerin elde edilmesi.

HAD analizi için ilk adım, kapalı yüzey 3D su altı araç modelini basitleştirmektir. Şekil 5.3'te gösterildiği gibi, RedFin OSA karmaşık bir şekle sahiptir. Örneğin, pervaneler, kamera, batarya grubu ve taşıma tutacağı gibi parçalar, HAD sönümlleme analizinde ihmal edilmiştir. Genellikle, sönümlleme analizi için geometrik detaylar kaldırılır, aksi takdirde, ağ ve hesaplama işlemleri için daha fazla zorluk oluşturabilirler. Özellikle, keskin köşeler, sınır tabakasının ağ kalitesini önemli ölçüde etkileyebilir ve bu da sönümlleme analizi doğruluğu için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle RedFin OSA modeli, analizlerden önce fazlalıklardan arındırılmıştır.



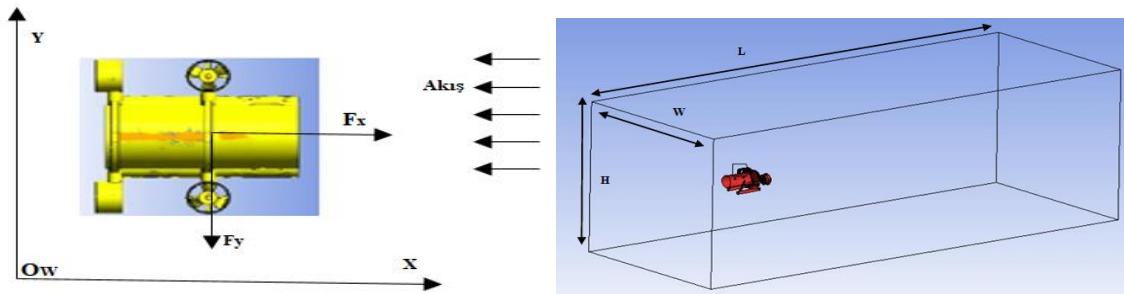
Şekil 5.3. Su altı aracı RedFin'in basitleştirilmiş 3D CAD modeli

Gerçek problemde, akışkan sabit dururken araç belirli bir hızla hareket eder. HAD problem modelinde, araç sabit iken etrafındaki akışkan hareket halindedir (Şekil 5.4). Sürüklenme kuvveti sadece araç ile akışkan arasındaki bağıl harekete bağlı olduğundan, iki durumdan da elde edilen sonuç aynıdır. Aracı statik tutmanın avantajı, bilgisayar simülasyonu için sınır koşullarının daha kolay ayarlanabilmesidir. Öte yandan, aracı hareket ettirmek daha fazla ağ oluşturur ve bu nedenle ele alınması daha karmaşıktır.



Şekil 5.4. Fiziksel model ve bilgisayar HAD analiz modeli kullanımı

HAD ile analizlerde, OSA hesaplama alanı içerisinde sabit durmakta, akışkan akışı olmaktadır (Şekil 5.5). Hesaplamalı akış alanının uzunluğu 14 L (6 m) olarak ayarlanmış, genişliği 10 W (2.5 m) olarak ayarlanmış ve yüksekliği 8 H (2 m) olarak ayarlanmıştır.

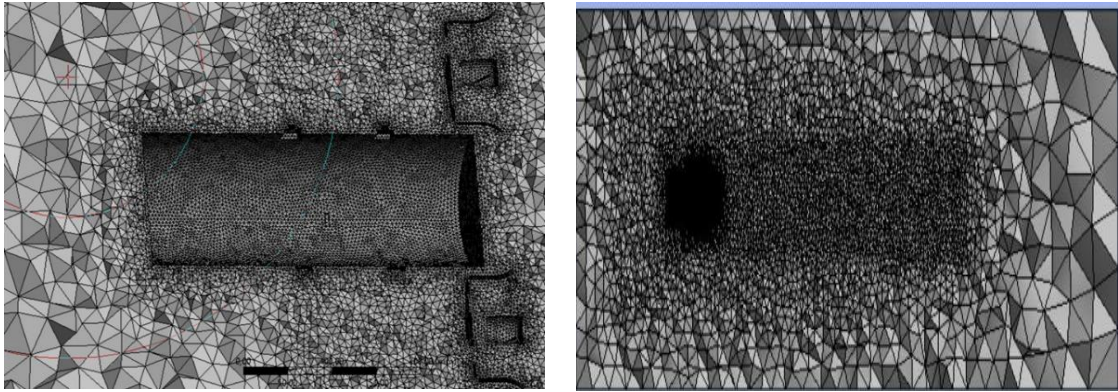


Şekil 5.5. Çekme testi analizi için tasarlanmış hesaplamalı akış alanı

RedFin OSA için akışkan hesaplama alanına 0'dan-1,5 m/s ye kadar değişen hızlarla x, y, z eksenlerinde giriş yapmaktadır. 3 serbestlik derecesi için 4 farklı akış hızında toplam 12 adet hidrodinamik analiz yapılmış ve sönümlleme kuvvetleri hesaplatılmıştır.

Ağ yapısı, analiz öncesi en kritik aşamalardan birisidir. Ağ yapısındaki hücrelerin boyutunun küçülmesi hesaplama hassasiyetini artırırken, hesaplama yükünü artırarak simülasyonların süresini çok fazla uzatabilmektedir. Uygun boyuttaki hücresel ağın belirlenmesi bir optimizasyon problemidir. Bu çalışma için 3 tip ağ yapısı (Gevşek-Orta-

Yoğun) başlangıç aşamasında oluşturulmuş ve yapılan analizlerin sonuçlarına göre orta boyuttaki ağ yapısının en uygun olduğuna karar verilmiştir. Ağ yapısı oluşturulurken “tetrahedrons” ağ yapısı seçilmiş ve akış hacmi için 2 adet bölgesel inceltme, 1 adet de aracın ve pervanelerin yüzeylerine yüzey inceltme metodu kullanılmıştır. Şekil 5.6’da, orta boyuttaki ağ yapısının görselleri verilmektedir; Orta boyut için “skewness” değeri en yüksek 0.84 olarak belirlenmiştir.”Aspect Ratio” değeri ise en yüksek 11,26 olarak belirlenmiştir. Ortalama;1,82 ve en düşük 1,15’dir.



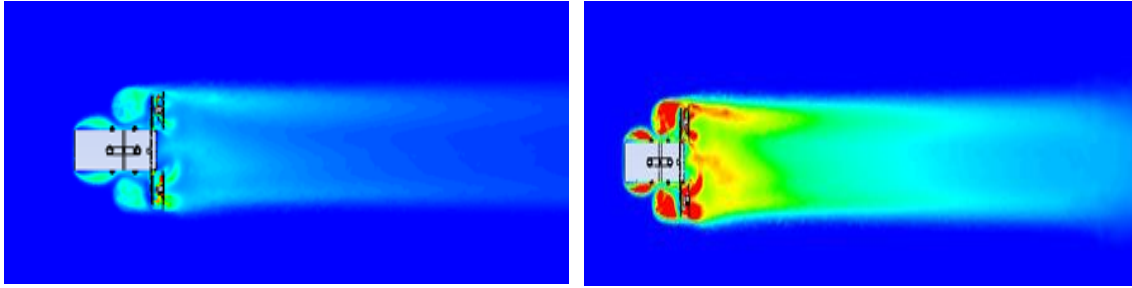
Şekil 5.6. Araç gövdesi ve hesaplama alanı için orta ağ yapısı

Sınır koşullarını belirlemek, sönümlleme analizi için esastır. RedFin OSA için, türbülans modeli olarak  $k - \omega$  denklemleri seçilmiştir. Bu denklemler, sınır tabakasındaki laminar akıştan türbülansa geçişi temsil eder (Eng vd., 2014). Ardından, su tankı sınırı mümkün olduğunca alan kısıtlamalarını azaltan serbest kayma duvarı olarak seçilmiştir. Ayrıca, RedFin’in batık yüzeyi, PVC malzemeden yapılmıştır ve pürüzlülük parametrelerine sahip bir kayma duvarı olarak kabul edilmiştir. Akış enjeksiyon hızı 0 ila 1,5 m/s arasında değişir ve giriş akış sınırının türbülans şiddet katsayısı % 1 olarak ayarlanmıştır. Çıkış akış sınırı, sabit bir basınç olan 0 Pa olarak yapılandırılmıştır. Aslında, başlangıç koşulları HAD hesaplamasının uygunluğunu etkilemez, ancak uygunluğun hızını etkiler. Sönümlleme hesaplamasını hızlandırmak için, genellikle başlangıç akış hızları, giriş akış sınırındaki hızla eşitlenir. Çözücü durma davranışlarını belirlemek için uygunluk fonksiyonları ve zaman adımı kullanılır. RedFin OSA için uygunluk kriteri  $10^{-4}$  olarak ayarlanmıştır. Farklı doğruluk özellikleri elde etmek için daha karmaşık konfigürasyonlar referanslarda bulunabilir (Eng vd., 2014). Özetle, ANSYS-FLUENT’te kullanılan konfigürasyonlar veya parametreler Tablo 5.5’te sunulmuştur.

Tablo 5.5. HAD analizleri için ANSYS-FLUENT parametreleri

| Parametreler     | ANSYS-FLUENT ayar değeri                 |
|------------------|------------------------------------------|
| Hesaplama alanı  | 6 m x 2,5 m x 2 m                        |
| Akışkan          | Su (kararlı)                             |
| Yoğunluk         | $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$            |
| Viskozite        | $1,56 \times 10^{-6} \text{ kg / (s.m)}$ |
| Türbülans modeli | $k - \omega$                             |
| Ağ yapısı        | 256766 eleman (orta boyutlu)             |
| Yakınsama        | $10^{-4}$                                |

ANSYS-FLUENT analizinin son işlem aşaması, HAD verilerinin analiz edilmesi ve istenilen bilgilerin üretilmesidir. Bu bilgiler, sönümlleme kuvvetleri ve momentler, hızlar ve basınçlar vb. Şekil 5.7’de, OSA’nın etrafındaki akış hızlarını gösteren akış çizgisi görünümünü verilmektedir.



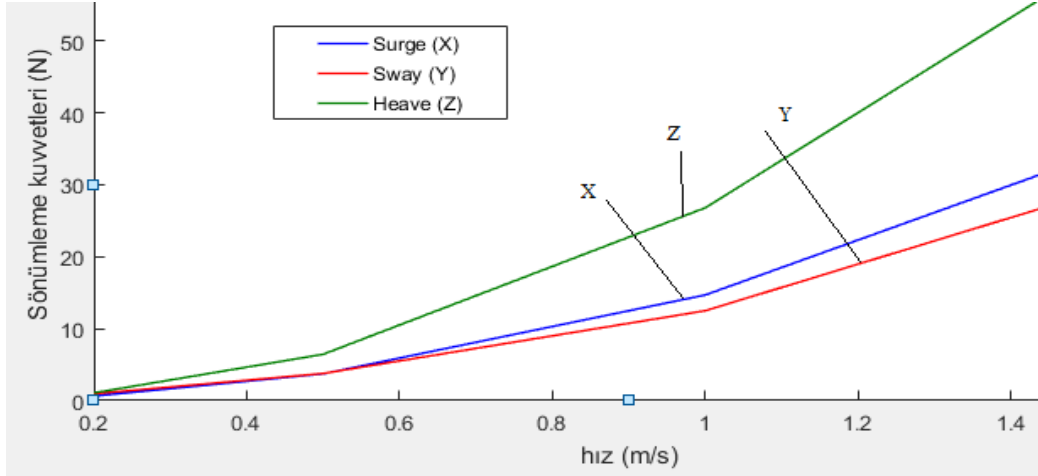
Şekil 5.7. ANSYS-FLUENT sönümlleme analizi için akış hızı çizgileri (surge:0,2m/s ve 0,4m/s)

Sönümlleme matrisini tanımlamak için ANSYS-FLUENT ile yapılan akış analizlerinden; surge, sway ve heave serbestlikleri için hesaplanan sönümlleme kuvvetleri, farklı akış hızları için Tablo 5. 6’da görülebilir.

Tablo 5.6. RedFin OSA için farklı akış hızlarında hesaplanan sönümlleme kuvvetleri

| Akış yönü | 0,2 m/s | 0,5 m/s | 1 m/s  | 1,5 m/s |
|-----------|---------|---------|--------|---------|
| Surge (N) | 0,631   | 3,732   | 14,687 | 33,775  |
| Sway (N)  | 0,953   | 3,778   | 12,497 | 28,684  |
| Heave (N) | 1,081   | 6,445   | 26,801 | 59,864  |

Üç serbestlik için farklı akış hızlarında yapılan akış analizlerinden hesaplanan sönümlleme kuvvetlerinin değişimleri Şekil 5.8’de görülmektedir.



Şekil 5.8. HAD analizlerinden hesaplanan sönümleme kuvvetlerinin hıza bağlı değişimleri

Şekil 5.8'deki akış hızı-sönümleme kuvvetleri eğrilerine, ikinci dereceden eğri uydurma uygulanarak elde edilen polinomlar Tablo 5.7'de görülmektedir. Bu polinomların katsayıları sönümleme matrisinin ilgili serbestlik derecesindeki değerleridir. Polinomda karesel değişkenin katsayısı, karesel sönümleme katsayılarıdır. Birinci dereceden değişkenin katsayıları ise lineer sönümleme katsayılarına karşılık gelir. Görüleceği üzere karesel sönümleme katsayıları, lineer sönümleme katsayılarına oranla çok daha yüksek değerlere sahiptir. Bu ise daha önce de belirtildiği üzere beklenen bir durumdur.

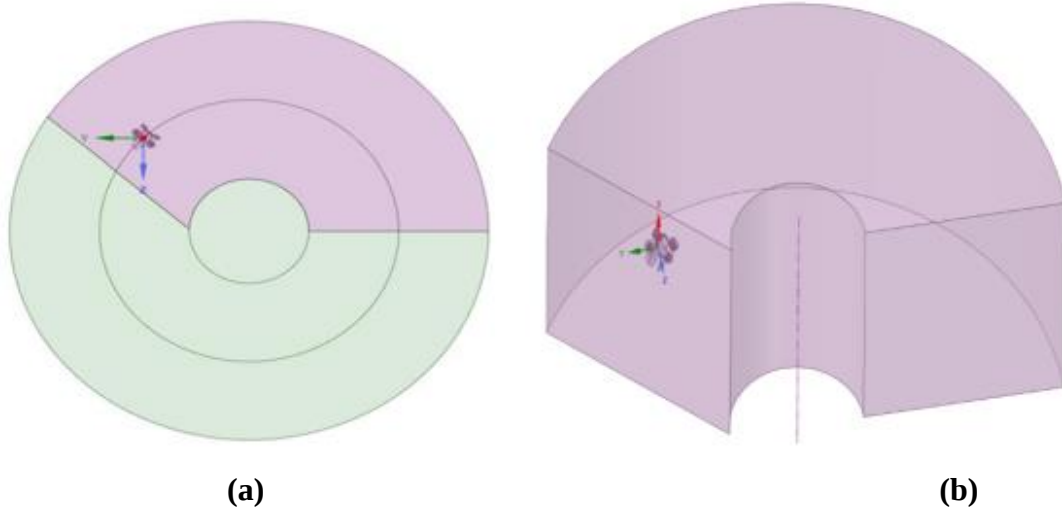
Tablo 5.7. HAD analiz sonuçlarına eğri uydurma sonucu elde edilen polinomlar

| Akış yönü | İkinci dereceden, hıza bağlı sönüm kuvveti fonksiyonları |
|-----------|----------------------------------------------------------|
| Surge (N) | $15,7u^2 - 1,17u + 0,294$                                |
| Sway (N)  | $13,3v^2 - 1,38v + 0,846$                                |
| Heave (N) | $26,5w^2 + 0,308w - 0,134$                               |

### 5.3.3. Dönme Hareketi (Yaw) için Sönümleme Analizi

Su altı aracının dönen kol test analizinin amacı, dönmeye bağlı hidrodinamik katsayı  $N_{|r|_r}$ 'nin değerini tahmin etmektir. Şekil 5.9.a, dönen kol testinin şematik gösterimini sunmaktadır. Su altı aracının dönme hareketi, sabit bir açısal hız ve değişken bir yarıçap R ile gerçekleştirilir. Şekil 5.9.b, dönen kol testi analizinin hesaplamalı akışkan alanını göstermektedir. Hesaplamalı alanın yarıçapı R'dir. Bu tezde, viskoz bir akışkan ortamda dönen bir kanatın uzatılması için akışkanın oluşturduğu dönme deseninin nasıl

kullanılabileceği deneysel olarak gösterilmiştir. Analizler, kanat şeklinin akışkan akışını ve dolayısıyla oluşan dönme momentini nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.9. (a) Dönen kol testi şematik gösterimi (b) Dönen kol testi hesaplama alanı

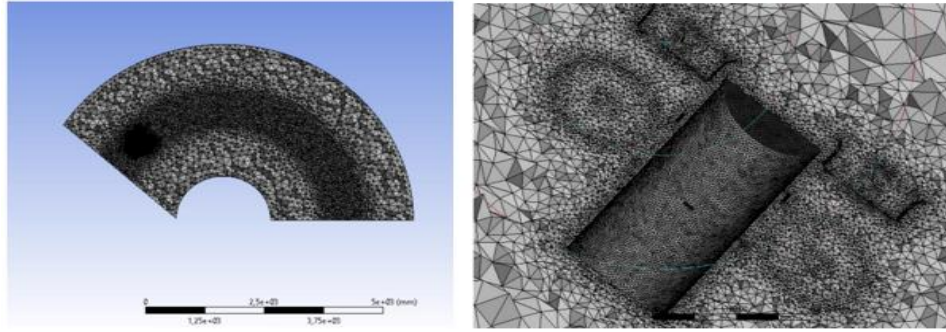
Şekil 5.9’da, morla gösterilen alan akış hacmini temsil etmektedir. En dış çemberin çapı, 8 metre, Orta çemberin 5 metre ve en içteki çemberin çapı ise 2 metre olarak belirlenmiştir. Araç, vektörel olarak X ve Y vektörlerinin bileşkesi olarak belirlenen yönde hareket etmektedir. Bu durumda her bir açısal hız değerinden doğrusal hızları elde etmek için  $\omega = V/R$  denkleminden yararlanılmaktadır. Bu durumda doğrusal hız vektörü (V) elde edilmiştir. Burada R, 2.50 metre olarak alınmıştır. Her bir açısal hız değeri için bulunan doğrusal hız değerleri Tablo 5.8’de görülmektedir. Burada aracın önündeki yüzey, ”Velocity-Inlet” sınır koşulunu, alt ve üst yüzeylerle yan yüzeyler duvar (kaymama) sınır koşulunu, arka yüzey ise ”Pressure-Outlet” sınır koşulunu temsil etmektedir. Aracın pervaneler dışında kalan yüzeyi kaymama koşulu altında duvar sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Bu noktada, sadece arkadaki iki pervane çalışır durumda olup, her bir pervanenin dönüş hızları da dönüşüm formülü sonucu her bir açısal hız için bulunan doğrusal hız değerine göre ayarlanmıştır. Burada 0.2 m/s yatay harekette pervanelerin 500 RPM dönüş hızından doğrusal artış kabul edilerek, hızlar belirlenmiştir.

Sapma (yaw) serbestliği HAD modeli ağ yapısı için 2 milyon ”tetrahedrons” hücre tipi kullanılarak, 2 gövde ağ yapısı inceltme ve 1 adet de yüzey ağ yapısı inceltme yöntemi uygulanmıştır. Gövde ağ yapısı inceltme için sırasıyla 120 ve 50 mm kullanılmıştır.

Aracın yüzeyinde ise 4 mm'lik bir inceltme uygulanmıştır. İlgili görseller ve kalite değerleri şekil 5.10'da görülmektedir.

Tablo 5.8. Motor pervane hızlarının Yaw serbestlik derecesi CFD modeli için belirlenmesi

| Hız        | Doğrusal Hız | Aracın dönüş yarıçapı | Pervanelerin Dönüş hızı |
|------------|--------------|-----------------------|-------------------------|
| 0,2 rad/sn | 0,5 m/sn     | 2,50 m                | 1241 RPM                |
| 0,4 rad/sn | 1 m/sn       | 2,50 m                | 2492 RPM                |
| 0,6 rad/sn | 1,5 m/sn     | 2,50 m                | 3743 RPM                |



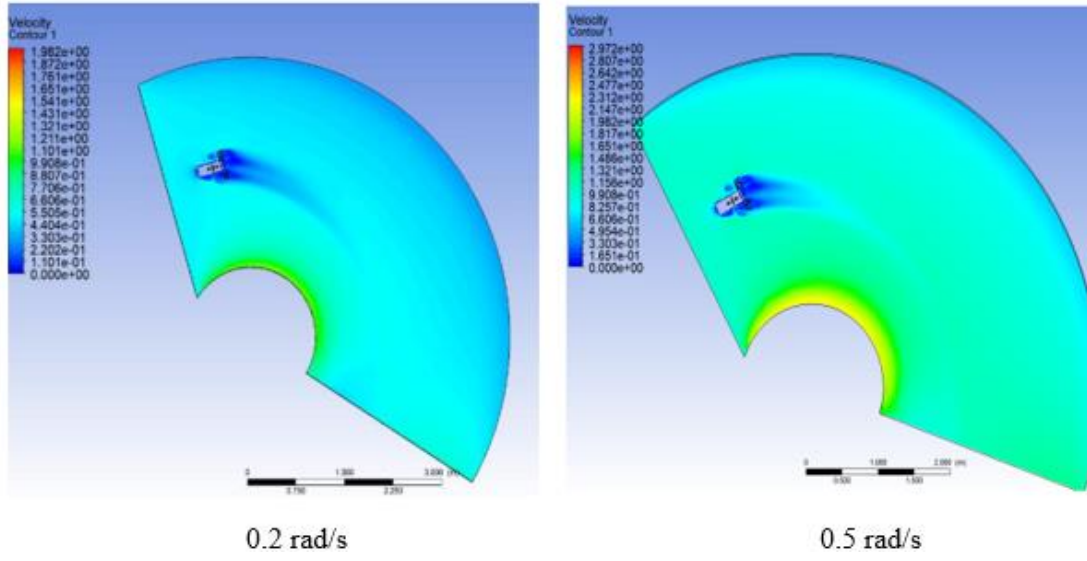
Şekil 5.10. Sapma serbestliği HAD modeli çalışma uzayı ve araç gövdesi ağ yapısı

Elde edilen sonuçlara göre, aracın ön kısmındaki basınç alanı dönmenin etkisiyle bazı bölgelere etki etmemektedir. Arka sağ pervane, bu durum, önden bakıldığında aracın sol tarafında daha yüksek bir basınç alanı oluşturduğundan, sağ tarafına doğru bir direnç kuvveti meydana getirmektedir. Bu direnç kuvvetleri, belirli açısal hızlar için aşağıda (Şekil 5.11) verilmiştir. Ek olarak su altı aracı üzerinde akış ayrılmalarının yaşandığı bölgelerde türbülans kinetik enerjisinin de yoğunlaştığı görülmektedir.

Su altı aracının dönen kol testi analizinin sayısal sonuçları Tablo 5.9' da gösterilmiştir. Bunlar, yarıçaplara bağlı olarak değişen moment değerleri ilişkisidir. Şekil 5.12'de gösterildiği gibi, uydurulan eğrinin katsayıları, hidrodinamik katsayı  $N_{|r|_r}$ 'nin ve  $N_r$ 'nin değeridir.

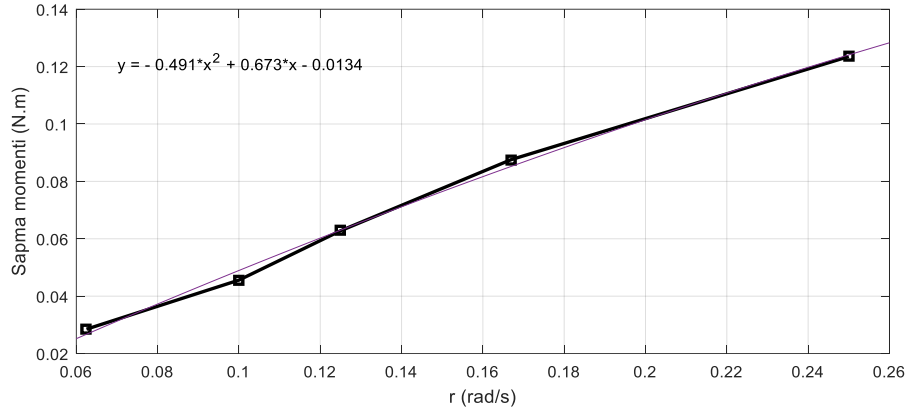
Tablo 5.9. Su altı aracı modelinin dönen kol testi analizinin sayısal sonuçları

| <b>R (m)</b>        | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>8</b> |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Moment (N.m)</b> | 0.1235   | 0.0876   | 0.0628   | 0.0456   | 0.0285   |



Şekil 5.11. Sapma serbestlik derecesi HAD modeli ve hız değişimleri

Şekil 5.12’den görüleceği üzere,  $N_r = 0.673 \text{ N.m.s/rad}$ ,  $N_{|r|r} = 0.491 \text{ N.m.s}^2/\text{rad}^2$  dir.



Şekil 5.12. Dönen kol test analizinde açısal hızlara bağlı olarak momentin değişimi

#### 5.4. Model Doğrulama Çalışmaları

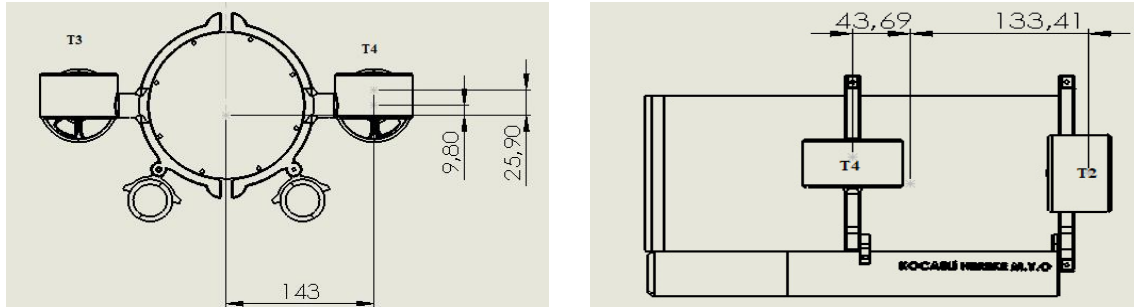
Sayısal analizler sonucu elde edilen dinamik modeli ve hidrodinamik parametreleri değerlendirmek amacıyla, açık döngü RedFin ile lineer ve dönme hareket karakteristikleri ile ilgili gerçek dünyada havuz deneyleri yapılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, sayısal hesaplamalar ve simülasyonlar, gerçek hidrodinamik testler ile karşılaştırıldığında yetersizdir. Sayısal modelin (hesaplamalı hidrodinamik yaklaşımların) etkinliğini doğrulamak için deneysel bir karşılaştırma, daha sağlıklı kontrolör tasarlayabilmek için gereklidir. Bu bölümün ana konusu, sayısal tahminleri doğrulamak yani RedFin’in ek

kütle ve sönümlenme etkilerini surge, sway, heave ve yaw yönlendirmelerinde doğrulamaktır.

Deneyisel sonuçlar, modelleme doğruluğunun tam olarak sağlanabilmesi için yeterli olmayabilir. Bu nedenle, dinamik ve hidrodinamik parametrelerin sayısal tahminlerini kullanarak modelin dinamik davranışını ve belirsizlik sınırlarını yaklaşık tahmin etmeyi amaçlıyoruz. Hedefimiz, pahalı ekipmanlara ihtiyaç duymadan hidrodinamik deneyleri simüle edebilecek bir yöntem geliştirmek ve modelleme doğruluğunu artırmaktır.

#### 5.4.1. İtici Sistemi Ölçümleri

Bu bölümde, RedFin'in itici sistemi açıklanarak kuvvet ve tork değerleriyle ilgili yapılan deneyisel ölçümlerden bahsedilecektir. Su altı aracı RedFin 4 iticiye sahiptir. Şekil 5.13'ten görüleceği üzere, bunlardan iki tanesi dalgalanma (surge) serbestliği yönünde itki sağlayacak şekilde aracın arkasında açısız olarak yerleştirilmiştir. Diğer iki itici ise araç gövdesini ortalayacak şekilde yanlarda dikey olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 5.13. İtici sisteminin mekanik ve elektriksel bağlantı şemaları

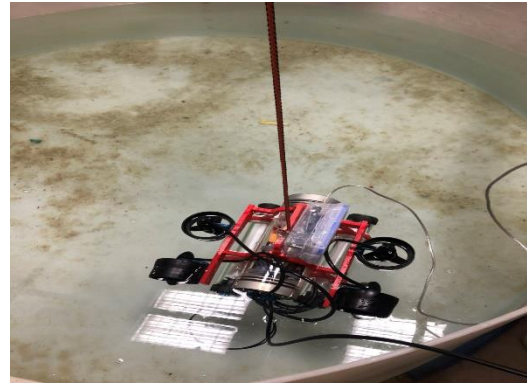
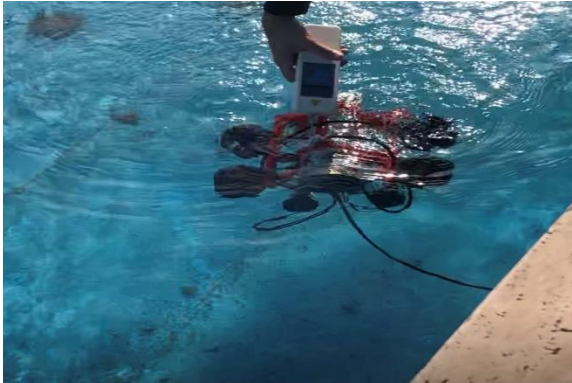
İki yatay itici aynı anda OSA gövdesine itki sağlayan kuvvet ve tork vektörleri oluşturur. Bu da dalgalanma (surge) ve sapma (yaw) yönlerinde harekete neden olur. RedFin'in iki dikey iticisi sadece aynı yönde dönebilir, bu da yükselme-batma (heave) hareketini kontrol etmek için kullanılır. Dikey iticilerin güç ve kontrol sinyali birbirine bağlı olarak tasarlandı, bu da RedFin'in yuvarlanma (roll) hareketindeki kontrol yeteneğini sınırlar. RedFin'in iticilerinin yerleşimi yunuslama (pitch) hareketine izin vermemektedir. Bu durumda, güçlü bir restoratif kuvvet aracılığıyla pitch ve roll hareketlerinde kendi denge stabilitesini sağlamak için denge merkezi ve ağırlık merkezini uygun şekilde tasarlamayı ve dağıtmayı gerektirmiştir.

Şekil 5.14'de gösterilmiş olan, Geratech'in (0,05 N doğruluğa sahip) dinamometresi, OSA'nın itme kuvveti ve tork ölçümlerinde kullanıldı. Bu çalışmada, yapılan temel ölçümler şunlardır:

- İki yatay iticinin, ilerleme yönünde (surge) ürettiği itki kuvvetlerinin ölçülmesi,
- İki dikey iticinin batma yönünde (heave) ürettiği itki kuvvetlerinin ölçülmesi,
- İki yatay iticinin, sapma (yaw) yönünde ürettiği momentin ölçülmesi.

RedFin OSA kontrol yazılımında, itki sistemi kontrol sinyali, yani Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) sinyali 1500 ile 1900  $\mu s$  arasında bir aralığa sahiptir. Dinamometre tarafından kesin olarak ölçülemeyecek kadar küçük olan itme kuvveti, 1500 ile 1600  $\mu s$  arasında değişen (PWM sinyali) değerlere sahiptir. Bu nedenle, PWM sinyal aralığı 1600-1900  $\mu s$  aralığında seçilmiştir.

İlk olarak, ölçümler sırasında denge durumunu koruyan RedFin'in dikey motorlarının farklı PWM değerlerinde çalıştırılması durumlarında ürettikleri itki kuvvetleri ölçüldü.



Şekil 5.14. Kuvvet ölçümlerinde kullanılan dinamometre ve dikey iticilerin itki kuvvetlerinin ölçümü

Farklı PWM değerleriyle çalıştırmalar sırasında dikey ve yatay motorların araca sağladıkları itki kuvvetleri Tablo 5.10 ve 5.11'de görülmektedir.

Tablo 5.10. İki dikey motorun batma (heave) yönünde ürettikleri itki kuvvetleri

| PWM        | 1650 | 1700 | 1750 | 1800 | 1850 | 1900 |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| Kuvvet (N) | 1,5  | 2,9  | 4,8  | 7,6  | 8,0  | 9,8  |

Tablo 5.11. İki yatay motorun ilerleme (surge) yönünde ürettikleri itki kuvvetleri

| PWM        | 1650 | 1700 | 1750 | 1800 | 1850 | 1900 |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| Kuvvet (N) | 2,3  | 3,4  | 5,2  | 6,0  | 7,2  | 7,8  |

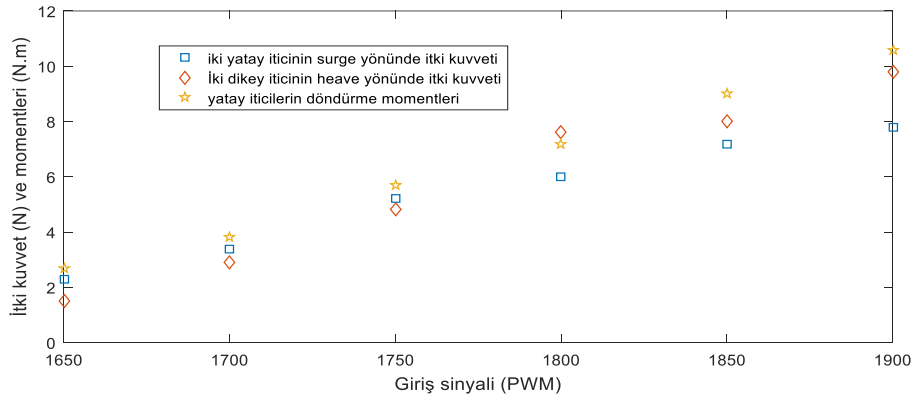
Aracın yatay iticilerinin farklı PWM’lerde çalıştırılması sonucu kendi etrafında dönmesi sırasında ölçülen moment değerleri Tablo 5.12’de görülmektedir.

Tablo 5.12. İki yatay motorun sapma (yaw) yönünde ürettikleri dönme momentleri

| PWM          | 1650 | 1700 | 1750 | 1800 | 1850 | 1900 |
|--------------|------|------|------|------|------|------|
| Moment (N.m) | 2,7  | 3,8  | 5,7  | 7,2  | 9,0  | 10,6 |

Aracın yana kaymasını (sway) sağlayan itki kuvveti olmadığından bu yönde kuvvet ölçümü yapılmamıştır. Fakat dönme hareketleri sırasında bir miktar kayma olacağı düşünülmektedir. Bu kaymanın kontrolü dolaylı olarak gerçekleştirilecektir.

Üç serbestlik için itici sisteme uygulanan giriş PWM sinyallerine bağlı üretilen itki kuvvetleri ve döndürme momentinin değişimleri Şekil 5.15’te gösterilmiştir.



Şekil 5.15. RedFin OSA'nın itki kuvvetleri ve torklarının ölçüm sonuçları

Şekil 5.15'ten açıkça görülmektedir ki PWM sinyali, OSA deneysel itme kuvvetleri ve torkları ile yaklaşık olarak lineer bir ilişki içindedir. Önceki bir çalışmaya göre (Gao vd., 2018), OSA hareketi, pervanelere enjekte edilen akışkanın hızını etkileyebilir, bu da OSA itki sistemi verimliliğinde bazı düşüşlere neden olabilir. Sonraki bölümlerde güçlü denetleyici tasarımları kullandığımızda, itme kuvvetlerinin ölçüm hataları, istenmeyen belirsizlikler olarak düşünülebilir. Bu nedenle, araştırma için aşağıdaki varsayımları yapmış bulunmaktayız:

- OSA' nın hareketleri sırasında, akışkandan kaynaklı itki verimliliğinde bir azalma olmadığı varsayılmıştır.
- Pervane kanadının saat yönünde ve saat yönünün tersine dönüşü arasındaki itki farkının olmadığı varsayılmıştır.
- Aracın PWM sinyali ile araca etki eden itki kuvveti arasındaki ilişkinin lineer olduğu varsayılmıştır.

#### 5.4.2. Tasarlanan Havuz Deneyleri

Deneyler sırasında, açık çevrim RedFin OSA, havuzda belirli itme değerleri ayarlanarak ileriye doğru, batma yönünde ve kendi etrafında dönme şeklinde hareket ettirildi. Bu deneyler; surge, heave ve yaw serbestlikleri için gerçek hareket kuvvetlerini belirlemek içindi. Daha sonra, OSA hareketleri, havuz tavanının ve yanlarında bulunan çeşitli kameralar tarafından anlık olarak yakalandı. OSA hareket videosu, her video karesinin analizi sırasında hidrodinamik özellikleri türetebilmektedir. Son olarak, deneysel hidrodinamik sonuçlar (ek kütle ve sönümlendirme katsayıları) Bölüm 4'te hesaplanan sayısal RedFin modeli ile karşılaştırılacaktır.

Deneysel ölçümlerin yapıldığı havuzun boyutları  $4 \text{ m} \times (\text{uzunluk}) \times 3 \text{ m} \times (\text{genişlik}) \times 2 \text{ m} \times (\text{yükseklik})$  'dir. Havuz tavanına yerleştirilen (1920 x 1080) görüntü çözünürlüğüne, 100 ms gecikmeye sahip bir kamera, OSA'nın ilerleme ve dönme yönlendirmelerindeki hareketini yakalamak için kullanılmıştır. Aynı zamanda, OSA'nın batma hareketini yakalamak için havuz duvarına bir kamera yerleştirilmiştir. İleriye doğru hareket için, RedFin OSA sabit bir itki kuvveti kullanılarak havuzun bir ucundan diğerine hareket ettirildi. Batma (heave) hareketi için, RedFin OSA sabit dikey itki kuvveti kullanılarak havuzun yüzeyinden dibine doğru hareket ettirildi. Sapma (yaw) hareketi için, RedFin sabit bir itki momentiyle döndürüldü ve belirli bir açısal hıza ulaşana kadar ivmelendirildi.

OSA'nın sönümlendirme kuvvetleri veya torkları, ilgili serbestlik için ulaşılmış olduğu lineer veya açısal hızların fonksiyonudur. Daha sonra, deneysel sonuçlar, 5.3.2'de HAD ile hesaplanan sönümlendirme ve hız ilişkisi ile karşılaştırılmıştır. Belirsizlikleri ve dış etkileri göz ardı edersek, OSA'nın ek kütle kuvveti veya torku sadece ivmelenme sürecinde etkindir. Sabit hızdaki bir OSA için ek kütle sıfır olur (ivme sıfır olduğu için) ve temel

hidrodinamik etki yalnızca sönümlenme kuvvetini veya torkunu etkiler. RedFin OSA, deneyler sırasında birçok sabit itki kuvveti ve torku ile hareket ettirildiğinden, OSA ivmelenerek sonunda denge durumu hızına ulaşmaktadır. Yani sönümlenme kuvveti veya torku itki kuvveti veya torkuyla eşit olmaktadır. İşte bu itki kuvvetleri veya torklar, önceki bölümde anlatılan itme ölçümlerinden bilinmektedir. Ek olarak, hareket videosu, her itki konfigürasyonuna karşılık gelen hızları ve açısal hızları sağlamaktadır. Uygulamada, hız veya açısal hız, her video karesindeki OSA konumu veya açısından türetilmiştir.

#### 5.4.3. Deneysel Çalışmaların Sonuçları ve Analizi

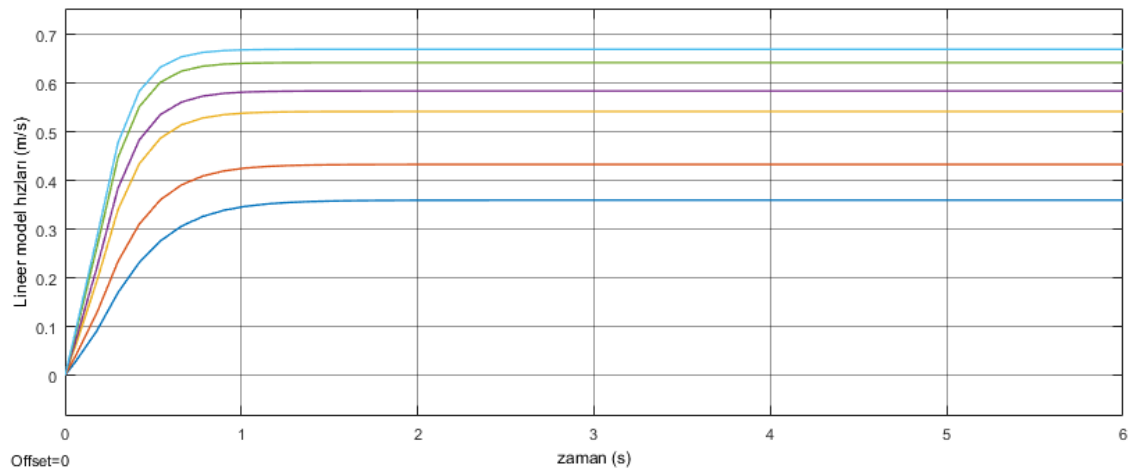
Önceki bölümlerde tasarlanan deneylerden elde edilen ölçümlerin, model doğrulama amacıyla sayısal hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması için iki durumu açıklığa kavuşturmak gerekmektedir. Bunlardan ilki, deneylerin yapıldığı havuz, OSA'nın denge koşuluna ulaşması, yani ulaştığı sabit hıza ivmelenmesi için yeterince geniş olup olmadığı, ikincisi de OSA'nın yakalanan video karelerinden en son yakınsama hızının nasıl ölçülebileceğidir. Öncelikle, RedFin OSA'nın Denklem 5.20'deki lineer dinamik denklemine sahip olduğumuzu varsayalım. Burada,  $D_L$  bilinmeyen lineer sönümlenme vektörü (katsayıları),  $\tau_m$  itki kuvveti veya tork vektörü,  $x$  RedFin'in konum ve açı vektörü, ve  $M_{RB}$  ile  $M_A$  bölüm 3'te tanımlanan katı gövde kütle atalet matrisi ve ek kütle matrisidir.

$$(M_{RB} + M_A)\ddot{x} + D_L\dot{x} = \tau_m \quad (5.20)$$

Yalnızca ilerleme yönündeki hareket (surge) düşünüldüğünde, başlangıç koşulları ile 4 gerekli varsayım şu şekilde açıklanabilir: RedFin OSA'nın  $M_{RB}$  katı gövde kütle değeri, ilerleme (surge) için 4,21 kg'dır. RedFin'in  $M_A$  ek kütle değeri, ilerleme için Bölüm 3'te analitik hesaplamalardan 1,208 kg olarak hesaplanmıştır. Başlangıçta OSA'nın bütün yönlendirmelerindeki lineer hızları 0 m/s'dir (surge sway, heave). Deneyler sırasında dikkate alınan tek hız, ilerleme hareketi ile ilgilidir. Başlangıç pozisyonu 0 m'dir.

Bu modelleme bilgilerinin bir sonucu olarak,  $D_L$  lineer sönümlenme katsayısı, havuzda OSA'nın başlangıç ve bitiş anındaki hareket anları video görüntülerinden bilindiği için hesaplanabilir. Deneyde kat edilen mesafe, havuz uzunluğuna eşittir (4m - OSA boyutu 0,4m). Bu bilgiler ışığında, ilerleme hareketi lineer dinamiklerle yaklaşıldığında, kararlı

durum hızının tahminine dair bilgiyi sağlayabilir ve ileri çalışmalar için bir kestirim olarak kullanılabilir. Şekil 5.16'da, görülen hız değerleri, ilerleme hareketi için Denklem 5.20 kullanılarak itki kuvvetlerinin ölçümleri sırasında alınan kamera görüntülerinden yaklaşık olarak elde edilmişlerdir. Hız değerlerine, yol/zaman formülü ile ulaşılmıştır. Şekil 5.16'ya göre, RedFin OSA tüm olası ilerleme itki değerlerinde yaklaşık 5 saniye içinde kararlı hızlara (veya denge hızlarına) ulaşabileceği gösterilmiştir. Bu da, OSA'nın sabit bir hıza ulaşması için havuzun yeterince büyük olduğunu ve ortalama hızın belirli bir süre sonra ölçülebileceğini göstermektedir.



Şekil 5.16 Sabit itki kuvvetleri için hızların yakınsaması (Dalgalanma)

Benzer sonuçlar batma (heave) ve sapma (yaw) hareketleri için de çıkarılabilir. Kararlı durum hızları, videoya dayalı olarak sönümleme kuvvetleri ve torkları ile ilgili olarak tahmin edilmiştir. Denklem (5.20) hız yaklaşımı, batma hareketi için yakınsama hızını belirlemek için kullanılmıştır.

RedFin OSA ile yapılan havuz deneylerinden, ilerleme, batma ve sapma için sönümleme kuvveti ve hız ilişkilerini temsil eden 6 ayrı veri grubu elde edildi. Ayrıca, hidrodinamik özellikleri karşılaştırmak için 3 tane ikinci dereceden polinom yaklaşım eğrisi elde edildi.

İlerleme (surge) hareketi için deneysel sönümleme ve hız ilişkisi Tablo 5.13'te verilmiştir ve bu, ANSYS-FLUENT hesaplamaları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta ise ileriye yönelik sağlam kontrol tasarımı için bir ortalama nominal modelin önerilmiş olmasıdır.

İlerleme ve batma hareketleri için deneysel sonuçlar sırasıyla Tablo 5.13 ve 14’ te verilmiştir. Bu sonuçların, ANSYS-FLUENT hesaplama sonuçları ile karşılaştırmaları Şekil 5.15’da gösterilmiştir.

Sapma (yaw) hareketine yönelik deneysel sonuçlar Tablo 5.15'te verilmiştir ve bunların ANSYS-FLUENT sonuçları ile karşılaştırması Şekil 5.17'de gösterilmiştir.

Tablo 5.13. Dalgalanma (surge) için 2 yatay itici kullanıldığında ulaşılan hızlar

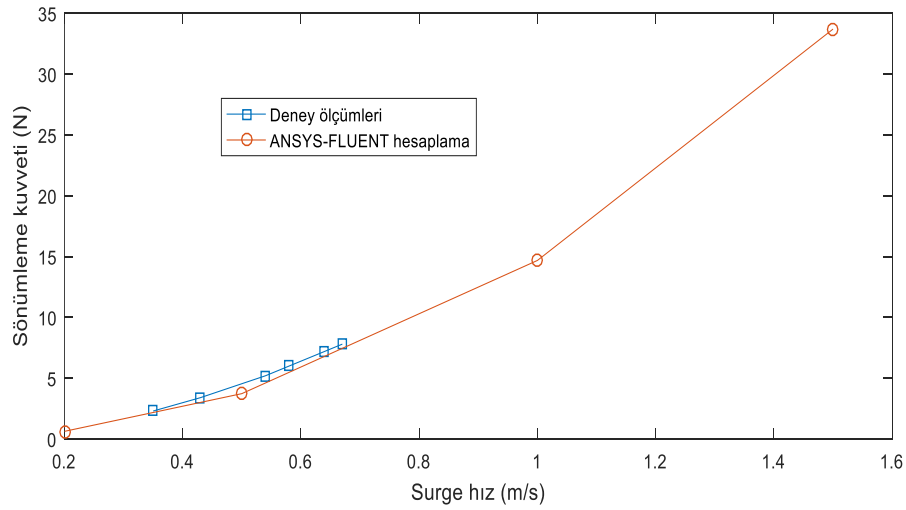
|            |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| Kuvvet (N) | 2,3  | 3,4  | 5,2  | 6,0  | 7,2  | 7,8  |
| Hız (m/s)  | 0,35 | 0,43 | 0,54 | 0,58 | 0,64 | 0,67 |

Tablo 5.14. Batma (heave) için 2 dikey itici kullanıldığında ulaşılan hızlar

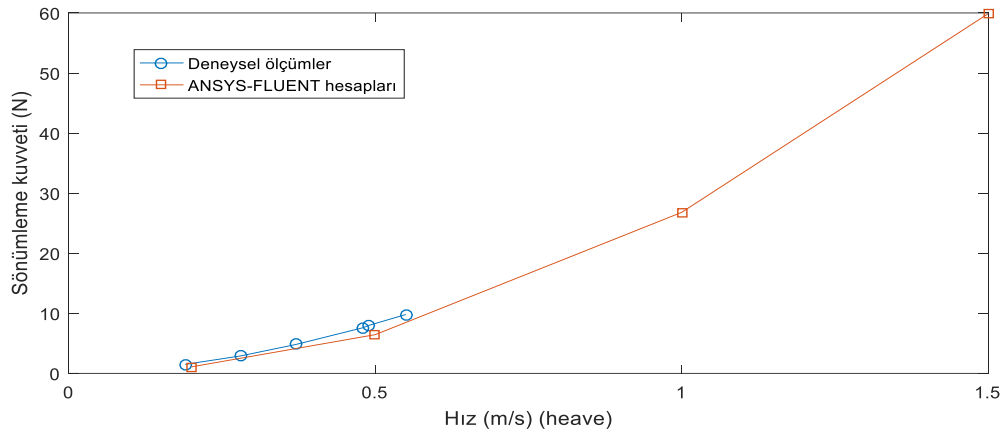
|            |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| Kuvvet (N) | 1,5  | 2,9  | 4,8  | 7,6  | 8,0  | 9,8  |
| Hız (m/s)  | 0,19 | 0,28 | 0,37 | 0,48 | 0,49 | 0,55 |

Tablo 5.15. Sapma (yaw) için 2 yatay itici kullanıldığında ulaşılan hızlar

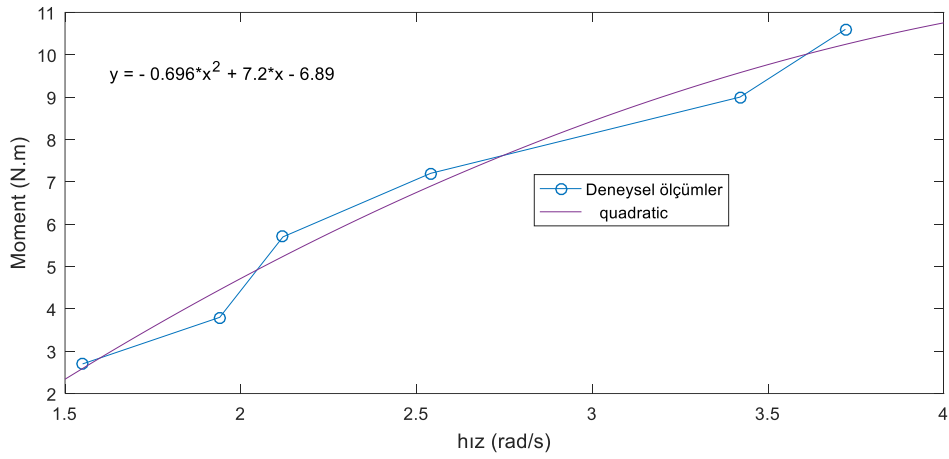
|              |      |      |      |      |      |      |
|--------------|------|------|------|------|------|------|
| Moment (N.m) | 2,7  | 3,8  | 5,7  | 7,2  | 9,0  | 10,6 |
| Hız (rad/s)  | 1,55 | 1,94 | 2,12 | 2,54 | 3,42 | 3,72 |



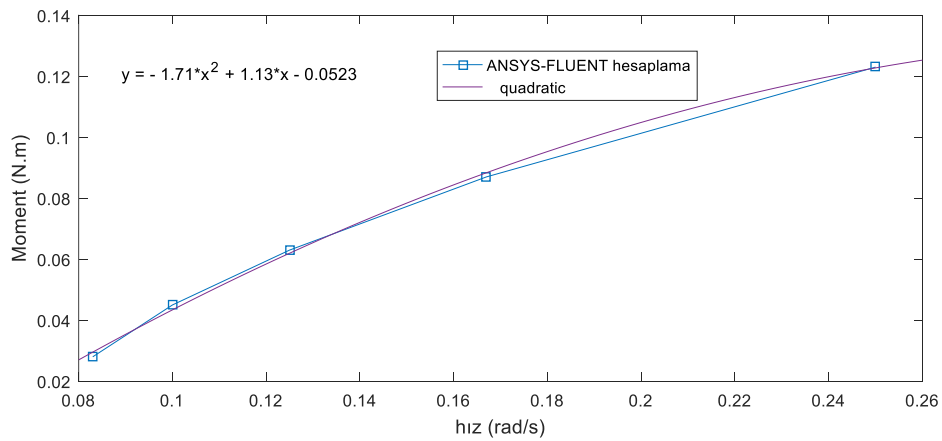
Şekil 5.17. RedFin OSA’nın ilerleme yönündeki sönümlenme ve hız ilişkisinin deneysel ve hesapsal karşılaştırması



Şekil 5.18. RedFin OSA'nın batma yönündeki sönümleme ve hız ilişkisinin deneysel ve hesapsal karşılaştırması



(a)



(b)

Şekil 5.19. RedFin OSA'nın sapma yönündeki sönümleme momenti ve hız ilişkisinin (a) deneysel ve (b) hesapsal karşılaştırması

Tablo 5.16’da, deneysel ölçüm verilerine göre hız-kuvvet/moment ilişkisi eğrilerine, eğri uydurma işlemi sonucu elde edilen polinomlar görülmektedir. Bu polinomların katsayıları, deneysel ölçüm sonucu tanımlanan sönümleme katsayılarıdır.

Tablo 5.16. Eğri uydurma deneysel sonuçları (x: hız m/s veya açısal hız rad/s, y: itki kuvveti veya tork)

|       | HAD analizi                    | Deneysel ölçüm                | Hata (%) |
|-------|--------------------------------|-------------------------------|----------|
| Surge | $y = 15,7x^2 - 1,17x + 0,294$  | $y = 14,2x^2 + 2,8x - 0,422$  | 9,5      |
| Heave | $y = 26,5x^2 - 0,308 - 0,134$  | $y = 26,7x^2 + 3,32x - 0,105$ | 0,75     |
| Yaw   | $y = -0,49x^2 + 0,67x - 0,013$ | $y = -0,69x^2 + 7,2x - 6,89$  | 40,8     |

ANSYS-FLUENT ve deneysel ölçümler arasında, dönme hareketi sönümleme sonuçları için Tablo 5.16’dan görüleceği üzere, önemli bir fark bulunmaktadır. Bununla birlikte, surge ve heave serbestlikleri için deneysel veriler ile karşılaştırıldığında, sayısal model hala geçerlidir ve gerçek deniz testi için sağlam bir kontrolör tasarımı için yeterli olarak kabul edilebilir. Bir sonraki bölümde, sayısal hidrodinamik modele dayalı olarak etkili ve sağlam bir kontrolör tasarlanmıştır. Pratik bakış açısından, dönme hareketinin HAD analizi sonuçları daha ileri hesaplamalar veya benzetimler ile iyileştirilebilir.

Sonuç olarak Tablo 5.17’de; analitik hesaplamalar, HAD analizleri ve Havuz deneyleri sonucunda elde edilen ve RedFin’in basitleştirilmiş dinamik modelinde kullanılan ek kütle ve sönümleme parametreleri gösterilmiştir. İtki azalması ve kablo sürüklenmesi gibi etkiler dikkate alındığında, gerçek OSA hidrodinamik sönümlerinin deneysel sonuçlardan daha küçük olması beklenmektedir. Bu nedenle HAD analizleri ve deneysel sonuçların ortalaması alınarak, gürbüz bir kontrolör tasarımı için ideal bir dinamik model önerilmiştir.

Sayısal modelleme doğruluğunun, özellikle dönme hareketi için çok yüksek olduğu düşünülmendiğinden, su altı aracının hareket kontrolünde Model Öngörülü Kontrol (MÖK) yaklaşımı düşünülmemiştir. Ayrıca, adaptif kontrolde olduğu gibi MÖK’de de her bir adımda kontrol kazançları sistem giriş-çıkışına göre yeniden hesaplanacağından, işlem yükü oldukça fazla olacaktır. MÖK’de, model ile gerçek sistem arasındaki fark arttıkça, sistemin gelecekteki giriş-çıkışlarına ilişkin tahminlerin doğruluğu azalacaktır ve öngörülü kontrolün istenilen performans aralığında çalışması zorlaşacaktır.

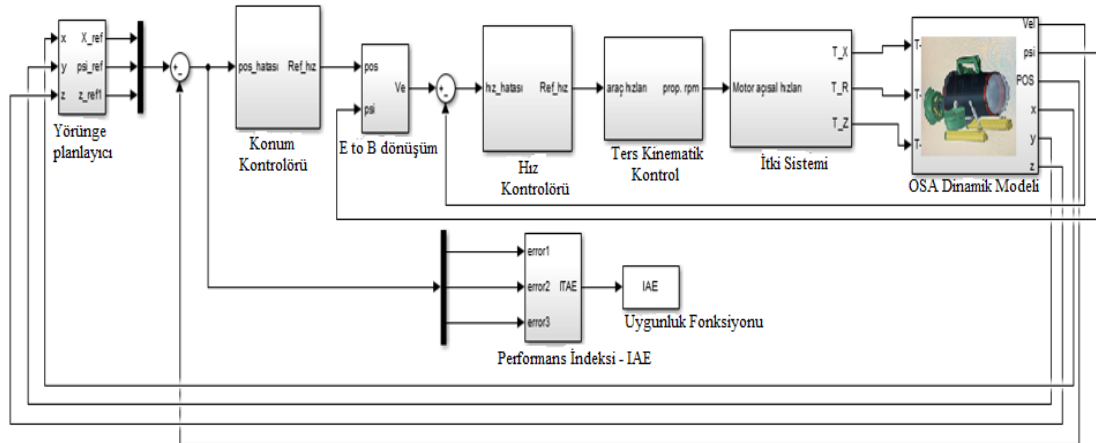
Tablo 5.17. Analitik hesaplamalar, HAD analizleri ve deneysel ölçümlerden elde edilen sadeleştirilmiş dinamik model parametreleri

| Ek kütle/atalet       | Analitik hesaplama | HAD Analizi | Deneysel |
|-----------------------|--------------------|-------------|----------|
| $X_u$                 | 1.208              | -           | 1.10     |
| $Y_v$                 | 2.750              | -           | 2.14     |
| $Z_w$                 | 3.232              | -           | 3.56     |
| $N_r$                 | 0.036              | -           | 0.04     |
| Lineer sönümleme      |                    |             |          |
| $X_u$                 | 0.89               | 1.17        | 2,80     |
| $Y_v$                 | 1.72               | 2.74        | -        |
| $Z_w$                 | 2.13               | 0.308       | 3,32     |
| $N_r$                 | 0.045              | 0.673       | 7,2      |
| İkinci der. sönümleme |                    |             |          |
| $X_{u u }$            | 16.08              | 15.71       | 14.2     |
| $Y_{v v }$            | 22.74              | 13.4        | -        |
| $Z_{w w }$            | 28.58              | 26.54       | 26,7     |
| $N_{r r }$            | 0.14               | 0.49        | 0,69     |

## 6. KONTROL ÇALIŞMALARI

Çalışmanın bu kısmında, su altı aracı RedFin'in bir başlangıç konumundan hedef konuma gitmesi sırasında önceden belirlenmiş bir yörüngeyi takibinin kontrolü amaçlanmaktadır. Bu takip sırasında, aracın ilerleme ve batma yönlerindeki konum ve hız kontrolleri ile yörüngeden sapmaması için rota (heading) açısı ve açısal hızı kontrol edilmek istenmektedir. Kontrol problemi bu şekilde tanımlandıktan sonra, kontrol yöntemine karar verme aşamasına geçilmiştir.

Kontrol sistemi çift kontrol döngülü olarak tasarlanmıştır. İç döngü OSA'nın gövde çerçevesinde tanımlı hızını kontrol etmek içindir. Dış döngü ise Şekil 6.1' de gösterildiği gibi OSA'nın sabit çerçevesinde tanımlı konumunu ve Euler yönelimlerini kontrol etmek içindir. Çift kontrol döngüsünü kullanmanın iki önemli avantajı vardır. Birincisi, daha hızlı kontrol eylemi sağlar ve çevre kaynaklı bozucu etkiler ile mücadele edebilir. İkincisi, kontrol mimarisine, kullanıcı ihtiyacına ve gerekli göreve bağlı olarak OSA'nın konumunu ve hızını bağımsız olarak kontrol edebilme esnekliği sağlar. Tasarım modelde, OSA sistemi, hidrodinamik model bloğu yalnızca bilgisayar benzetim çalışması için kullanılırken, kontrol mimarisinin geri kalanının gerçek OSA sistemini kontrol etmek için elektronik kontrol ünitesinde (EKU) kodlanması ve uygulanması gerekmektedir.



Şekil 6.1 Kontrol sistemi blok diyagramı

Su altı aracı RedFin'in belirli bir yörüngeyi takibi sırasında konum ve hız kontrolü için PID ve Kesir Dereceli PID (KDPID) kontrolörler kullanılmıştır. Kontrol amaçlı benzetim çalışmaları önce klasik PID kontrolör ile daha sonra KDPID ile gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. PID kontrolörün tercih edilmesinin sebebi, basit yapılı ve

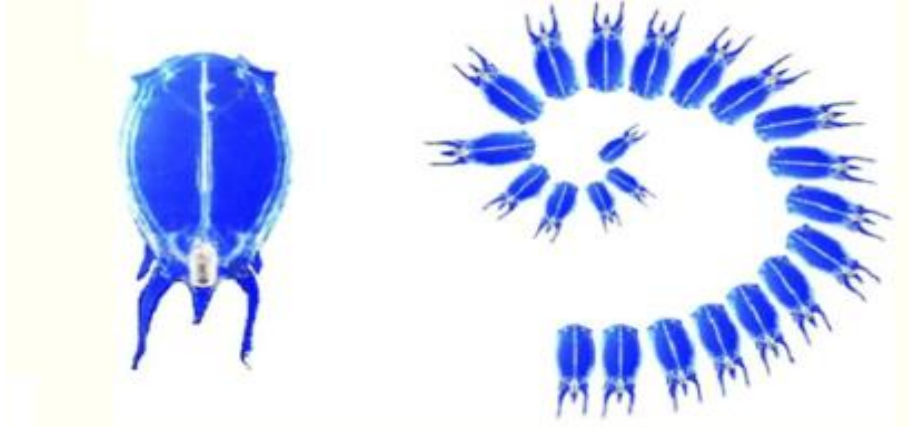
kolay uygulanabilir olmasıdır. OSA dinamik modelinin doğrusal olmayan yapısı, parametre belirsizlikleri gibi nedenlerle, PID ile kontrolden yeterince iyi performans elde edilemediğinden, daha hassas çözüm sunan KDPID ile kontrol denenmiştir. PID ve KDPID kontrolörlerin kazanç parametreleri ayarlanırken, metasezgisel optimizasyon algoritmalarından Salp Sürü Algoritması (SSA) kullanılmıştır. SSA'nın algoritmik yapısının basitliği, arama hızının yüksek oluşu, diğer optimizasyon algoritmalarıyla hibridizasyon kolaylığı ve pek çok mühendislik problemine başarıyla uygulanmış olması (Abualigah vd., 2020, Faris vd., 2020, Qais vd., 2019, Abdelhamed vd., 2022) bu seçimde belirleyici olmuştur. Ayrıca, arama ve kullanım arasındaki dengeden sorumlu tek bir parametreye ( $c_1$ ) sahip olması da bir avantajdır. SSA'nın kontrol başarımını karşılaştırmak amacıyla, parametreleri Genetik Algoritma (GA) ile optimize edilen KDPID kontrolör ile de yörünge takibi benzetim çalışmaları Matlab programı kullanılarak yapılmıştır.

KDPID kontrolörün parametrelerinin, su altı araç modellerinin hareket kontrolü için optimizasyonunda, sezgisel algoritmaların kullanıldığı birkaç uygulama; Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) algoritması (Abbasi vd., 2019), Gri Kurt Optimizasyon (GWO) algoritması (Tolba vd., 2018) ve Balina Optimizasyon (WO) algoritmasıdır (Abusnaina vd., 2018). SSA'nın kullanıldığı uygulamaya literatürde rastlanmadığı için bu sezgisel optimizasyon tekniği tercih edilerek literatüre katkı sunulmak istenmiştir.

### **6.1. Salp Sürü Algoritması (SSA) ve Mevcut Probleme Uygulanması**

Sürü zekâsı merkezi bir kontrol sistemi olmayan, doğal ya da yapay olarak kendi kendini organize eden sistemlerin gösterdiği toplu davranış biçimidir (Faris vd., 2020). Salpler, şeffaf gövdeli omurgalı deniz hayvanlarıdır ve spiral şeklinde zincir sürüler yaparak yiyecek aramaktadırlar (Şekil 6.2).

Salplerin sürü halindeki davranışını örnek alarak bir optimizasyon problemini çözebilen matematiksel model mevcut değildir (Faris vd., 2020). Burada Seyidali Mirjalili tarafından önerilen arama yöntemi ile gerçek dünya problemleri etkili bir şekilde belirli bir zaman içerisinde optimum olarak çözülmektedir (Faris vd., 2020). Salp sürülerinin hareketini matematiksel olarak modellemek için, rastgele başlangıç salp pozisyonları Eşitlik (6.1)'de gösterildiği gibi yapılandırılır (Abusnaina vd., 2018).



Şekil 6.2. Salp deniz canlısı ve salplardan oluşan sürü (Abualigah vd., 2020)

$$K_1^{1:n} = rand(\dots)(ub_j - lb_j) + lb_j, \forall j \in \text{değişkenlerin sayısı} \quad (6.1)$$

Burada;  $K_1^{1:n}$  salpların başlangıç konumlarını gösterir,  $ub_j$  arama uzayının üst sınırını,  $lb_j$  alt sınırı temsil eder. Ayrıca  $rand(\dots)$ , 0 ile 1 arasında rastgele bir sayının üretilmesi için kullanılan matematiksel gösterimdir.

İkinci olarak salp sürüsü mekanizmasının taklit edilebilmesi için bir grup lideri ve takipçilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Sürünün tamamına liderlik eden bir salp bireyi lider, geri kalan salplar ise takipçi olarak kabul edilir. Bu oluşumda lider, birbirini takip eden her hamlesiyle o grubu daha güvenli bir konuma yönlendirmekle sorumludur. Eşitlik (6.2), salp sürüsünde liderin matematiksel olarak çevrilmiş versiyonunu temsil eder; burada  $M$ , hedef gıdayı temsil eder ve  $K$ , her Salp'ın iki boyutlu konumunu temsil eder (Abualigah vd., 2020):

$$K_j^1 = \begin{cases} M_i + c_1((ub_j - lb_j)c_2 + lb_j)c_3 \geq 0 \\ M_i - c_1((ub_j - lb_j)c_2 + lb_j)c_3 < 0 \end{cases} \quad (6.2)$$

$K_j^1$  liderin konumunu,  $M_i$  hedef yiyeceğin  $j$ . boyuttaki konumunu,  $ub_j$   $j$ . boyutun üst sınırını,  $lb_j$   $j$ . boyutun alt sınırını,  $c_1$ ,  $c_2$  ve  $c_3$  rastgele sayılardır. SSA salplardan oluşan uzun bir zinciri temsil eder. Dolayısıyla bu tür bir algoritma yerelleştirilmiş maksimum veya minimum çözümleri atlatabilir. Eşitlik (6.3), önde gelen salpın hedef yiyeceğe doğru hareketini eşitleyerek gıdayı inceleme sürecini temsil eder. Bu, besin kaynaklarının etkili bir şekilde yakalanması için takipçi salplara rehberlik eden SSA'nın önemli parametrelerinden biridir.

$$c_1 = 2e^{-\left(\frac{4l}{L}\right)^2} \quad (6.3)$$

Burada  $l/L$ , mevcut yinelemenin salp sürüsünün amaçlanan maksimum yinelemelerine oranını temsil eder. Ayrıca  $c_2$  ve  $c_3$ 'e 0 ile 1 aralığında rastgele yaklaşımla değer atanır; bu yaklaşım, adım boyutuna bağlı olarak her j'inci boyut için sonraki konumun yönünden sorumludur. Newton'un hareket yasası Eşitlik (6.4)'te gösterildiği gibi takipçilerin sonraki konumlarını belirlemede rol oynar.

$$K_j^i = \frac{1}{2}at^2 + v_0t \quad (6.4)$$

Burada  $i \geq 2$  ve  $K_j^i$  takipçilerin konumunu temsil eder. Yukarıdaki ifade, K'nin üst indisi ile belirtilen herhangi bir takipçi için j'inci boyuttaki yönü temsil etmektedir. Eşitlik (6.4)'te t, zamanı temsil etmektedir ve  $v_0$ , sıfır olduğu varsayılan salp takipçisinin başlangıç hızıdır. Optimizasyon analizinde genellikle zaman yineleme sayısı ile temsil edilir; bu nedenle zaman değişkeni için adım büyüklüğü 1 seçildi. Eşitlik (6.2)'nin basitleştirilmiş bir versiyonu, Eşitlik (6.5)'te gösterilmektedir.

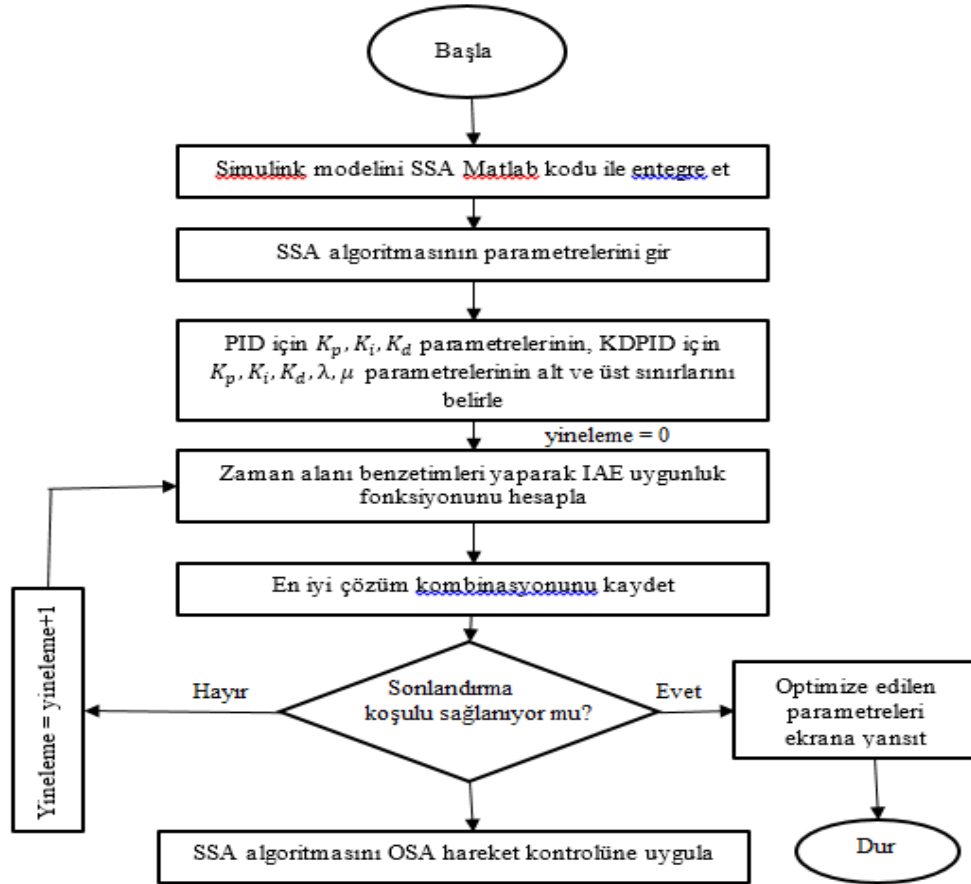
$$K_j^i = \frac{K_j^i + K_j^{i-1}}{2} \quad (6.5)$$

Salp zincirinin, tanımlanan arama alanını keşfederek ve kullanarak daha iyi bir çözüm bulmak için sürekli değişen küresel optimuma (besin kaynağı) doğru hareket etme potansiyeline sahip olduğunu belirtmek önemlidir. SSA'yı geleneksel optimizasyon algoritmalarından farklı kılan çok önemli özelliklerinden bazıları şu şekilde sıralanmaktadır (Abualigah vd., 2020):

- Algoritma, her yinelemeden sonra elde edilen en iyi çözümü saklar ve onu global optimum (yiyecek kaynağı) değişkenine atar. Dolayısıyla nüfusun tamamı bozulsa bile hiçbir zaman ortadan kaldırılamaz;
- SSA, yalnızca şu ana kadar elde edilen en iyi çözüm olan gıda kaynağına göre önde gelen salpın konumunu günceller; bu nedenle lider salp, daha iyi bir çözüm için daima etrafındaki alanı araştırır ve kullanır;
- SSA, takipçi salpların kademeli olarak lider salp'a doğru hareket etmelerini sağlamak için birbirlerine göre konumlarını günceller;
- Takipçi salplarının kademeli hareketleri, SSA'nın kolayca yerel optimuma sabitletmesini önler;

- $c_1$  parametresi, yinelemeler boyunca uyarlanabilir bir şekilde azaltılır; bu, algoritmanın başlangıçta arama alanını keşfetmesine ve bitiş aşamasında onu kullanmasına yardımcı olur.
- SSA'nın karmaşıklığı azaltan ve uygulanmasını kolaylaştıran tek bir ana kontrol parametresi ( $c_1$ ) vardır.

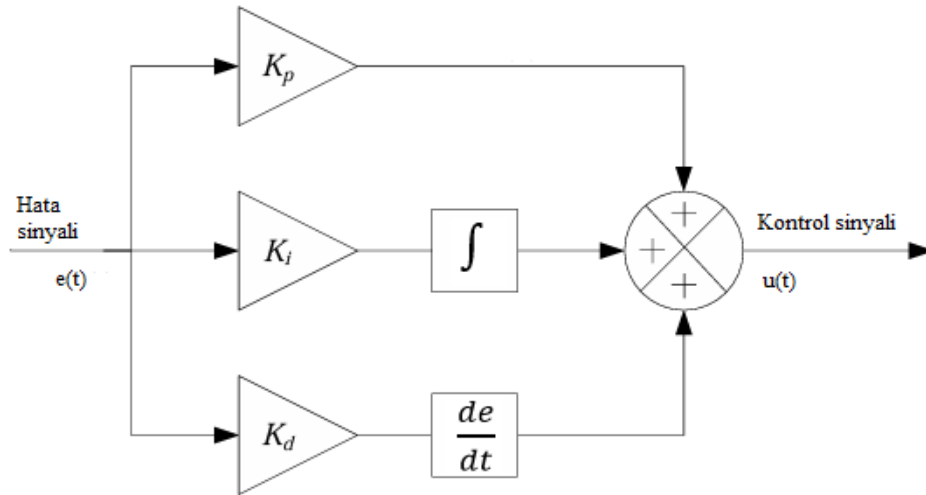
SSA'nın yukarıda belirtilen yararları, optimizasyon problemlerini geleneksel optimizasyon yöntemlerinden daha iyi çözme potansiyeline sahip olmasını sağlar ve dolayısıyla mevcut araştırma çalışmasının önemini vurgular. Ayrıca SSA'nın uyarlanabilir mekanizması, bu algoritmanın sürekli olarak yerel çözümlere takılıp kalmaktan kaçınarak en iyi çözümün doğru tahminini bulmasına olanak tanır. Algoritmanın tek dezavantajı ise yakınsamanın yavaş olmasıdır. OSA sistemi için KDPID denetleyici parametre optimizasyonu ile bağlantılı olarak SSA'nın genel prosedürü, Şekil 6.3' teki akış şemasında görülmektedir.



Şekil 6.3 OSA yörünge takibi kontrolünde kullanılan SSA Tekniğinin Akış Şeması

## 6.2. PID Kontrolör ve Mevcut Probleme Uygulanması

PID kontrolörler, basit olmaları ve kolay uygulanabilmeleri sebebiyle endüstriyel uygulamalarda sık kullanılmaktadır. Su altı araç sistemlerinin doğrusallaştırılmış modellerinin kontrolü için de yaygın olarak kullanılır. Doğrusal olmayan modellerin kontrolünde tek başına PID kontrolör başarılı performanslar gösteremediğinden, adaptif yöntemler ile birleştirilen hibrid tasarımlar önerilmiştir (Erenoğlu vd., 2006, Hadi ve Ramz, 2017, Singh vd., 2106, Podlubny, 1999). Blok yapısı Şekil 6.4'te gösterilmiş olan PID kontrolör, Eşitlik (6.6)'da görüldüğü gibi üç katsayıdan oluşur. Kontrol eylemini ( $u(t)$ ) üretmek için orantısal katsayı ( $K_p$ ), integral katsayı ( $K_i$ ) ve türev katsayısı ( $K_d$ ). PID kontrolörde,  $K_p$  yükselme süresini azaltma etkisine sahipken,  $K_i$  kararlı durum hatasını iyileştirmekten ve  $K_d$  ise aşmayı azaltmaktan ve kararlılık marjını iyileştirmekten sorumludur (Abbas ve Sami, 2017).



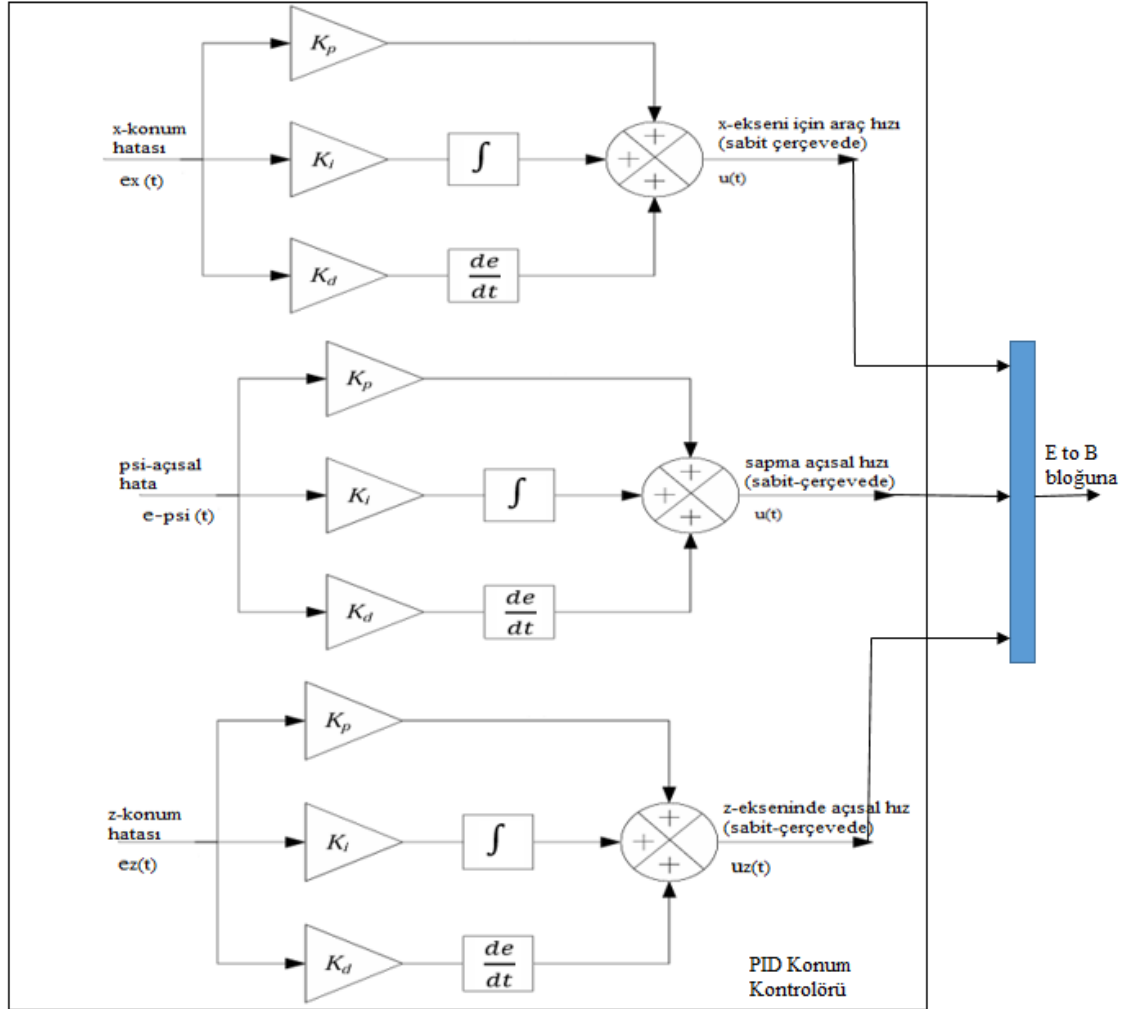
Şekil 6.4 PID Kontrolör blok yapısı

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6.6)$$

Burada,  $e(t)$  zamanla değişen hata değeridir ve olması gereken sistem çıkışı ile gerçekte olan sistem çıkışı arasındaki farktır. PID kontrolörün kazançları, istenen yanıtın elde edilmesi için gerekli olan sinyalin üretilmesinde önemli bir rol oynar. Kararlılığı artırmak ve daha hızlı yanıt elde etmek amacıyla en iyi değerlere ayarlanmaları gerekmektedir.

Çalışma konusu kontrol probleminde; su altı aracının tanımlı bir yörüngeyi takibi sırasında x ve z- eksenlerinde konum ve hızları ile z-ekseni etrafında dönme açısı ve açılal

hızı kontrol edilmek istenmektedir. PID kontrolör, Şekil 6.1’de görülen kontrol şemasında, bu üç serbestlik için konum ve hız kontrolör blokları içerisinde üçer tane olmak üzere toplam altı tane kullanılmıştır. Şekil 6.1’deki konum kontrolörü bloğunun açık şekli Şekil 6.5’deki gibidir.



Şekil 6.5 PID konum kontrolör blok yapısı

Her PID kontrolörün kazanç değerleri, belirli bir uygunluk fonksiyonuna göre SSA ile optimize edilmiştir (Şekil 6.6). 3-DOF için, 3 ayrı uygunluk fonksiyonu tanımlanmıştır.

1. Dalgalanma (surge) hareketi kontrol denklemi:

$$u_x(t) = K_{px}e_x(t) + K_{ix} \int e_x(t)dt + K_{dx} \frac{de_x(t)}{dt} \quad (6.7)$$

Bu durumda konum hatasının x-bileşeni;

$$e_x(t) = x_d(t) - x(t) \quad (6.8)$$

Burad,  $x_d(t)$  t anındaki olması gereken x pozisyonu,  $x(t)$  ise gerçekte olan x pozisyonudur.

2. Sapma (yaw) hareketi kontrol denklemi:

$$u_\psi(t) = K_{p\psi}e_\psi(t) + K_{i\psi} \int e_\psi(t)dt + K_{d\psi} \frac{de_\psi(t)}{dt} \quad (6.9)$$

Bu durumda aracın sapma hatası;

$$e_\psi(t) = \psi_d(t) - \psi(t) \quad (6.10)$$

Burad;  $\psi_d(t)$  t anındaki olması gereken sapma miktarı,  $\psi(t)$  ise gerçekte olan sapma miktarıdır.

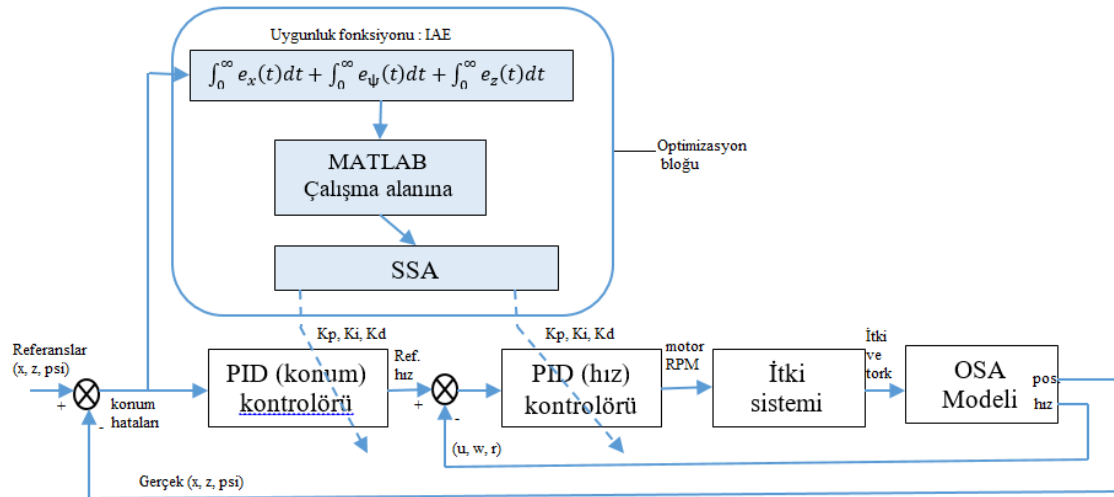
3. Batma (heave) hareketi kontrol denklemi:

$$u_z(t) = K_{pz}e_z(t) + K_{iz} \int e_z(t)dt + K_{dz} \frac{de_z(t)}{dt} \quad (6.11)$$

Bu durumda konum hatasının z-bileşeni;

$$e_z(t) = z_d(t) - z(t) \quad (6.12)$$

Burad;  $z_d(t)$  t anındaki olması gereken derinlik,  $z(t)$  ise aracın gerçekte bulunduğu derinliktir.



Şekil 6.6 SSA-PID kontrolör blok yapısı

Şekil 6.6'daki hız kontrol bloğunun girişi, "E to B" bloğundan gelen araç gövde çerçevesinde tanımlı olan, referans hızlar (u, r ve w) ile dinamik modelden geri beslenen gerçek hızlar arasındaki fark ile hesaplanan hız hatalarıdır. Bu hız hataları; dalgalanma

(surge) hız hatası, sapma (yaw) hız hatası ve batma (heave) hız hatasıdır. Hız kontrol bloğunun çıkışında ise aracın referans yörüngeyi takibi için gerekli olan hız değerleri üretilmektedir. Bu araç hız değerleri “kinematik kontrol bloğu”nun girişini oluşturur. Kinematik kontrol bloğu ise aracın itki sistemini oluşturan motorların “dev/dk.” olarak dönüş miktarlarını üreterek itki sistemi bloğuna göndermektedir.

### 6.3. KDPID Kontrolör ve Mevcut Probleme Uygulanması

Kesirli hesabın ortaya çıkışı, 300 yıl öncesine dayanır. Bu konuyu ilk ortaya atanlar Leibniz ve L'Hôpital'dır (1695). Kesir dereceli hesap için en yaygın kullanılan tanımlar Grünwald-Letnikov, Cauchy, Riemann-Liouville ve Caputo tarafından yapılmıştır. Grünwald-Letnikov'un tanımı Eşitlik (6.13)'deki gibi ifade edilebilir.

$${}_a^G D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-\alpha} \sum_{i=0}^{\lfloor \frac{t-a}{h} \rfloor} (-1)^i \binom{\alpha}{i} f(t - ih) \quad (6.13)$$

Cauchy'nin tanımı ise Eşitlik (6.14)'deki gibidir;

$${}_a^\alpha D f(t) = \frac{\alpha(\alpha+1)}{2\pi j} \oint \frac{f(\tau)}{(\tau-t)^{\alpha+1}} d(\tau) \quad (6.14)$$

Riemann ve Liouville'nin tanımları Eşitlik (6.15)'deki gibi tanımlanmaktadır;

$${}_a^{RL} D_t^{-\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_a^t (t-\tau)^{(\alpha-1)} f(\tau) d(\tau) \quad (6.15)$$

Caputo'nun tanımı Eşitlik (6.16)'daki gibidir;

$${}_a^\alpha D f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^\alpha} d(\tau) \quad (6.16)$$

Burada,  $\Gamma(\cdot)$  Gama fonksiyonudur ve Eşitlik (6.17)'deki gibi tanımlanmıştır.  $\alpha$  ise kesir derecesidir ve  $\alpha \in (0,1)$  dir.

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-t} t^{z-1} dt \quad (6.17)$$

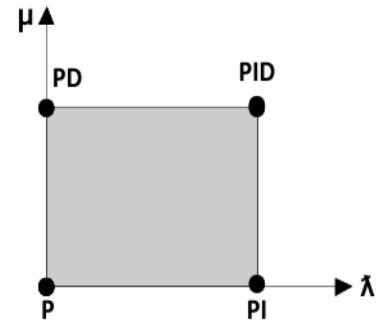
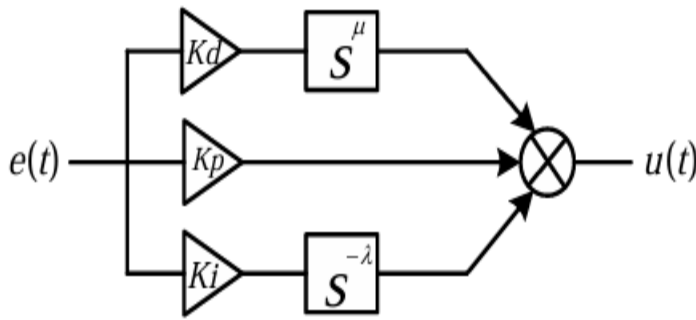
Son yıllarda kesirli hesabın ortaya çıkışı, klasik modellerden ve kontrolörlerden, tam sayı olmayan mertebeden diferansiyel denklemlerle tanımlanan modellere geçişi mümkün kılmıştır. Bu sayede kesir dereceli dinamik modeller ve kontrolörler tanımlanabilmiştir. Kesir dereceli PID (KDPID) kontrolörün paralel formu Podlubny ve arkadaşları tarafından 1997'de önerilmiştir (Podlubny, 1999).

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^\mu \quad (6.18)$$

Burada  $(\lambda, \mu) > 0$  dır. Böyle bir kontrolör daha fazla ayarlama özgürlüğüne sahiptir ve dolayısıyla kontrol altındaki sistemin kararlılığını sağlayan ve kontrol döngüsünün

sağlamlığında iyileştirmeler sunan daha geniş bir parametre alanına sahiptir. Bunu doğrulamak için pek çok çalışma yapılmıştır. Bunlardan, yakın tarihli olanlarının bazıları (Bhookya vd., 2019, Saadatmand vd., 2021, Tüfenkçi vd., 2023)'de görülebilir.

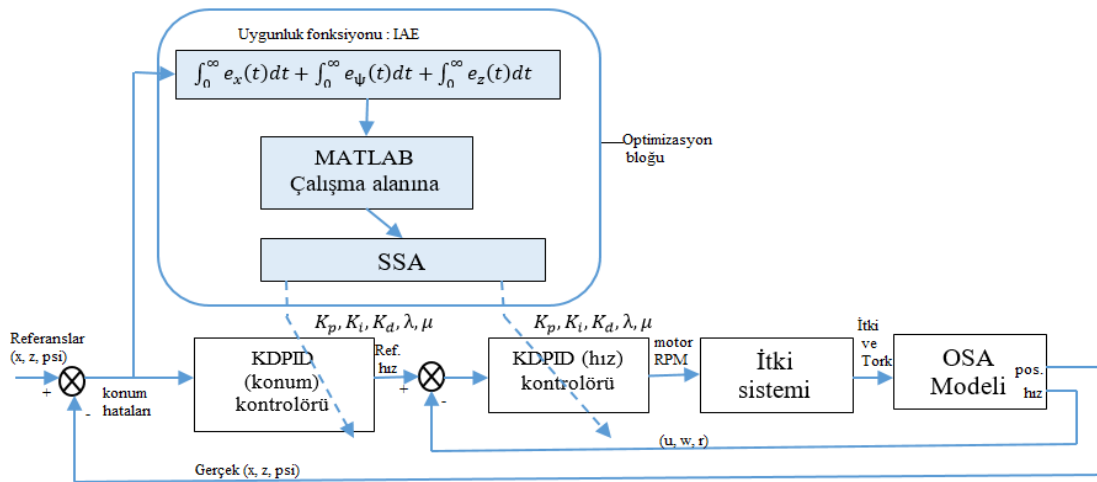
Şekil 6.7' de KDPID kontrolörün blok şeması görülmektedir. Geleneksel PID,  $\lambda = \mu = 1$ 'e ayarlanarak elde edilebilir. Ayrıca  $\lambda=1$  (veya 0) ve  $\mu = 0$  (veya 1) olduğunda Şekil 6.8' de gösterildiği gibi normal bir PI (veya PD) kontrolör elde edilebilir (Podlubny, 1999). Kesir dereceli  $PI^\lambda D^\mu$  kontrolör, tamsayı dereceli PID kontrolöre genelleştirir ve onu bir noktadan bir düzleme genişletir.



Şekil 6.7 KDPID kontrolör blok şeması

Şekil 6.8 Genelleştirilmiş KDPID kontrolör

Su altı aracı RedFin'in referans bir yörüngeyi takibi sırasında, 3-DOF için konum ve hız kontrollerinde KDPID'nin kullanıldığı durumda, Şekil 6.1'deki konum ve hız kontrolör blokları içerisinde üçer adet olmak üzere toplamda altı adet KDPID bloğu kullanılmıştır (PID kontrolörde olduğu gibi: Şekil 6.5).



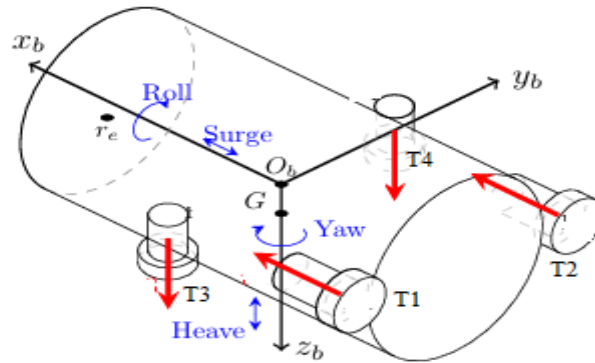
Şekil 6.9 SSA-KDPID kontrolör blok yapısı

SSA-KDPID kontrolör blok yapısı Şekil 6.9’da görülmektedir. Burada 3-DOF’un konum ve hız kontrolleri için toplamda altı adet KDPID kontrolör kullanıldığından ve her kontrolörün beş adet parametresi olduğundan toplamda 30 adet parametre optimize edilmektedir.

Uygunluk fonksiyonu olarak, her serbestlik için konum hatalarının mutlak değerlerinin integrali (IAE) kullanılmıştır.

#### 6.4. Ters Kinematik Kontrol Bloğu

OSA’nın boyutları yükseklik, genişlik ve uzunluk için sırasıyla 0.37 m, 0.26 m ve 0.42 m’dir. Toplamda dört itici kullanılmaktadır. İtici, ürettikleri itki kuvveti ile aynı yönelimli bir konfigürasyonda monte edilmiştir ve dikey ve yatay iticiler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Önerilen modüler itici konfigürasyonu, OSA’nın holonomik bir harekete sahip olmasını engellemektedir. Konfigürasyon Şekil 6.10’da gösterilmektedir. Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi OSA su altında yüzer durumda ve dengede kalabildiğinden yuvarlanma (roll) ve yunuslama (pitch) hareketleri ihmal edilmiştir. Araç dikey eksen etrafında dönme hareketini (yaw) ise yatay iticilerin farklı devirlerde çalıştırılması ile sağlamaktadır.



Şekil 6.10 Dört adet 1 DOF sabit iticiye sahip RedFin OSA (Chocron vd., 2019)

Gövde eksenleri çerçevesinde tanımlı OSA hızlarını, olması gereken itici açısal hızlarıyla ilişkilendiren ters kinematik denklemler geliştirilmiştir. Şekil 6.10’da, dikey iticilerin geometrik konfigürasyonlarını göstermektedir; İtici, aksın bulundukları diyagonale paralel olacak şekilde monte edilmiştir. Bu durumda yatay iticiler için ters kinematik

kontrol modeli Eşitlik 6.19' daki gibi ifade edilebilir. Burada  $l_h$ , yatay iticilerin merkezi ile OSA gövdesinin ağırlık merkezi arasındaki mesafedir.

$$\begin{bmatrix} \omega_{HL} \\ \omega_{HR} \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{P_{prop}} \begin{bmatrix} 1 & l_h \\ 1 & -l_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ r \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

Dikey iticiler için ise roll serbestliği ihmal edildiğinden, motor dönüş açısal hızları ile aracın dikey batma hızı arasındaki ilişki Eşitlik (5.20)'deki gibi ifade edilir:

$$\omega_{VL} = \omega_{VR} = (\lambda/P_{prop})w \quad (6.20)$$

Burada;  $P_{prop}$ , pervanenin bir devrinde kat edilen eksenel mesafedir (m/dev).  $\lambda > 0$ , kontrolör tepkisini iyileştirecek şekilde ayarlanmış, birimsiz bir kontrol faktörüdür (Hammad vd., 2017). Sol yatay iticinin açısal hızı  $\omega_{HL}$  ile, sağ yatay iticinin açısal hızı  $\omega_{HR}$  ile, sol dikey iticinin açısal hızı  $\omega_{VL}$  ve sağ dikey iticinin açısal hızı  $\omega_{VR}$  ile gösterilmiştir. Ters kinematik kontrol modelini formüle etmek için temel kural, her bir iticinin bir serbestliği harekete geçirmedeki rolünü tanımlamaktır.

Örneğin, sadece Yatay Sağ (HR) iticinin çalıştığı durumda, İtici eksenel hareketi dalgalanma (surge) ve sapma (yaw) hareketlerine neden olmaktadır. Yatay Sol (HL) ve Yatay Sağ (HR) iticiler aynı açısal hızlar ile çalıştığında ise sadece dalgalanma hareketine neden olmaktadır. İtici, OSA gövde çerçevesinin z eksenine dik olduğundan ve yuvarlanma ve yunuslama dönüşleri sağlayamadığı için yükselme (heave) hareketine katkıda bulunmaz. Dikey iticiler ise yükselme ve yuvarlanma hareketlerine kuvvet üretirler. Bununla birlikte, kontrol sinyallerini üretirken, dikey iticilere dalgalanma hareketi ve sapma dönüşü yapmaları için komut vermemize gerek yoktur, çünkü buna istenmeyen dönüşler ve dolayısıyla kararsız hareketler eşlik edecektir. Dikey iticilere yalnızca dikey hareket gerekli olduğunda komut verilir. Kontrolör, yatay iticiler için geri besleme döngüsü denklemlerini kullanarak istenmeyen dalgalanma (surge) ve salınım (sway) hareketlerini düzeltecektir.

## 6.5. İtici Sistemi Bloğu

Bu çalışmaya konu olan su altı aracının hareketini sağlayan dört iticinin yerleşimleri Şekil (6.10)'da gösterildiği gibidir. İki yatay itici OSA'nın arkasına yerleştirilmiş, iki dikey

itici aracın yanlarında simetrik olarak ortalanmıştır. Bu yerleşim şekli dalgalanma, yükselme, sapma ve yuvarlanma hareketlerinde çalıştırma sağlar.

Kaldırma kuvveti ve ağırlık merkezlerinin göreceli konumu sayesinde yuvarlanma ve yunuslama hareketi mekanik olarak dengelenmiştir. Salınım (sway) kontrolsüz ve stabil olmadığından yb ekseninde serbest ve kontrolsüz hareketin (sürüklenme) oluşması beklenmektedir. Şekil 6.10'a göre itki yerleşim matrisi Eşitlik (6.21)'deki gibi tanımlanır. B matrisinde,  $l_{1y}$  ve  $l_{2y}$  sırasıyla yatay motorların merkezlerinden geçen eksenin, aracın ağırlık merkezine olan uzaklığın y-ekseni yönündeki bileşenidir.

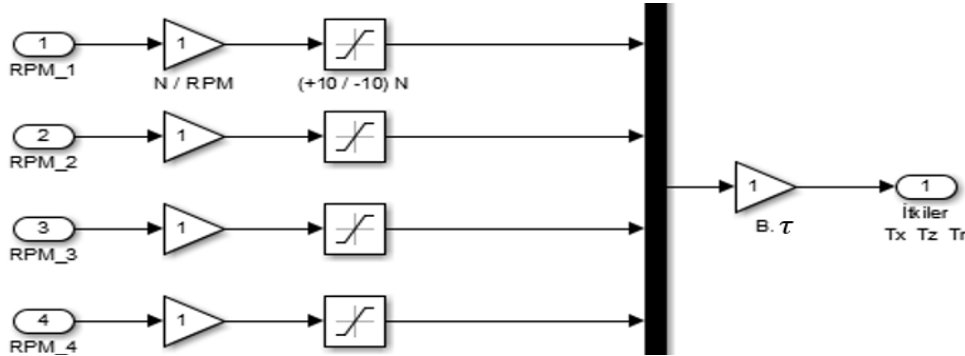
$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ l_{1y} & -l_{2y} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

Her bir iticinin ürettiği itki kuvvetleri;  $\tau = [T_1, T_2, T_3, T_4]^T$  ise, itki yerleşim matrisi ile itki kuvvetleri vektörü çarpılarak itki kuvvetlerinin hareket serbestliklerine dağılımı hesaplanabilir ( $B \cdot \tau$ ). Örneğin dalgalanma (surge) serbestliği için üretilen itki, yatay motorların ürettikleri itkilerin toplamı kadardır ( $T_1 + T_2$ ). Batma (heave) serbestliği için dikey motorların ürettikleri itkilerin toplamı kadar bir kuvvet gerekir ( $T_3 + T_4$ ). Sapma (yaw) serbestliği için ise yatay motorların farklı devir ve yönlerde dönerek ürettikleri itki değerlerinin farkı alınarak moment kolu ( $l_{1y} = l_{2y}$ ) ile çarpılır.

$$\begin{aligned} \tau_x &= T_1 + T_2 \\ \tau_z &= T_3 + T_4 \\ \tau_r &= l_{1y} \cdot T_1 - l_{2y} \cdot T_2 \end{aligned} \quad (6.22)$$

Şekil (6.1)'deki kontrol sistemi blok diyagramında yer alan itki sistemi bloğunun girişi, ters kinematik kontrol bloğundan gelen ve her bir motorun, araca ilgili serbestlikte gerekli hızları üretecek açısal hız değerleridir (devir/dk.). su altı aracında kullanılan motorların, üretici firma tarafından yapılan itki testlerinden elde edilen verilerden ve havuz testleri sırasında ölçülen itki kuvvetlerinden yararlanılarak, açısal dönüş hızlarına karşılık üretilen itki kuvvet ve torkları arasında yaklaşık lineer bir ilişki olduğu kabul edilmiştir. Buna göre, her bir motor girişi açısal hız, çıkışı itki kuvveti olacak şekilde bir Simulink kazanç bloğu şeklinde modellenmiştir. Bu modelde, motorların özdeş oldukları ve ileri-geri, aşağı-yukarı hareketler sırasında aynı devir sayıları için aynı itkileri ürettikleri kabul

edilmiştir. Her bir motorun üretmiş olduğu itki değeri  $\pm 10 N$ 'u geçmediğinden, kazanç bloklarının çıkışına bir doyum (saturation) bloğu eklenmiştir (Şekil 6.11).



Şekil 6.11 İtki sistemi Simulink modeli

## 6.6. OSA Sistemi Matlab Modeli Modeli

Su altı aracı RedFin'e ait 4-DOF dinamik modeli Bölüm 4.6'da açıklanarak Eşitlik 4.29'da verilmiştir. Bu bölümde, RedFin'in dinamik model denkleminin Matlab/Simulink gerçekleştirilmesi açıklanacaktır.

Genel olarak, hızın yüksek olduğu hareketlerde, sönümleme katsayıları ile hız arasındaki bağıntı doğrusal değildir ve diğer serbestlikler ile bağlantılıdır. Bununla birlikte, düşük hızlı hareketler için, bağlantılılık durumu ihmal edilebilir (Hammad vd., 2017).

Doğal olarak yüzebilen bir su altı aracı için yerçekimi ( $W$ ) ve kaldırma kuvveti ( $B$ ) kuvvetleri eşittir. Ayrıca CG (Ağırlık Merkezi) ve CB'nin (Yüzme Kuvveti Merkezi)  $z$  ekseninde dikey olarak yer aldığı varsayılmaktadır. Sonuç olarak,  $g$  yerçekimi kuvvet vektörü Eşitlik (6.23)'deki gibi yazılır;

$$g = [0, 0, 0, \overrightarrow{BG_z} W \cos \theta \sin \varphi, \overrightarrow{BG_z} W \sin \theta, 0]^T \quad (6.23)$$

Burada  $\overrightarrow{BG_z} = z_g - z_b$  ; ayrıca  $\varphi$  ve  $\theta$  sırasıyla yuvarlanma ve yunuslama açılarını temsil eder. Yuvarlanma ve yunuslama yönünde sadece ihmal edilebilir hareketler olduğundan,  $\varphi = \theta \simeq 0$  ve bu durumda  $g$  Eşitlik (6.24)'deki gibi olacaktır:

$$g = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T \quad (6.24)$$

Dolayısıyla dinamik modelde yerçekimi ihmal edilmiştir. Ayrıca bu araçta üç aktüatör vardır, dolayısıyla  $\tau$  itki vektörü Eşitlik (6.25)'deki gibidir;

$$\tau = [T_x, 0, T_z, 0, 0, T_r]^T \quad (6.25)$$

Burada  $T_x$ ,  $T_z$  ve  $T_r$  sırasıyla dalgalanma, batma ve sapma yönlerinde mevcut aktüatörleri temsil eder. Bu varsayımlarla dinamik hareket denklemleri Eşitlik (6.26)'daki gibi basitleştirilmiştir.

$$\begin{aligned} m\dot{u} - mvr + X_u u + X_{|u|u}|u|u &= T_x \\ m\dot{v} + mur + Y_v v + Y_{|v|v}|v|v &= 0 \\ m\dot{w} + Z_w w + Z_{|w|w}|w|w &= T_z \\ I_z \dot{r} + N_r r + N_{|r|r}|r|r &= T_r \end{aligned} \quad (6.26)$$

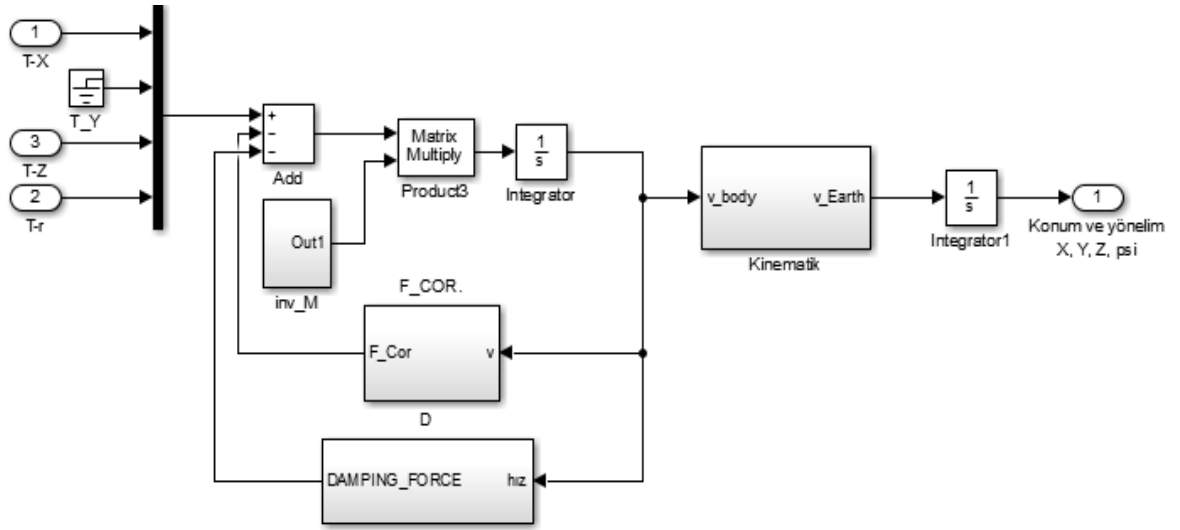
Ayrıca bu çalışmada rüzgar, dalga ve akıntı gibi çevresel bozucu etkiler vektörü ihmal edilmiştir.

OSA'nın kinematik modeli (yuvarlanma ve yunuslama yönlerinde hareket olmadığı varsayımıyla) Eşitlik (6.27)'deki gibi temsil edilir:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y} &= u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{z} &= w \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (6.27)$$

Burada,  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  ve  $\dot{z}$  dünya sabit çerçeve koordinat sistemindeki hızları,  $u$ ,  $v$  ve  $w$ , gövde sabit çerçeve koordinat sistemindeki tanımlı hızları temsil etmektedir. Aracın, dünya sabit çerçeve koordinat sisteminde tanımlı sapma açısı ise  $\psi$  ile gösterilmiştir.

RedFin dinamik modeli Matlab/Simulink gerçeeklemesi Şekil (6.12)'de görülmektedir.



Şekil 6.12 OSA Dinamik Modeli (MATLAB/SİMULİNK)

## 7. YÖRÜNGE TAKİBİ BENZETİM ÇALIŞMALARI

Eksik çalıştırılan (3-DOF) su altı aracı RedFin'in, referans bir yörüngeyi takibinin kontrolü problemi için tasarlanan PID ve KDPID kontrolörlerin yapısı hakkında bir önceki bölümde gerekli açıklamalar yapıldı. Bu bölümde, yapılan benzetim çalışmaları ve elde edilen sonuçlara yer verilecektir. PID ve KDPID kontrolörlerin parametrelerinin optimizasyonu için önerilen SSA algoritmasının etkinliğini analiz etmek amacıyla Intel(R) Core(TM) i7-3632 QM CPU 2.20GHz bilgisayarda MATLAB/SIMULINK (2016a) kullanılmıştır.

Önerilen kontrolörün başarımlı performansını görmek ve farklı yörüngeler, çevresel bozucu etkiler için kontrolörün sağlamlığını test etmek amacıyla; SSA-PID, SSA-KDPID ve GA-KDPID kontrolörler ile kontrol benzetimleri yapıldı. Tüm kontrolörler için kontrol girişleri ve yörünge izleme hataları gösterildi ve elde edilen sonuçlar, konum hatalarının RMS değerleri şeklinde tablo olarak verilerek tartışılmıştır.

Önerilen kontrolörün performansının testi için benzetim çalışmalarında kullanılan referans yörünge, mümkün olan en zor yörünge olacak şekilde tasarlanmıştır ve tork talebi ve hızı geçici olarak OSA'nın fiziksel sınırlarına yaklaştığında kontrolör performanslarını analiz etmek için çeşitli manevra dizileri içermektedir. Örneklem frekansı olarak 200 Hz, simülasyon süresi olarak 50 sn kullanılmıştır.

### 7.1. SSA ve GA Yakınsama Davranışları

Sezgisel optimizasyon algoritmalarının kontrol problemlerine uygulanması sırasında, algoritma parametrelerinin seçimi için kesin çıkarımlar olmamakla birlikte, yapılan araştırmalardan elde edilen istatistikî değerlerden yararlanılabilir. Piotrowski ve arkadaşlarının yapmış oldukları geniş kapsamlı bir çalışmada; üç farklı optimizasyon probleminin 16 farklı sürü popülasyonu için (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 ve 50), 10.000 farklı çalışma gerçekleştirilmiştir (Piotrowski vd., 2020). Sonuçlar, sürü popülasyonlarına bağlı yakınsama hızları ve uygunluk değerleri açısından istatistiksel olarak sunulmuştur. Sürü popülasyonu arttıkça, yakınsama başarısı artarken, yakınsama hızının düştüğü gözlenmiştir. Bu iki kriterin optimum değeri için sürü popülasyonunun 20-50 arasında olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

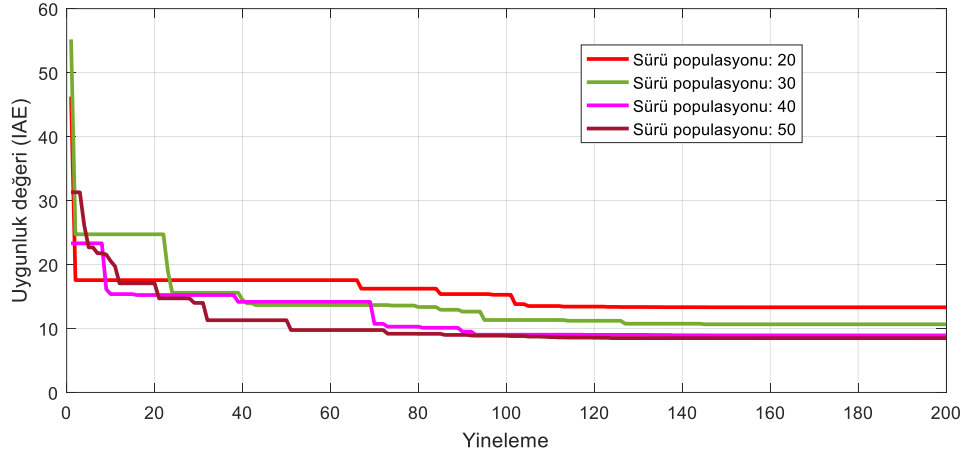
Bu çalışmada, su altı aracı RedFin'in 3 serbestlik derecesi kontrol edilerek (dalgalanma, yükselme ve sapma), 3B yörüngeyi takibi istenmektedir. Araçta, y-ekseninde kayma hareketini sağlayan itki sistemi mevcut olmadığından, bu hareket kontrol edilememektedir ve yörünge takibi sırasında, araç ilgili yörüngeden saptığı durumda tekrar yörüngeyi yakalamak için rota yönlendirmesi (heading) hareketi yapmaktadır. Yani y-eksenindeki hareket heading (yaw açısı) kontrolü ile dolaylı olarak kontrol edilmektedir. Yörünge takibi sırasında, görüş alanı çizgisi (LOS: Line of Sight) yaklaşımından yararlanılarak, aracın yapması gereken yaw açısı referansı;  $\psi_{ref} = \tan^{-1}\left(\frac{y_{ref}(t)-y(t)}{x_{ref}(t)-x(t)}\right)$  şeklinde hesaplanmaktadır. Bu eşitlik ile aracın yatay düzlemde belirli bir referans yörüngeyi takibi sırasında yapması gereken (yaw) açısının zamana bağlı değişim sinyalini üretir. Burada ,  $y_{ref}(t)$  ve  $x_{ref}(t)$  referans sinyalinin y ve x eksenlerindeki değişimleridir.  $y(t)$  ve  $x(t)$  ise OSA dinamik modelinden geri beslenen, aracın o anki konumuna ait koordinatlardır. Referans sinyali üreten bloğun, takip edilecek yörünge için  $\psi_{ref}$  sinyalini doğru üretebilmesi için y-eksenindeki referans hareketi de yakalaması gerekmektedir. Aksi durumda, yaw açısı referansı çok küçük bir hatayla takip edilse de araç yörüngeyi takip edememektedir. Bu da kontrolü güçleştirmektedir.

SSA ile sürü popülasyonu 20, 30, 40 ve 50 iken 200 yineleme gerçekleştirilerek KDPID kontrolörlere ait 30 adet parametrenin optimize edilmesi durumunda uygunluk değerleri Şekil 7.1'deki gibi elde edildi. Şekil 7.2'den de görüleceği üzere, sürü popülasyonu arttıkça yakınsanan değerde değişimler çok azalmaktadır. Bu nedenle benzetim çalışmalarında PID kontrolörler için sürü popülasyonu 20, KDPID kontrolörler için sürü popülasyonu 30 olarak seçilmiştir.

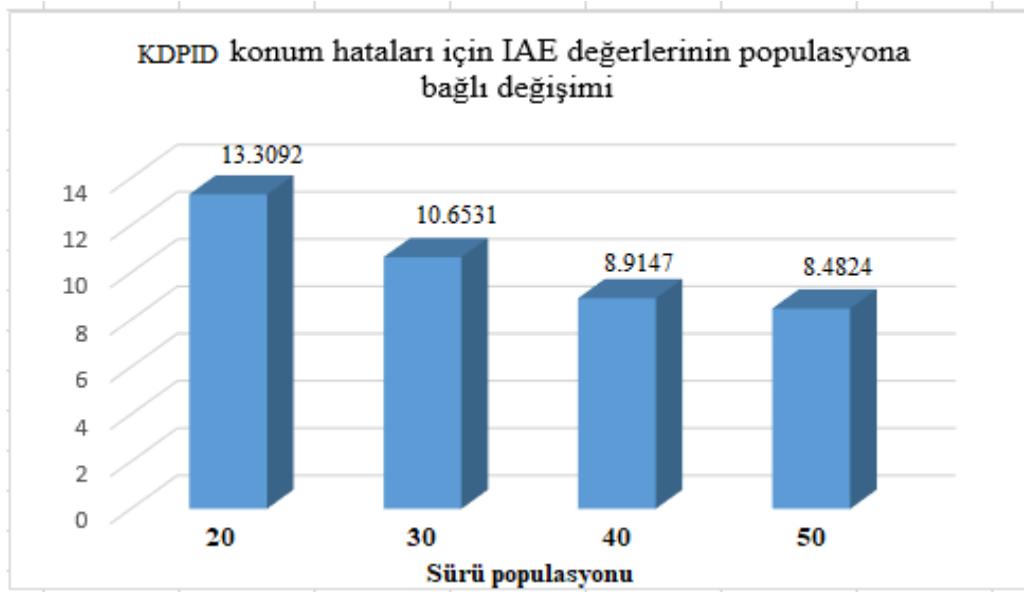
SSA ile PID kontrolörün optimizasyonu sırasında, sürü popülasyonu 20 iken 10 çalıştırma sonucunda elde edilen en iyi uygunluk değeri (Konum hatalarının mutlak değerlerinin integrali: IAE) 28.39'dur. SSA ile KDPID kontrolörün optimizasyonu sırasında, sürü popülasyonu 30 iken 10 çalıştırma sonucunda elde edilen IAE uygunluk değeri 19.07 olarak belirlenmiştir.

Benzetimler sırasında SSA parametreleri Tablo 7.1' deki gibi belirlenmiştir. PID ve KDPID konum ve hız kontrolörlerinin optimize edilecek parametreleri, SSA için arama uzayındaki salp canlıları, optimize değerleri ise besindir. PID kontrolör

parametrelerinden  $K_p$  ve  $K_d$  için arama uzayı alt sınırı 0.001, üst sınırı 200 olarak seçilmiştir.  $K_i$  için alt sınır 0.001, üst sınır 5 olarak seçilmiştir.



Şekil 7.1 KDPID kontrolör için SSA uygunluk değeri yakınsaması



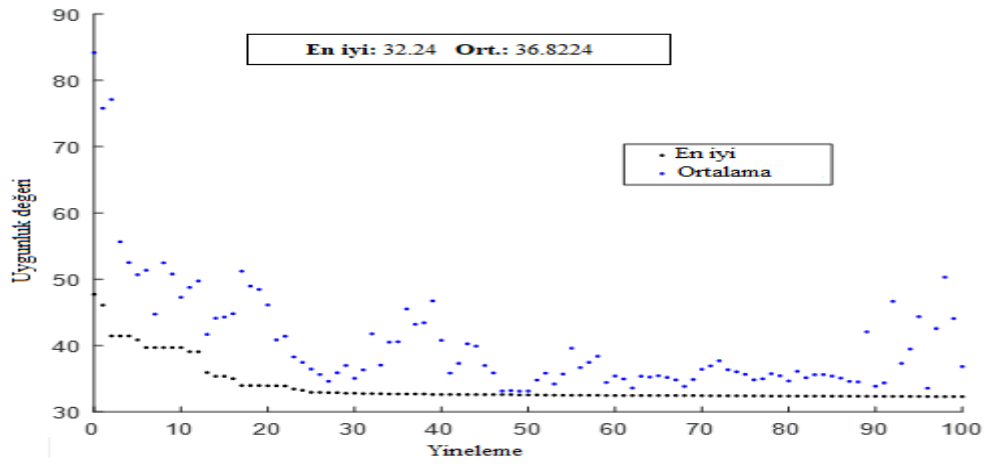
Şekil 7.2 KDPID kontrolör için SSA yakınsamalarının popülasyona bağlı değişimleri

KDPID kontrolörün  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  parametrelerinin arama uzayı alt ve üst sınırları PID kontrolör ile aynı seçilirken,  $\lambda$  ve  $\mu$  için alt sınır 0.01, üst sınır 1.256 olarak seçilmiştir.

Su altı aracı RedFin'in, üç boyutlu spiral yörüngeyi takibi için gerekli olan konum ve hızların kontrollerinde kullanılan KDPID kontrolörlerin parametreleri (30 parametre), GA ile optimize edilmiştir. Optimizasyonlarda; yineleme sayısı 100, arama uzayı popülasyonu 30 seçilmiştir.

Tablo 7.1 SSA-PID ve SSA-KDPID benzetim parametreleri

| Parametre        | Değeri              | Parametre                         | Değeri               |
|------------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------|
| j-beta           | 0.8                 | Örnekleme süresi                  | 0.005 s              |
| Max. yineleme    | 200                 | Simülasyon süresi                 | 50 s                 |
| Sürü popülasyonu | PID (20) KDPID (30) | PID sınırlar (Kp,Kd,Ki)           | 0.001 – 200, 0.001-5 |
| Boyut            | PID (18) KDPID (30) | KDPID sınırlar ( $\lambda, \mu$ ) | 0.01 – 1.256         |



Şekil 7.3 GA ile optimizasyon yakınsama eğrisi

KDPID kontrolörlerin parametrelerine ait alt ve üst sınır değerleri, SSA ile optimazasyonda seçilmiş olan değerler ile aynıdır. MATLAB’da yer alan GA Toolbox’ı içerisinde yer alan kod değişiklik yapılmadan çalıştırılmıştır. Toplamda 20 adet çalışma sonucunda, elde edilen en iyi yakınsama grafiği Şekil (7.3)’te görülmektedir.

## 7.2. Uygunluk Fonksiyonu

Söz konusu algoritmaların değerlendirilmesinde hata performans indeksine dayalı çeşitli fonksiyonlar kullanılmaktadır. PID ve KDPID kontrolörlerin en iyi parametrelerini tahmin etmek için uygulanan performans endeksleri eşitlikler (7.1), (7.2) ve (7.3) teki gibidir:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)|dt \quad (7.1)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (7.2)$$

$$MAE = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (7.3)$$

Frekans salınımının pozitif ya da negatif hatalar için integral ifadesini arttırdığı belirtilmelidir. Böylece, zamanla değişen gecikmelerin olması durumunda frekans salınımını ortadan kaldırmak için KDPID kontrolörün verimliliğini araştırmak amacıyla amaç fonksiyonu kullanılır. Bu çalışmada, OSA'nın istenen yörüngeyi izlemesi sırasında oluşan konum hatalarının mutlak değerlerinin integrali (IAE), hem PID kontrolör için hem de KDPID kontrolör için uygunluk fonksiyonu olarak kullanılmıştır.

### 7.3. Referans Yörüngeler

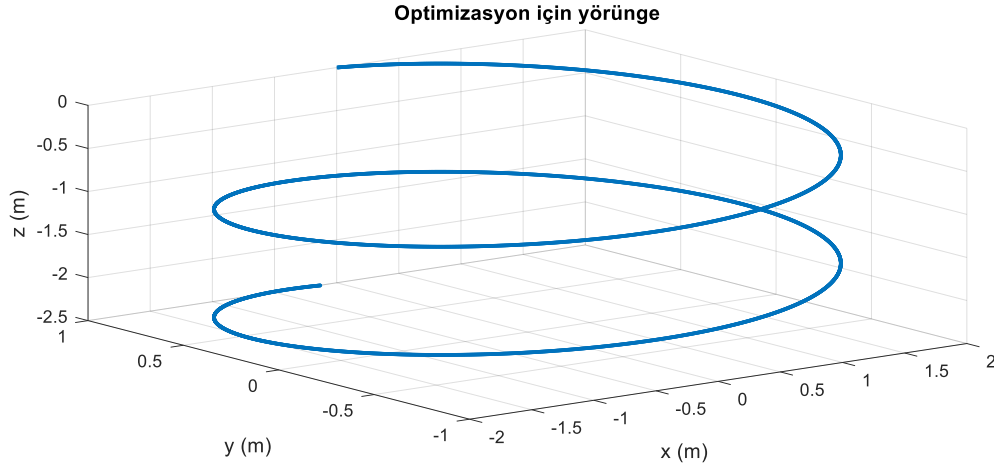
İki tür referans yörünge planlandı. İlki, önce PID kontrolörün sonra KDPID kontrolörün parametrelerinin optimizasyonu için kullanılırken, ikincisi bu parametrelerin testi için kullanıldı. Optimizasyonlar için kullanılan yörünge vektörü  $Ref_1 = [x_r, y_r, z_r, 0, 0, 0]^T$  dir. Bu yörünge için;  $x_r = 2x \sin(0.25t)$ ,  $y_r = \cos(0.25t)$ ,  $z_r = -0.05t$  şeklinde zamana bağlı sürekli fonksiyonlar olarak belirlendiğinde, 3B uzayda izlenecek yörünge Şekil (7.3)'teki gibi spiral formda bir yörüngedir.

OSA'nın ilerleme yönünde konum ve hızı, sapma açısı ve açısal hızı ile dikey düzlemde konumu ve hızı (3-DOF:  $x$ ,  $\psi$ ,  $z$  ve  $u$ ,  $r$ ,  $w$ ) kontrol edilerek Şekil 7.4'teki yörüngeyi takip etmesi istenmektedir. Dolayısı ile PID ve KDPID konum kontrolörü için referans sinyalleri, aracın olması gereken konuma ait  $x$  ve  $z$  koordinatları ile aracın yönelim açısı  $\psi_r$  dir. Yönelim açısı referans değeri, LOS yönlendirme stratejisine göre, aracın dinamik modeli çıkışından anlık olarak ölçülen  $x$  ve  $y$  konum bilgileri ile olması gereken konumun koordinatları  $(x_r, y_r)$  kullanılarak hesaplanmaktadır (Eşitlik 7.4).

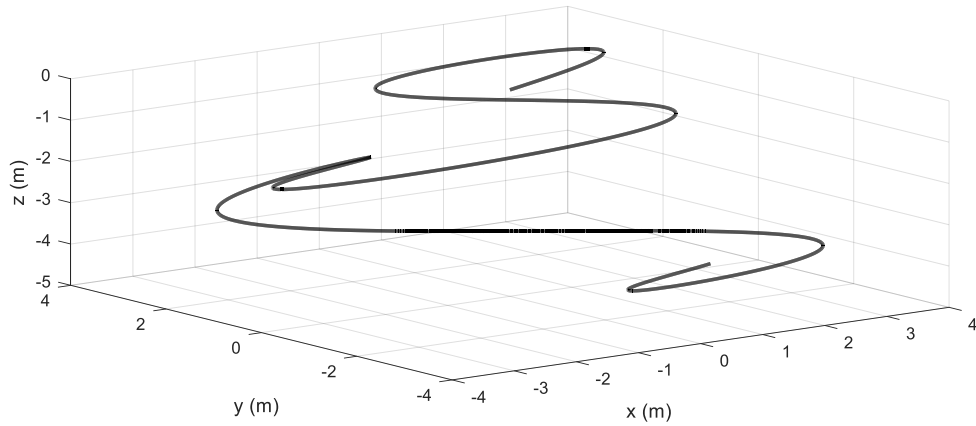
$$\psi_r = \tan^{-1} \frac{y_r - y}{x_r - x} \quad (7.4)$$

SSA-PID ve SSA-KDPID kontrolörlerin optimize edilen parametrelerinin sağlamlık testi için kullanılan ikinci referans yörünge 3B “S” şeklinde bir yörünge olarak planlandı.  $Ref_2 = [x_r, y_r, z_r, 0, 0, 0]^T$ .

Burada,  $x_r = 2 x \sin(0.095t) + 2 x \sin(0.285t)$ ,  $y_r = 2 x \sin(0.048t) + 2 x \sin(0.145t)$ ,  $z_r = -0.05t$  dir. Test için kullanılan ikinci yörünge Şekil 7.5'te görülmektedir.



Şekil 7.4 Optimizasyon benzetimlerinde kullanılan 3B yörünge



Şekil 7.5 Test amaçlı benzetimler için 3B yörünge

#### 7.4. SSA-PID, SSA-KDPID ve GA-KDPID Kontrolörler ile Benzetim Sonuçları

Bu tez çalışmasında, bilgisayar benzetimleri, Matlab/Simulink ortamında yapılmıştır. Belirlenen sistem özellikleri ve parametreler Tablo 7.2'de gösterildiği gibidir.

Bilgisayar benzetimlerinde, su altı aracı RedFin'in dinamik modeli, kontrol edilecek sistem olarak kullanılmıştır. RedFin dinamik modelinin, rota (heading) ve derinlik (depth) kontrolü için önerilen PID ve KDPID kontrolörlerin parametreleri, SSA kodu Matlab'da çalıştırılarak optimize edilmiştir.

Tablo 7.2 Benzetimler için kullanılan sistem özellikleri ve değerleri

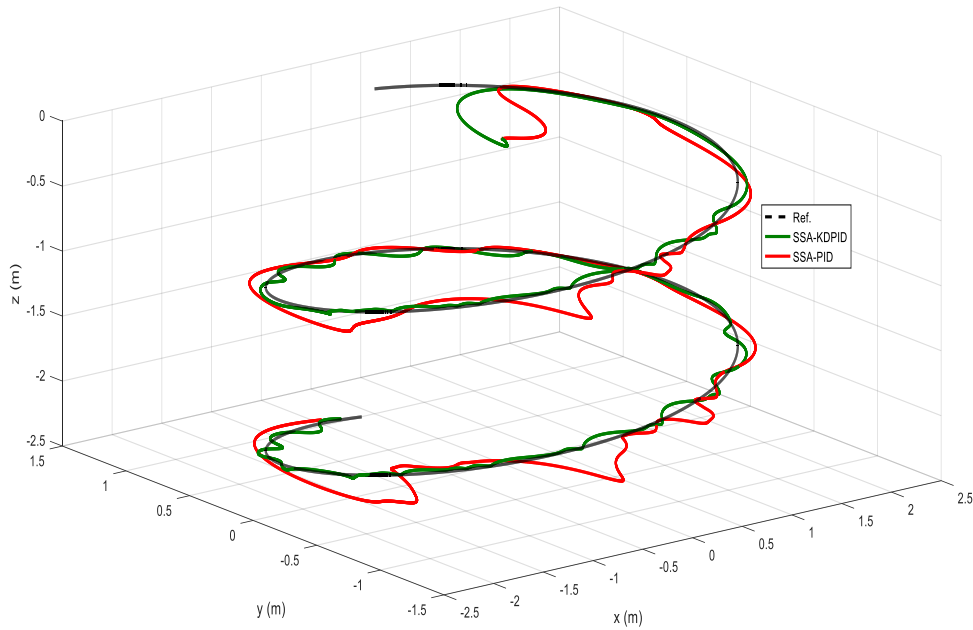
| Parametre                                        | Değeri          |
|--------------------------------------------------|-----------------|
| Örnekleme zamanı                                 | 0.005 s (5 ms)  |
| OSA uzunluğu                                     | 0.42 m          |
| OSA genişliği                                    | 0.26 m          |
| OSA yüksekliği                                   | 0.37 m          |
| Yatay motor orjinlerinin araç merkezine uzaklığı | 0.14 m          |
| Dikey motor orjinlerinin araç merkezine uzaklığı | 0.14 m          |
| Pervane açıklığı ( $P_{prop}$ )                  | 0.05 m/dev.     |
| Kontrol faktörü ( $\lambda$ )                    | 0.04 (Birimsiz) |

Optimizasyon sırasında “spiral” şeklindeki referans yörünge kullanılmıştır. Bu yörünge ile, aracın su yüzeyinden, yaklaşık 2 m yarıçaplı bir daire çizerek 2.5 m derinliğe inmesi beklenmektedir. Benzetim çalışmaları sırasında bozucu etkiler dikkate alınmamıştır. Kontrolörlerin sağlamlık testleri sırasında ise 0.5 W güce, 5 ms periyoda sahip band sınırlamalı beyaz gürültü, bozucu etki olarak kullanılmıştır. Bu bozucu etki, ilerleme ve dönme hareketlerini sağlayan giriş itki kuvvetlerine eklenmiştir.

Geleneksel PID ile KDPID kontrolörlerin yörünge takip performansları karşılaştırmalı olarak Şekil 7.6’ da gösterilmiştir. Aracın izlemesi istenilen referans yörünge kesikli çizgi ile gösterilmektedir. PID kontrolörün performansı kırmızı, KDPID kontrolörün performansı ise yeşil renk ile çizdirilmiştir. Şekil 7.7 ve 7.8’ de ise her iki kontrolör için sırasıyla x ve y konumlarının zamana bağlı değişimleri ile rota açılarının zamanla değişimi görülmektedir. Zaman yanıtı perspektifinden bakıldığında, KDPID’nin klasik PID’ye göre referans yol noktalarına ulaşmada bir miktar hızlı olduğu (KDPID için  $T_s = 6.312$  s PID için  $T_s = 6.785$  s) ve yörünge takibi hata değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir (Tablo 7.3).

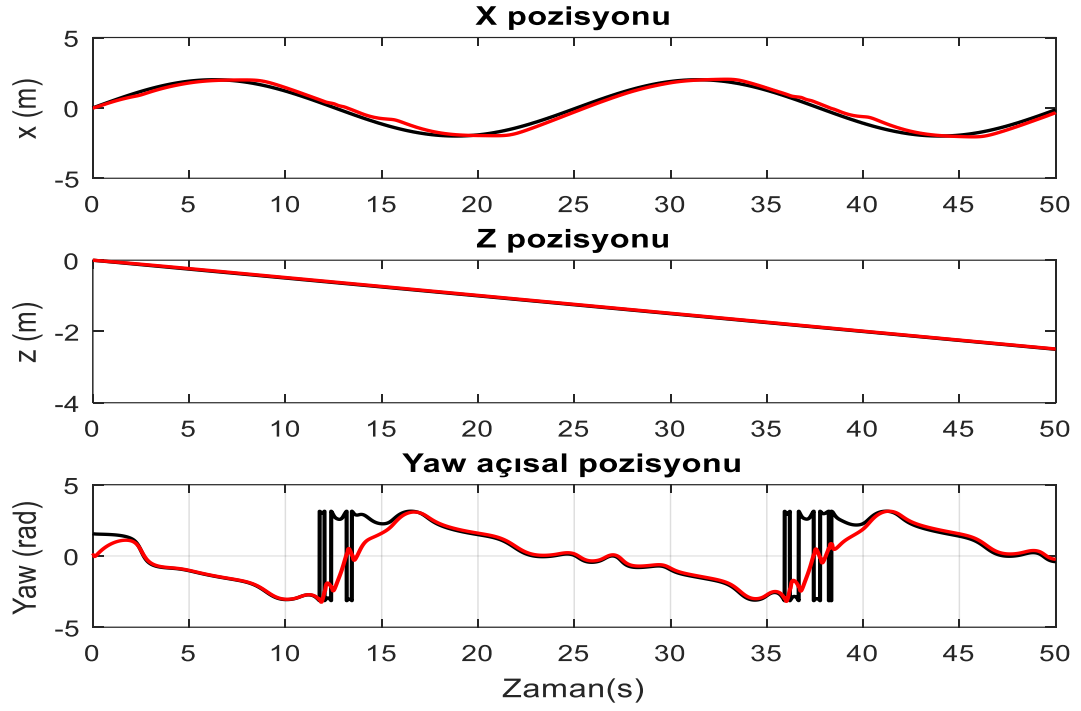
Yörünge boyunca dört serbestlik derecesi için (y-serbestliği, sapma açısının kontrolü ile dolaylı olarak kontrol edilmektedir) takip hataları dikkate alındığında, araç x ekseninde ilerlerken yörünge döne noktalarında sapmalar olmakta ve PID kontrolörün bunu yeterince telafi edemediği görülmektedir. KDPID kontrolörün ise bu problem ile

başarmakta daha başarılı olduğu görülmektedir. PID kontrolör, referans yörüngeyi mükemmel olarak takip edemese de hedef noktaya küçük bir hata ile ulaşmayı başarmıştır. KDPID ile daha hassas bir kontrol elde edilerek hedeflenen noktaya ilerlerken izlenmesi gereken yol daha az hatayla takip edilebilmiştir. Sistem modeli girişindeki kontrol sinyallerini oluşturan itki kuvvetleri ve sapma momentinin, KDPID kontrolörde PID kontrolöre oranla daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Bu da enerji tasarrufu açısından KDPID'nin daha avantajlı olduğuna işaret etmektedir. Sapma (yaw) açısının x ve y eksenlerindeki harekete bağlı oluşu ve aracın y- eksenindeki hareketi için bir kontrolörün olmayışı, yörünge takibi problemini güçleştirmiştir. Bu eksik çalışmaya rağmen SSA ile optimize edilen KDPID kontrolörün performansının tatmin edici olduğunu söyleyebiliriz.

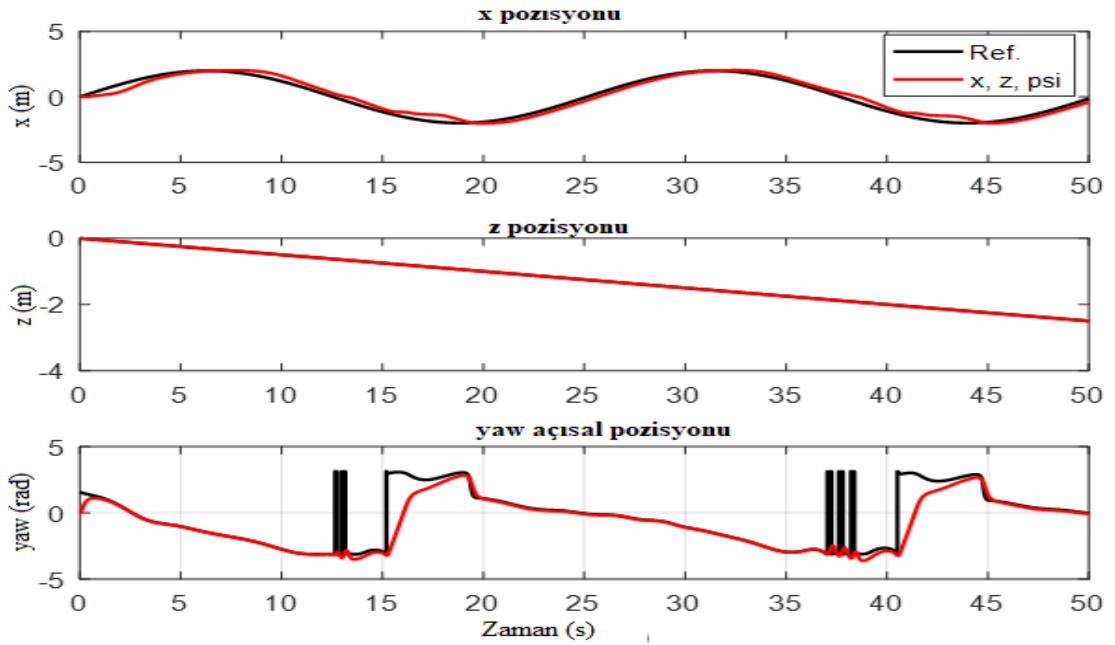


Şekil 7.6 Operasyonel alanda yörünge takibi kontrolü benzetim performansları

Aracın “Spiral” yörünge takibinin SSA-KDPID kontrolör ile kontrolü sırasında, x ve z eksenlerindeki konum değişimleri ile sapma açısı değişimi Şekil 7.8’de görülmektedir.

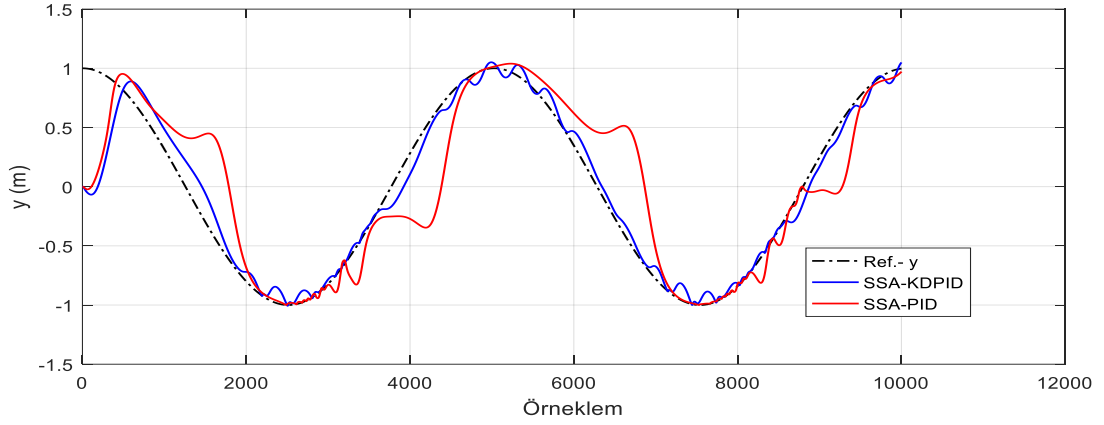


Şekil 7.7 3B spiral yörünge için x ve z eksenlerinde, zamana bağlı pozisyon değişimleri ile sapma açısının değişimi (SSA-PID için)



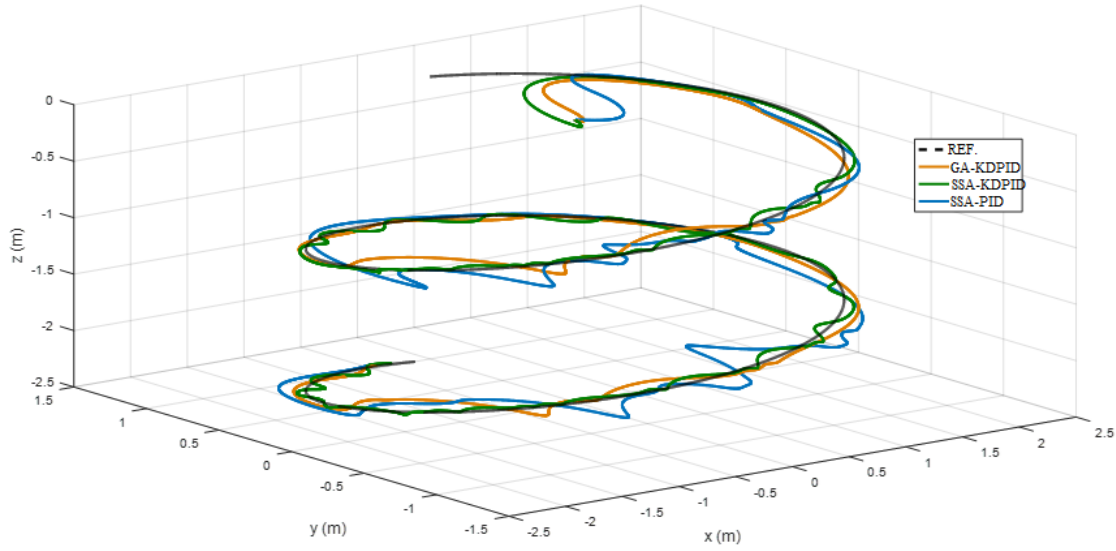
Şekil 7.8 3B spiral yörünge için x ve z eksenlerinde, zamana bağlı pozisyon değişimleri ile sapma açısının değişimi (SSA-KDPID için)

Aracın, yörünge takibi sırasında y-ekseninde yapmış olduğu hareketin, örneklem sayısına (Simülasyon zamanı / örnekleme zamanı) göre değişimleri PID ve KDPID kontrolörler için Şekil 7.9’da görülmektedir.



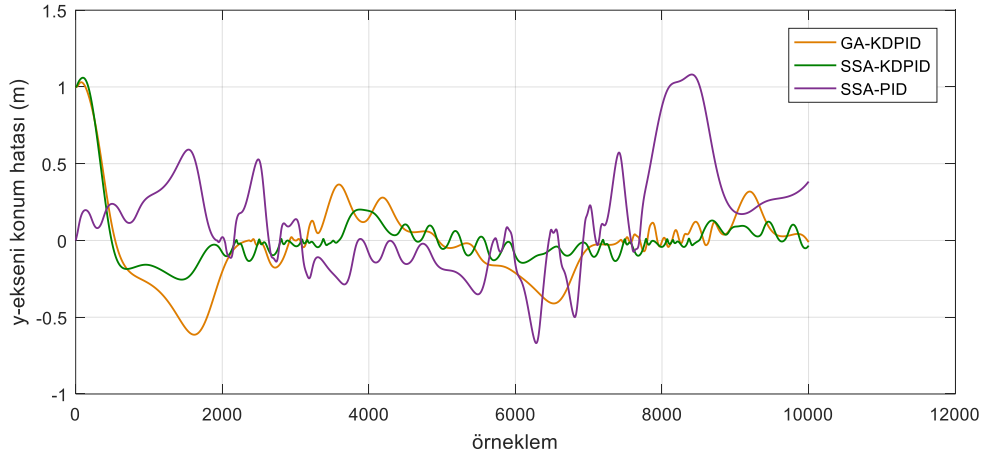
Şekil 7.9 3B spiral yörünge için y eksenindeki hareketin zamana bağlı değişimleri

GA-KDPID, SSA-PID ve SSA-KDPID kontrolörlerin yörünge izleme performansları Şekil 7.10’da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.10 Yörünge izleme performansları

Aracın yörünge izlemesi sırasında oluşan y-ekseni konum hataları SSA-PID, GA-KDPID ve SSA-KDPID kontrolörler için Şekil 7.11’de görülmektedir.

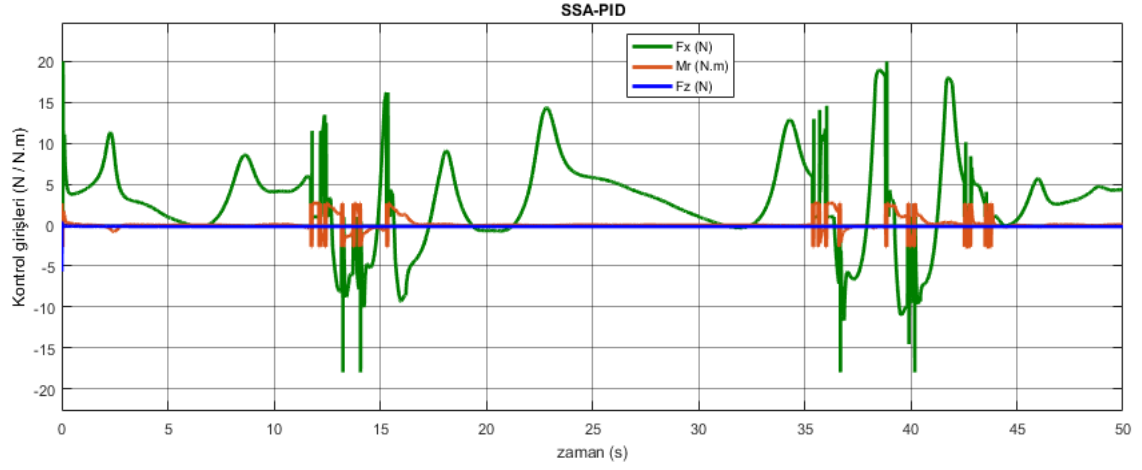


Şekil 7.11 Yörünge takibi sırasında oluşan y-ekseni konum hataları

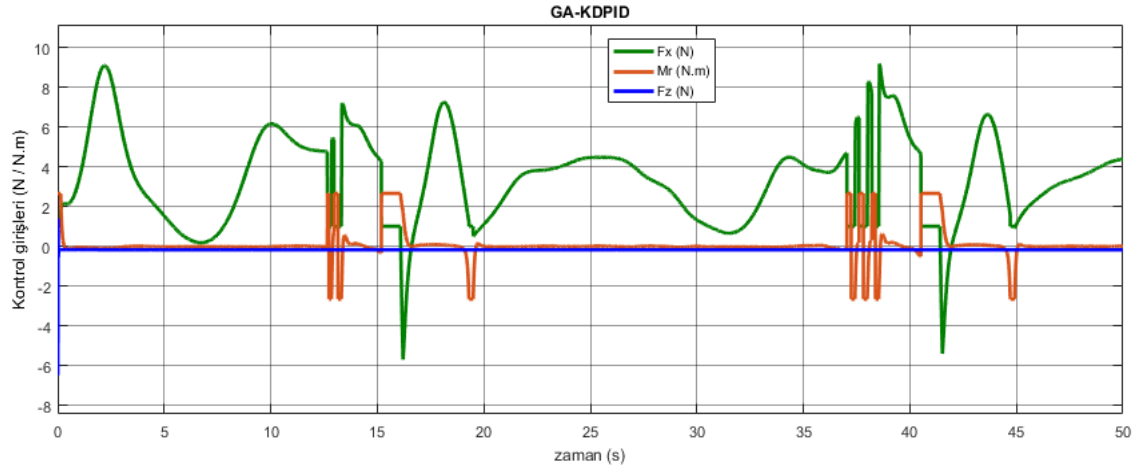
Araç dinamik modelinin, referans yörüngeyi takibi sırasında üretilen kontrol girişleri (itki kuvvetleri ve moment), SSA-PID, GA-KDPID ve SSA-KDPID kontrolörler için Şekil 7.12.a, b ve c’de görülmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere, aracın 3B yörüngeyi takibi sırasında ilerleme ve batma yönlerinde harcamış olduğu kuvvetler ve yönlendirme momenti SSA-PID ve GA-KDPID kontrolörlere göre daha düşük değerlerdedir.

Araç dinamik modelinin, referans yörüngeyi takibi sırasında oluşan konum hatalarının zamana göre değişimleri ise SSA-PID, GA-KDPID ve SSA-KDPID kontrolörler için Şekil 7.13.a, b ve c’de görülmektedir. Şekillerden görüleceği üzere SSA-KDPID kontrolör, 3B yörüngeyi takip sırasında, x-ekseninde, z-ekseninde ve  $\psi$  açısal konumunda diğer kontrolörlere göre daha az konum hatalarına sahiptir. SSA-PID kontrolör, yörünge yön değiştirdiği bölgelerde yörüngeden sapmakta ve tekrar yakalayabilmek için pozitif ve negatif yönlerde büyük açısal konum hataları oluşturmaktayken, SSA-KDPID daha küçük açısal konum hataları ile takibi gerçekleştirebilmektedir.

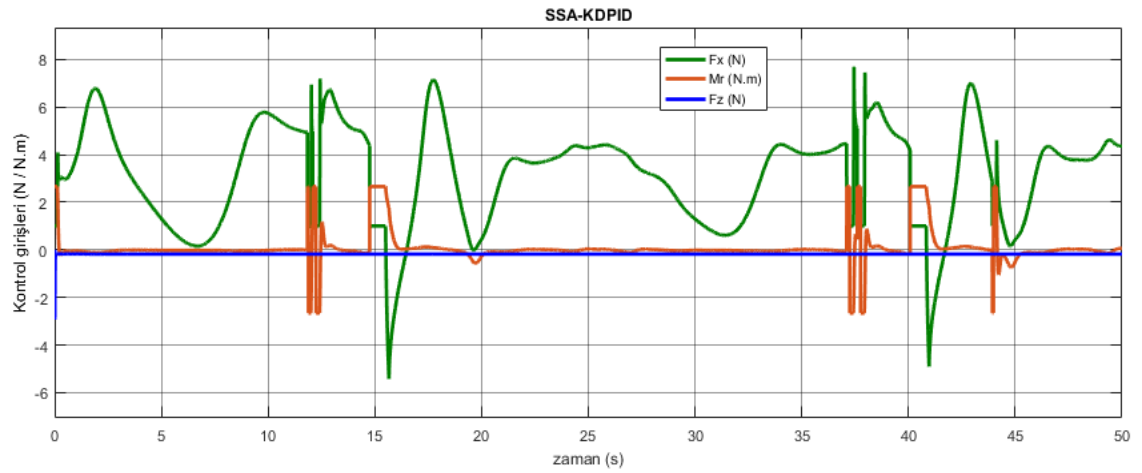
Aracın 3B yörüngeyi takibi sırasında batma yönünde (z-ekseni) oluşan konum hataları, ilerleme (x-ekseni) ve sapma açısı (yaw) konum hatalarına göre çok küçük olduğundan grafiklerde sıfıra yakın değerlerde görülmektedir.



(a)

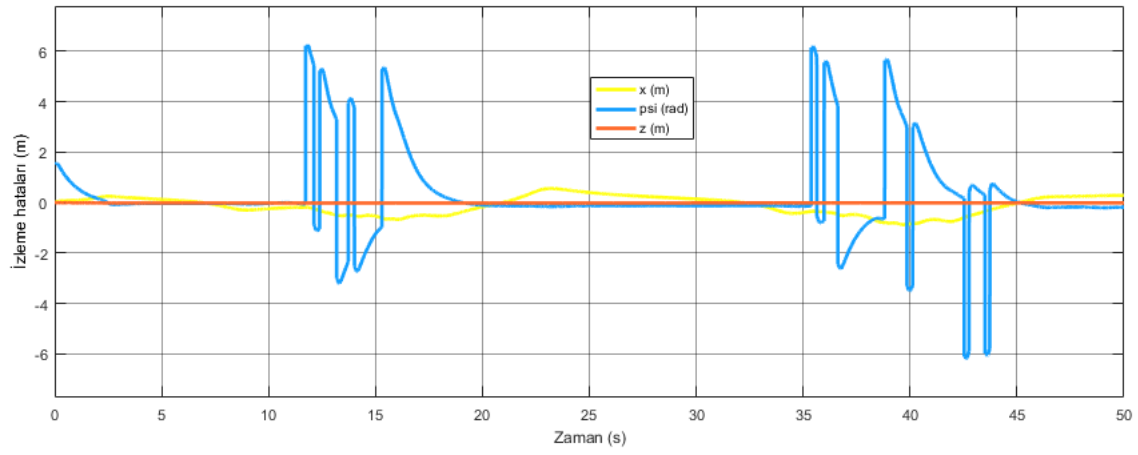


(b)

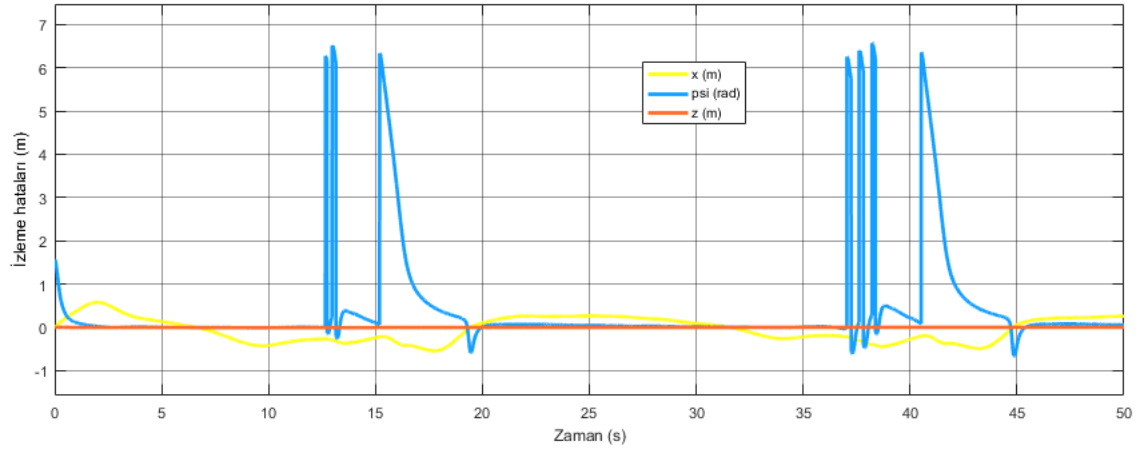


(c)

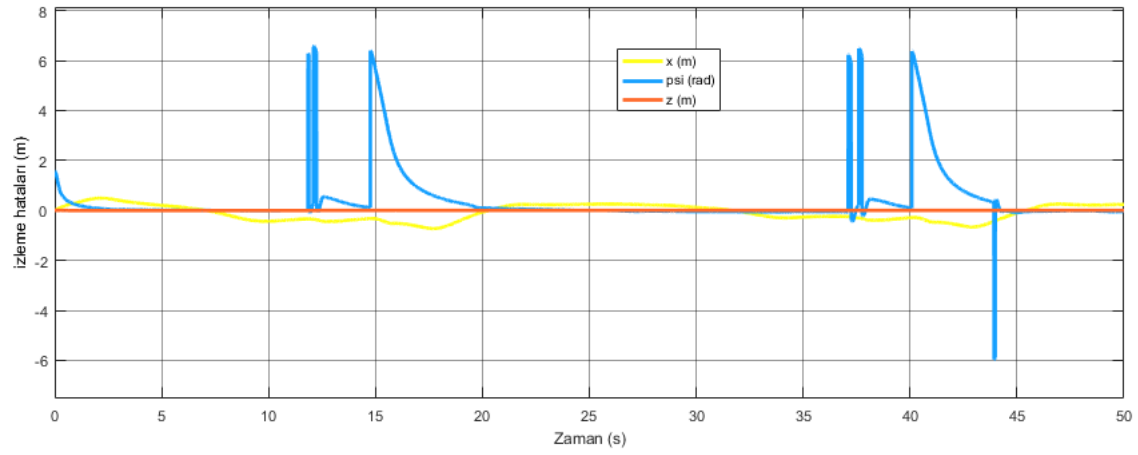
Şekil 7.12 (a) SSA-PID, (b) GA-KDPID, (c) SSA-KDPID için sistem kontrol girişleri



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.13 (a) SSA-PID, (b) GA-KDPID, (c) SSA-KDPID için yörünge takibi konum hataları

Tablo 7.3'te, Her bir serbestlik için yörünge takibi kontrolü benzetimleri sırasında elde edilen konum hatalarının mutlak değerlerinin integrali (IAE) görülmektedir.

Tablo 7.3 Yörünge takibi kontrol benzetimi uygunluk değerleri

|           |              | IAE           |              |               |
|-----------|--------------|---------------|--------------|---------------|
|           | x (m)        | $\psi$ (rad)  | z (m)        | Toplam (IAE)  |
| SSA-KDPID | <b>6.835</b> | <b>12.156</b> | 0.052        | <b>19.043</b> |
| GA-KDPID  | 14.521       | 17.682        | <b>0.043</b> | 32.244        |
| SSA-PID   | 12.84        | 25.685        | 0.164        | 38.689        |

SSA ile optimize edilen PID ve KDPID konum ve hız kontrolörleri için parametreler Tablo 7.4 ve 7.5'te, GA ile optimize edilen KDPID konum ve hız kontrolörleri için parametreler ise Tablo 7.6'da görülmektedir.

Tablo 7.4 3B spiral yörünge takibi için SSA ile optimize edilen konum kontrolörü parametreleri

| Kontrolör | DOF    | $K_p$    | $K_i$  | $K_d$    | $\lambda$ | $\mu$  |
|-----------|--------|----------|--------|----------|-----------|--------|
| PID       | $x$    | 48.0697  | 1.5024 | 90.9206  | 1         | 1      |
|           | $\psi$ | 160.9241 | 0.7392 | 138.4224 | 1         | 1      |
|           | $z$    | 180.6107 | 0.2894 | 170.8414 | 1         | 1      |
| KDPID     | $x$    | 111.3337 | 0.2084 | 5.8210   | 0.8493    | 0.7409 |
|           | $\psi$ | 163.6473 | 2.5379 | 193.0820 | 0.5292    | 0.3109 |
|           | $z$    | 74.6067  | 0.0641 | 194.1150 | 0.8413    | 0.2315 |

Tablo 7.5 3B spiral yörünge takibi için SSA ile optimize edilen hız kontrolörü parametreleri

| Kontrolör | DOF | $K_p$    | $K_i$  | $K_d$   | $\lambda$ | $\mu$  |
|-----------|-----|----------|--------|---------|-----------|--------|
| PID       | $u$ | 199.3526 | 0.6891 | 0.0225  | 1         | 1      |
|           | $r$ | 182.3949 | 0.3332 | 95.8560 | 1         | 1      |
|           | $w$ | 14.3179  | 3.7977 | 0.1414  | 1         | 1      |
| KDPID     | $u$ | 42.1372  | 2.7780 | 3.7500  | 0.2860    | 0.7744 |
|           | $r$ | 199.8966 | 1.9080 | 48.2763 | 0.2341    | 0.8488 |
|           | $w$ | 190.0190 | 2.9832 | 53.4521 | 1.2185    | 0.5642 |

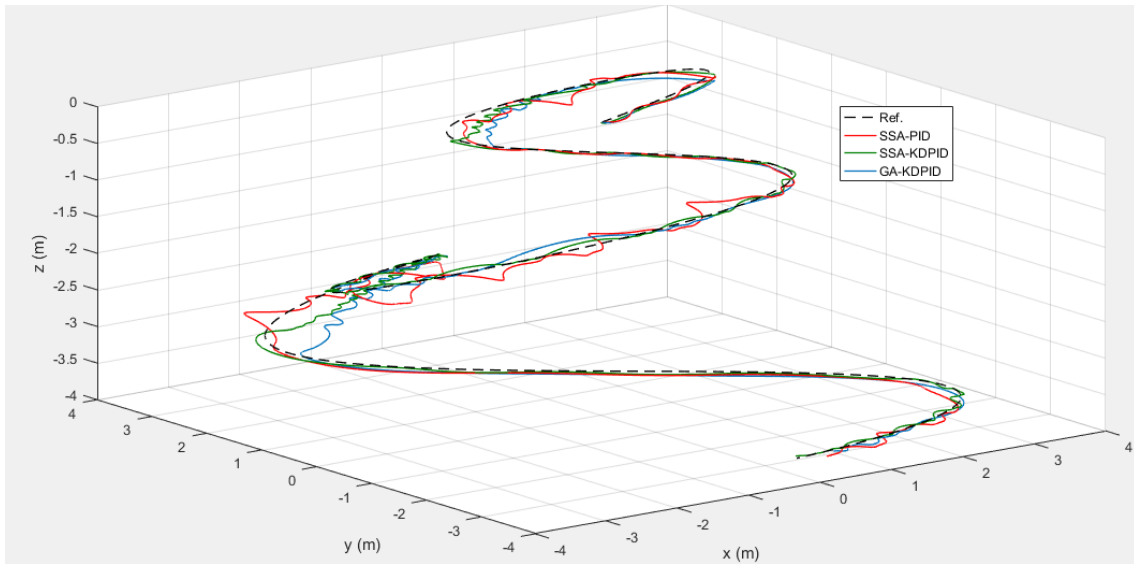
Tablo 7.6 GA ile ayarlanan KDPID kontrolör parametreleri

|       | DOF    | $K_p$    | $K_i$  | $K_d$    | $\lambda$ | $\mu$  |
|-------|--------|----------|--------|----------|-----------|--------|
| Konum | $x$    | 21.1819  | 0.6263 | 14.6572  | 0.0522    | 1.0093 |
|       | $\psi$ | 154.3048 | 3.1447 | 191.4652 | 0.4917    | 0.6677 |
|       | $z$    | 133.6899 | 2.2303 | 0.0476   | 1.1897    | 0.6524 |
| Hız   | $u$    | 173.4345 | 4.0367 | 22.6113  | 0.7857    | 1.0476 |
|       | $r$    | 136.7930 | 1.7216 | 47.3069  | 0.8483    | 0.0645 |
|       | $w$    | 163.6573 | 4.8774 | 168.3609 | 0.7867    | 1.1936 |

Zaman yanıtı perspektifinden bakıldığında, Şekil 7.5, KDPID yanıtının, PID ve KDPID için yükselme zamanlarının sırasıyla  $T_s=6.785s$  ve  $T_s=6.31s$  olacak şekilde referans yol noktalarına ulaşmak için daha hızlı olduğunu göstermektedir. Tablo 7.3'e bakıldığında, kontrol edilen serbestlikler için konum hatalarının mutlak değerlerinin toplamı, KDPID ile kontrolde, PID ile kontrole göre ve GA ile optimize edilen KDPID'ye göre daha düşük değerlerdedir.

## 7.5. Kontrolörün Sağlamlık Testi

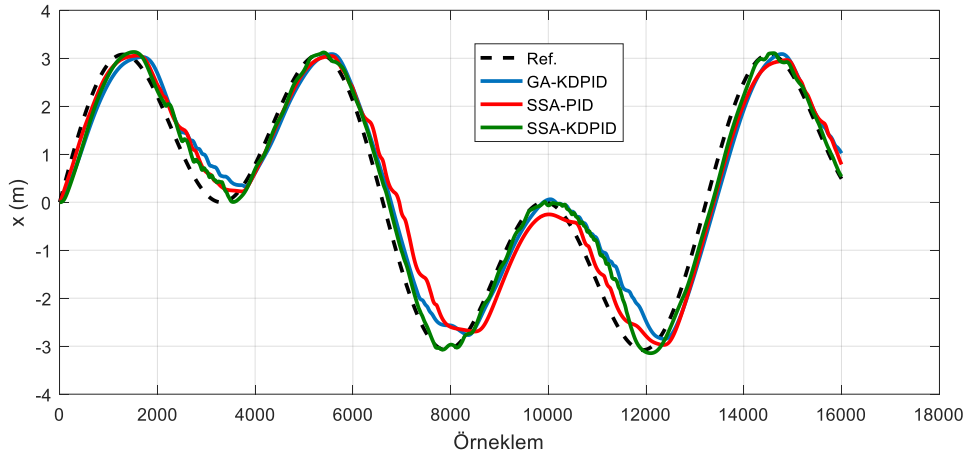
SSA ile optimize edilen PID ve KDPID kontrolörlerin sağlamlıklarının testi için Şekil 7.5'te gösterilmiş olan yörünge ile test amaçlı benzetim yapıldı. SSA ile optimize edilen PID ve KDPID kontrolörler ile GA ile optimize edilen KDPID kontrolöre ait yörünge takibi performansları Şekil 7.14'te görülmektedir. Test amacıyla kullanılan referans yörünge oldukça zorlu bir yörünge olarak seçilmiş ve sistem modeli kontrol girişlerine 0.5W güce, 200 Hz frekansa sahip "Band Sınırlı Beyaz Gürültü" eklenmiştir. Özellikle dönüşlerde her üç kontrolör de yörüngeyi yakalamakta zorlanmaktadır. Dönüşlerden sonra SSA ile optimize edilen KDPID'nin, PID ve GA ile optimize edilen KDPID'ye göre referans yolu tekrar yakalamakta daha başarılı olduğu gözlenmektedir.



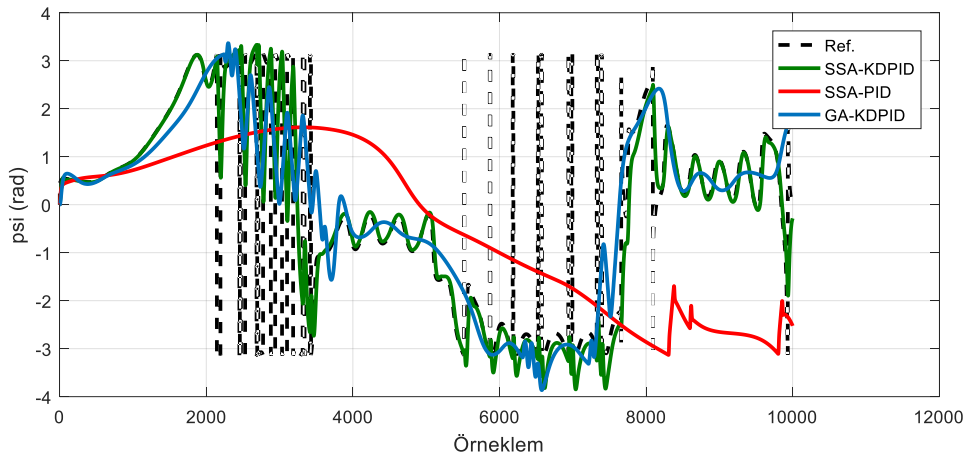
Şekil 7.14 Kontrolörlerin sağlamlık testi için kullanılan test yörüngesini takip performansları

Test yörüngesinin takibi sırasında, SSA-KDPID, SSA-PID ve GA-KDPID kontrolörler için x konumları ile  $\psi$  rota açısının referans değerlere göre zamanla değişimleri Şekil

7.15.a ve b’de görülmektedir. Aracın test yörüngesi takibi sırasında, batma yönünde (z-ekseni) konum değişimleri her üç kontrolör ile yapılan benzetimlerde birbirlerine çok yakın olduğundan gösterilmemiştir. Yörünge takibi sırasında, derinlik kontrolü hatalarının RMS değerleri; SSA-PID için 0.021 m, GA-KDPID için 0.0032 m, SSA-KDPID için 0.00118 m gibi çok küçük değerlerdedir.



(a)



(b)

Şekil 7.15 Test yörüngesi takibi sırasında (a) x-ekseni referansına göre konum performansları (b)  $\psi$  açısıl konum referansına göre performanslar

Şekil 7.13 ve 7.14’ten görüleceği üzere, SSA ile optimize edilen PID kontrolör, aracın görev farklılığı durumunda takip etmek durumunda kalacağı farklı bir yörüngeyi takipte ve çevresel bozucu etkilerin var olduğu durumlar için yeterince iyi bir performans gösterememiştir. SSA-KDPID kontrolör, GA-KDPID kontrolöre göre, referans yörüngeyi daha küçük hata değerleri ve güç tüketimi ile takip etmeyi başaramıştır.

Tablo 7.7’de, SSA-PID, GA-KDPID ve SSA-KDPID kontrolörlerin test yörüngesini takipleri sırasında, 3-DOF için ölçülen konum hatalarının mutlak değerlerinin integrali (IAE) olan uygunluk fonksiyonu değerleri görülmektedir.

Tablo 7.7 Test yörüngesi takibi için konum hatalarının uygunluk değerleri

|           | IAE    |              |       | Toplam (IAE) |
|-----------|--------|--------------|-------|--------------|
|           | x (m)  | $\psi$ (rad) | z (m) |              |
| SSA-KDPID | 11.01  | 28.52        | 0.073 | 39.603       |
| GA-KDPID  | 13.75  | 32.41        | 0.103 | 46.263       |
| SSA-PID   | 16.060 | 67.82        | 0.542 | 84.422       |

Su altı aracı RedFin’in, “spiral” yörüngeyi takibi sırasında, kontrol amaçlı yapılan bilgisayar benzetimleri sonucu oluşan konum hatalarının ortalama değerlerinin karekökü (RMS), SSA-PID, GA-KDPID ve SSA-KDPID kontrolörler için Tablo 7.8’de verilmiştir. Aynı yörüngenin takibi sırasında üretilen itki kuvvetleri ise Tablo 7.9’da gösterilmiştir. Tablo 7.8 ve 7.9’a göre çizdirilmiş olan Şekil 7.16’daki sütun grafiklerden de görüleceği üzere, SSA-KDPID kontrolör, daha az itki kuvvetleri ve momenti harcayarak referans yörüngeyi daha az hata ile takip edebilmiştir. Bu da, su altı araçları için önemli bir konu olan enerjiyi etkin kullanmak açısından önemli bir avantajdır.

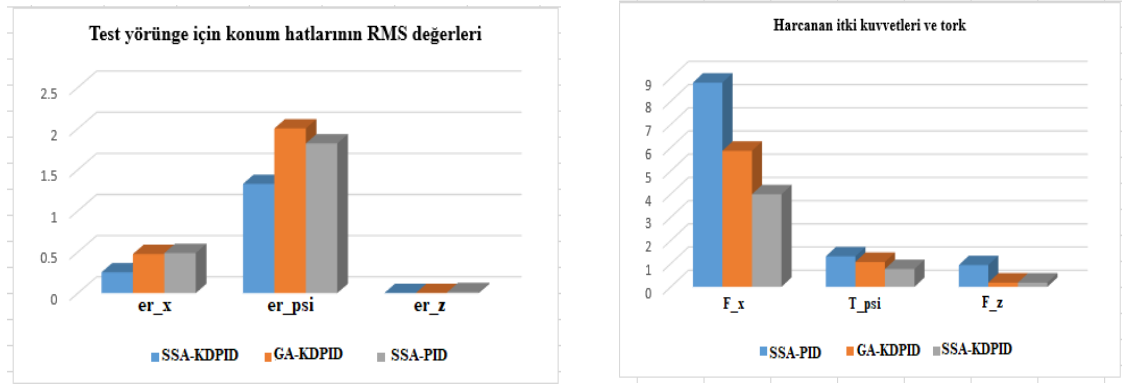
Tablo 7.8 Test yörünge için konum hatalarının RMS değerleri

|           | Konum hataları RMS (m) |               |               |               |
|-----------|------------------------|---------------|---------------|---------------|
|           | x (m)                  | y (m)         | z (m)         | $\psi$ (rad)  |
| SSA-KDPID | <b>0.2527</b>          | <b>0.1475</b> | <b>0.0016</b> | <b>1.3273</b> |
| GA-KDPID  | 0.4750                 | 0.2548        | 0.0018        | 2.0013        |
| SSA-PID   | 0.4869                 | 0.3695        | 0.01251       | 1.8192        |

Tablo 7.9 Test yörüngesinin takibi için üretilen kuvvetler ve momentlerin RMS değerleri

|           | İtke kuvvet ve momentleri (N/N.m) RMS |                        |                    |
|-----------|---------------------------------------|------------------------|--------------------|
|           | F <sub>x</sub> (N)                    | T <sub>psi</sub> (N.m) | F <sub>z</sub> (N) |
| SSA-KDPID | 3.992                                 | 0.7695                 | 0.182              |
| GA-KDPID  | 5.864                                 | 1.074                  | 0.184              |
| SSA-PID   | 8.802                                 | 1.314                  | 0.936              |

SSA-KDPID kontrolör ile yörünge takibi kontrolünde, iki yatay iticinin üretmiş oldukları toplam kuvvet 3.992 N iken bu değer G-KDPID kontrolörde 5.864 N ve SSA-PID kontrolörde 8.802 N’dur. Aracın, yörünge takibi için yapması gereken rota hareketleri için yatay motorlar tarafından üretilen moment değerleri ise SSA-KDPID kontrolör için 0.7695 N.m, GA-KDPID için 1.074 N.m, SSA-PID içinse 1.314 N.m’dir.



Şekil 7.16 SSA-PID, GA-KDPID ve SSA-KDPID yörünge takibi konum hatalarının ve üretilen itki kuvvetlerinin karşılaştırılması

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 4 serbestlik dereceli bir su altı aracının bilgisayar destekli tasarımı, tam dinamik modelinin çıkarılması, doğrulanması ve doğrulanan model kullanılarak optimizasyon algoritmalarına dayalı tasarlanan kontrolörler ile yörünge takip kontrolü gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, aracın CAD modeli çıkartılmış, daha sonra bu modelin HAD analizleri yapılarak hidrodinamik parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan parametreler, deneysel çalışmalar ve analitik hesaplama yöntemleri ile doğrulanmıştır. Bu hesaplanan parametreler kullanılarak su altı aracının tam dinamik modeli elde edilmiştir.

Dinamik modeli çıkarılan aracın verilen bir yörüngeyi takip edebilmesi için optimizasyon algoritmalarına dayalı KDPID kontrolör tasarlanmıştır. Ayrıca, tasarlanan kontrolörün başarımını karşılaştırmak amacıyla PID kontrolör tasarlanmış ve sağlamlık testleri için farklı yörünge benzetim çalışmaları yapılmıştır. KDPID kontrolörün parametrelerinin optimizasyonu için kullanılan Salp Sürü Algoritmasının başarımını karşılaştırmak amacıyla, aynı koşullar altında KDPID'nin parametreleri Genetik Algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Kontrolörlerin sağlamlık testi için farklı bir yörünge ve bozucu etki kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, konum hataları ve güç tüketimi açısından önerilen kontrolör için tatmin edici düzeydedir.

Ayrıca, bu tez çalışmasıyla sağlanan katkıları, aşağıdaki başlıklar altında açıklayabiliriz:

- Mekanik sistem tasarımı ile aracın elektronik bileşenlerini, su geçirmez bir ortamda muhafaza etmek mümkün olmuştur. Korozyona karşı dayanıklılık sağlanarak, tuzlu su ortamında çalışma güvenliği elde edilmiştir
- Aracın statik ve dinamik dengesi sağlanarak kararlı çalışması garantilenmiştir.
- Gelecekteki görevler için modüler ve genişletilebilir olma yeteneğine sahiptir.
- Elektriksel sistem tasarımı ve geliştirmesi, RedFin'i otonom olarak kontrol etme potansiyeli taşıyan bir sistem olarak ortaya çıkarmıştır. Elektrik sistemi, bir Octomini kontrolcü kartı, bir dizi sensör, bir güç dağıtım sistemi, bir görüntüleme sistemi, ve bir iletişim sistemi içermektedir.
- RedFin'in kontrolünde kullanılmak üzere bir dinamik model belirlendi. Ancak, dinamik modelin çok karmaşık olduğu ve birçok parametrenin belirlenmesinin çok zorlu ve zaman alıcı bir süreç olacağı tespit edildi. Bunun üzerine, gerekli sistem

tanımlamasını yapmak için oldukça karmaşık ve pahalı ekipmanın gerekeceği ortaya çıktı. Belirlenmesi gereken parametre sayısını en aza indirmek ve bu sayede genel modellemeyi basitleştirmek amacıyla, RedFin'in dinamikleri üzerine bir dizi sadeleştirme yaklaşımı yapılmıştır. Aracın mekanik yapısının simetrikliği ve dengede çalışıyor olması, bu yaklaşımların yapılmasına olanak tanımıştır. RedFin'in dinamik modeli, sadece dalgalanma (surge), yukarı-aşağı hareket (heave) ve sapma (yaw) parametrelerinin bulunmasını gerektiren daha basit bir modele indirildi. Bu da, sistem tanımlama sürecini kolaylaştırdı.

- Her motorun, elde edilebilir hız ayarlarında itme çıkışları ölçüldü. Motorların itme çıkış değerleri aynı zamanda sistem tanımlama sürecinde parametrelerin hesaplanmasına izin verdi. İtme ölçümünün sonuçları, RedFin'in nihai otonom kontrolünde son derece yararlı olacaktır.
- Bir dizi deney yapılarak, RedFin'in pozitif yönlü (surge), yukarı-aşağı (heave) ve sapma (yaw) hareketleri için sönümleme parametreleri bulundu. Negatif sapma sönümleme parametreleri de bulundu, ancak negatif surge ve heave parametreleri, aracın yüksek çözünürlüklü hız sensörü olmadığı için belirlenemedi.
- RedFin'i kontrol etmek için bir kontrol tekniği olarak PID yörünge izleme kontrolü belirlendi. PID kontrolörü, Kesir dereceli PID kontrolöre genişleterek çok daha hassas bir kontrolör oluşturuldu. Dinamik model ve RedFin için bulunan parametreler kullanılarak yörünge izleme kontrolörü üzerinde kontrol benzetimleri gerçekleştirildi. Benzetimler dikkate değer sınırlamalara sahipti, ancak kazançları SSA ile optimize edilen KDPID'nin RedFin'i kontrol etmede kullanılabilir potansiyele sahip olduğunu gösterdi.

### 8.1. Gelecek Çalışmalar için Öneriler

RedFin'in mekanik yapısı daha hidrodinamik hale getirilebilir. Bu sayede, sürtünmeden kaynaklı etkiler azaltılarak aracın hızı artırılabilir, böylece genel güç tüketimi azaltılabilir ve verimlilik artırılabilir.

RedFin'in itki sistemini oluşturan iticilerin sayısını artırmak, güç tüketimi açısından bir dezavantaj olsa da hareket serbestliklerini artıracığından zorlu görevlere ait yörüngelerin takibini kolaylaştıracaktır. İticilerin, araç üzerindeki yerleşimlerinin vektörel olması

holonomik hareket sağlayacağı için diğer bir çözüm olarak önerilebilir. Aracın mevcut tasarımı ile daha başarılı yörünge takibi kontrolü için LOS yönlendirme yaklaşımı yerine, bu yaklaşımın iyileştirilmesine dayalı yeni kontrol yöntemleri önerilebilir.

RedFin'in başarılı bir şekilde kontrol edilebilmesi için mevcut basınç sensörünün çözünürlüğü yeterli değildir. Nispeten yüksek çözünürlüklü basınç ölçerlere ihtiyaç vardır. Ayrıca yüksek çözünürlüklü hız sensörleri ilave edilmelidir. Hız sensörü, sistem tanımlamasına büyük ölçüde yardımcı olacak ve aracın çok daha hassas kontrol edilmesine katkı sağlayacaktır.

Sapma hızını belirlemek için bir jiroskop da önerilmektedir. Sapma hızı, sapma açısının türevi sayesinde dolaylı olarak hesaplanabilir; ancak kontrolün daha hassas olabilmesi için doğrudan bir sensör okumasına ihtiyaç vardır. Ayrıca, aracın ataletsel parametreleri için sistem tanımlamasının doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için ivme ölçerlerin temin edilmesi önerilir.

Araç testini kolaylaştırmak ve zamanı azaltmak için, araç üzerindeki bileşenlerden gerçek zamanlı geri bildirim alabilen bir iletişim sistemi gereklidir. Bu sistem, su altı testleri sırasında araçtan alınan verileri iletebilmeli, dış kontrolörden gelen komutları araca iletebilmeli ve parametreleri değiştirebilmelidir. Ayrıca, iletişim sistemi için gerçek zamanlı motor, sensör ve kontrolör verilerini gösteren bir arayüz geliştirilmelidir.

Bu çalışmada önerilen SSA algoritması, hem hız hem de konum kontrolörlerinin optimizasyonu için tek bir uygunluk fonksiyonu kullanmaktadır. Bu uygunluk fonksiyonu, konum hatalarının mutlak değerlerinin integralidir. Gelecek çalışmalarda, hem hız hatalarını hem de konum hatalarını dikkate alan optimizasyon çalışmaları yapılarak kontrolör sağlamlığı daha da iyileştirilebilir.

Araç üzerindeki gelecek çalışmaların çoğu, gelişmiş bir sensör seti uygulamak, otonom kontrol sistemini geliştirmek ve alt sistemleri daha da geliştirmek üzerine olmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Abbas, N. H., Sami, A. R. (2017). Tuning of PID Controllers for Quadcopter System Using Hybrid Memory Based Gravitational Search Algorithm – Particle Swarm Optimization. *International Journal of Computer Applications*, 172(4), 9-18.
- Abbassi, R., Abbassi, A., Heidari, A.A., Mirjalili, S. (2019). An Efficient Salp Swarm Inspired Algorithm for Parameters Identification of Photovoltaic Cell Models. *Energy Convers Managing*, 179(2), 362–372.
- Abdelhamed, A. M., Badran, E. A. (2022). An Improved PID Control Scheme for DC Servo Motor Using Salp Swarm Algorithm. *23rd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 2022.
- Abualigah, L., Shehab, M., Alshinwan, M., Alabool, H. (2020). Salp Swarm Algorithm: A Comprehensive Survey. *Neural Computing and Applications*, 32(15), 11195–11215. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04629-4>
- Abusnaina, A.A., Ahmad, S., Jarrar, R., Mafarja, M. (2018). Training Neural Networks Using Salp Swarm Algorithm for Pattern Classification. *In Proceedings of the 2nd International Conference on Future Networks and Distributed Systems*, Amman, Jordan, May 2018.
- Amini, F. J., Sabzpooshani, M. (2021). An Approach for the Estimation of Hydrodynamic Coefficients of an Underwater Vehicle in Off-Design Velocities. *J. Mar. Sci. Technol*, 26(3), 368–381.
- Anonsen, K., B., Hagen, O., K. (2010). An Analysis of Real-Time Terrain Aided Navigation Results From a Hugin AUV. *In Oceans*, IEEE, 54(6), 1–9.
- Antonelli, G., (2007). On the Use of Adaptive/Integral Actions for Six Degrees of Freedom Control of Autonomous Underwater Vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 32(2), 300–312.
- Aulinas, J., Petillot, Y., R. (2008). The Slam Problem: A Survey. *In CCIA*, pp. 363–371.
- Aulinas, J., Petillot, Y., R. (2011). Vision-Based Underwater Slam for the Sparus AUV. *In 10th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*, Berlin, Germany, 2011.
- Bahr, A., Leonard, J.J., Fallon, M. F. (2009). Cooperative Localization for Autonomous Underwater Vehicles. *International Journal of Robotics Research*, Springer Berlin Heidelberg, 28(6), 714–728.
- Benjamin, M., R., Leonard, J., J. (2009). An Overview of Moos-ivp and a Brief Users Guide to the Ivp Helm Autonomy Software.

- Bethencourt, A. (2014). Interval Analysis for Swarm Localization. Application to Underwater Robotics. Ph.D. Dissertation, Universite de Breatgne Occidental, Brest, France, 2014.
- Bhookya, J., Jatoth, R. K. (2019). Optimal FOPID/PID Controller Parameters Tuning for the AVR System Based on Sine–Cosine-Algorithm. *Evolutionary Intelligence*, 12(4), 725–733. <https://doi.org/10.1007/s12065-019-00290-x>
- Brown, R., G., Patrick, Y., H. (1992), Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering. New York: Wiley, 1992, vol. 3.
- Budiyono, A. (2009). Advances in Unmanned Underwater Vehicles Technologies: Modeling, Control and Guidance Perspectives. In *Indian Journal of Marine Sciences*, 38(2), 282-295.
- Caiti, A., Calabro, V. (2013). Underwater Communication and Distributed Localization of AUV Teams. In *Oceans-bergen, MTS/IEEE*, 2013, 1–8.
- Campa, G., Innocenti, M., Nasuti, F. (1998). Robust Control of Underwater Vehicles: Sliding Mode Control vs. Multy Synthesis, In *Proceedings of the IEEE Oceanic Engineering Society OCEANS'98*, Nice, France, 1998, pp. 1640–1644.
- Carreno, S., Wilson, P. (2010). A Survey on Terrain Based Navigation for AUVs. In *OCEANS 2010 IEEE*, 2010, pp. 1–7.
- Carreras, M., Candela, C. and Ribas, D. (2013), Sparus II, Design of a Lightweight Hovering AUV. *Martech 2013 5th International Workshop on Marine Technology*, SARTI, 2013.
- Chocron, O., Delaleau, E. (2019). Trajectory-Based Synthesis of Propulsion Systems for Fixed-Thrusters AUVs. In V. Arakelian & P. Wenger (Eds.), *ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control*, (584), 380–391. Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-78963-7\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-319-78963-7_48)
- Chang, M., Chang, W., Liu, H., H. (2003). Model-Based Fuzzy Modeling and Control for Autonomous Underwater Vehicles in the Horizontal Plane. *Journal of Marine Sciences and Technology*, 11(2), 155–163.
- Chu, Z., Zhu, D., Yang, S.X. (2016). Observer-Based Adaptive Neural Network Trajectory Tracking Control for Remotely Operated Vehicle. *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.*, 28(1), 1633–1645.
- DNV-RP-H103, (2023). Modelling and Analysis of Marine Operations. <https://exchange.dnv.com/publishing/Codes/download.asp?url=2010-04/rp-h103.pdf>, 25.09.2014
- Eidsvik, O. A. (2018). Identification of Hydrodynamic Parameters for Remotely Operated Vehicles. Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology.

- El-Fakdi, A., Carreras, M. (2008). Policy Gradient Based Reinforcement Learning for Real Autonomous Underwater Cable Tracking. *IROS. IEEE/RSJ International Conference*, pp. 3635–3640.
- Elmokadem T., Zribi M., Youcef-Toumi K.(2019). Control for Dynamic Positioning and Way-point Tracking of Underactuated Autonomous Underwater Vehicles Using Sliding Mode Control. *J. Intell. Robot. Syst.*, 95(1), 1113–1132.
- Eng, Y. H., Lau, M., Chin, C. (2014). Added Mass Computation for Control of an Open-Frame Remotely-Operated Vehicle: Application Using Wamit and Matlab. *Journal of Marine Science and Technology*, 22(4), 405–416.
- Eng, Y., H., Lau, W., S. (2008). Identification of the Hydrodynamics Coefficients of an Underwater Vehicle Using Free Decay Pendulum Motion. *In International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*, Hong Kong, 2008.
- Erenoglu, I., Eksin, I., Yesil, E., Guzelkaya, M. (2006). An Intelligent Hybrid Fuzzy PID Controller. *ECMS 2006 Proceedings Edited by: W. Borutzky, A. Orsoni, R. Zobel*, 62–66. <https://doi.org/10.7148/2006-0062>
- EuRathlon, Outdoor Robotics Challenge for Land, Sea and Air, (Ziyaret tarihi: 15/09/2022), [Online]. Available: <http://www.eurathlon.eu/site/>
- Fallon, M., F., Georgios, P. (2010). Cooperative AUV Navigation Using a Single Maneuvering Surface Craft. *International Journal of Robotics Research*, 29(12), 1461–1474.
- Faris, H., Mirjalili, S., Aljarah, I., Mafarja, M., Heidari, A. A. (2020). Salp Swarm Algorithm: Theory, Literature Review, and Application in Extreme Learning Machines. *Nature-Inspired Optimizers*, 811, 185–199). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12127-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12127-3_11)
- Ferreira, B., Pinto, M. (2009). Hydrodynamic Modeling and Motion Limits of AUV Mares. *In 35th Annual Conference of IEEE on Industrial Electronics*, Porto, 2009, 2241–2246.
- Ferreira, B., Matos, A., Cruz, N. (2012). Modeling and Control of Trimares AUV. *In 12th International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, Portugal, 2012, 57–62.
- Fossen, T., I., Sagatun, S. (1991). Adaptive Control of Nonlinear Underwater Robotic Systems. *In IEEE International Conference on Robotic and Automation ICRA '91*, Sacramento CA, USA, 1991, 1687–1695.
- Fossen, T., I. (1995). Underwater Vehicle Dynamics. Book TSI Press, Albuquerque.
- Fossen, T. I. (2002), Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics Trondheim.

- Gao, T., Wang, Y., Pang, Y., Chen, Q., Tang, Y. (2018). A Time-Efficient CFD Approach for Hydrodynamic Coefficient Determination and Model Simplification of Submarine. *Ocean Eng.* 154(6), 16–26.
- Gibson, S.B., Stilwell, D.J. (2018). Hydrodynamic Parameter Estimation for Autonomous Underwater Vehicles. *IEEE J. Ocean Eng.*, 2018, 45, 385–394.
- Hadi, N., Ramz, A. (2017). Tuning of PID Controllers for Quadcopter System using Hybrid Memory based Gravitational Search Algorithm – Particle Swarm Optimization. *International Journal of Computer Applications*, 172(4), 9–18. <https://doi.org/10.5120/ijca2017915125>.
- Hammad, M. M., Elshenawy, A. K., El Singaby, M. I. (2017). Trajectory Following and Stabilization Control of Fully Actuated AUV Using Inverse Kinematics and Self-Tuning Fuzzy PID. *PLOS ONE*, 12(7), 1-35.
- Hasan, A. M., Samsudin, K. (2009). A Review of Navigation Systems Integration and Algorithms. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(2), 943–959.
- Hildebrandt, M., Hilljegerdes, J. (2010). Design of a Versatile AUV for High Precision Visual Mapping and Algorithm Evaluation. *Autonomous Underwater Vehicles, IEEE/OES*, pp. 1–6.
- Indiveri. G. (1998). Modelling and Identification of Underwater Robotics Systems PhD thesis, University of Genova, AUV Thesis, AUV: ROMEO
- Islam, H., Soares, C.G. (2018). Estimation of Hydrodynamic Derivatives of a Container Ship Using PMM Simulation in Open FOAM. *Ocean Eng.*, 164, 414–425.
- Johansen, T., A., Fossen, T., I. (2013). Control Allocation: A survey. *Automatica*, 49(5), 1087–1103.
- Kılıcı, S. B., (2020). Dört Serbestlik Dereceli Su Altı Aracının Dinamik Modellemesi ve Benzetim Çalışmaları. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 619808.
- Kondo, H., Ura, T. (2004). Navigation of an AUV for Investigation of Underwater Structures. *Control Engineering Practice*, 12(12), 1551–1559.
- Lamas, A., Pez-Pe, F., L., Duro, R., J. (2009). A Hybrid Approach for Designing the Control System for Underwater Vehicles. *In 4th International Conference on Hybrid Artificial Intelligent Systems*, Salamanca, Spain, pp. 88–95.
- Lapierre, L., Bruno, J. (2008). Robust Nonlinear Path-Following Control of an AUV. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 33(2), 89–102.
- LeHardy, P. K., Moore, C. (2014). Deep Ocean Search for Malaysia Airlines Flight 370. In *Oceans-St. John's, IEEE.*, Sep. 2014, 1–4.

- Li, J., H., Lee, P., M., Jun, B., H. (2004). An Adaptive Nonlinear Controller for Diving Motion of an AUV. In Proceedings of MTTs/IEEE OCEANS'04, pp. 282 -286.
- Liu, H.L., Huang, T.T. (1998). Summary of DARPA SUBOFF Experimental Program Data, Technical Report, Naval Surface Warfare Center Carderock Div Bethesda Md Hydromechanics: Bethesda, MD, USA.
- Liu, S., Y., Wang, D. (2005). Nonlinear Output Feedback Controller Design for Tracking Control of Odin in Wave Disturbance Condition. In Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE, Washington, DC: IEEE, 1–3.
- Maalouf, D., Tamanaja, I. (2013). From PD to Nonlinear Adaptive Depth-Control of a Tethered Autonomous Underwater Vehicle. In *IFAC Joint conference'2013: 5th Symposium on System Structure and Control*, Grenoble, France, 2013.
- Maalouf, D. (2014). Contribution to Nonlinear Adaptive Control of Low Inertia Underwater Robots. Ph.D. Dissertation, University of Montpellier, France.
- Mallios, A., Ridao, P. (2011). Navigating and Mapping with the Sparus AUV in a Natural and Unstructured Underwater Environment. In OCEANS IEEE, no. 1-7.
- Marzbanrad, A., R., Eghtesad, M. and Kamali, R. (2011). A Robust Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller for Trajectory Tracking of Rovs, In *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Orlando, FL, USA, 2011, 2863–2869.
- McPhail, S., D., Pebody, M. (1997). Autosub-1. A Distributed Approach to Navigation and Control of an Autonomous Underwater Vehicle. In *7th International Conference on Electronic Engineering in Oceanography*, 173(19), 21-31, Southampton, England, 1997.
- Mirhosseini, A., A., Aguiar, A., P., Yazdanpanah, M., J. (2011). Seabed Tracking of an Autonomous Underwater Vehicle with Nonlinear Output Regulation, In *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Orlando, FL, USA, 2011, 3928–3933.
- Oliveira, P. (2002), Periodic and Nonlinear Estimators with Applications to the Navigation of Ocean Vehicles, Ph.D. dissertation, Instituto Superior Tcnico Lisbon, Portugal.
- Ostafichuk, P., M. (2004). AUV Hydrodynamics and Modelling for Improved Control, Ph.D. dissertation, University of British Columbia, Canada.
- Pascoal, A., Kaminer, I., Oliveira, P. (2000). Navigation System Design Using Time Varying Complementary Filters, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 36(4), 1099–1114.

- Paull, L., Saeedi, S. (2014). AUV Navigation and Localization: A Review. In *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1), 131–149.
- Perrier, M., Canudas-De-Wit, C. (1996). Experimental Comparison of PID vs. PID Plus Nonlinear Controller for Subsea Robots. *Autonomous Robots*, 3(2), 195–212.
- Phillips, A., Furlong, M., Turnock, S.R. (2022). The Use of Computational Fluid Dynamics to Determine the Dynamic Stability of an Autonomous Underwater Vehicle. Available online: [https://eprints.soton.ac.uk/48786/1/ABP\\_NUTTS.pdf](https://eprints.soton.ac.uk/48786/1/ABP_NUTTS.pdf) (accessed on 26 July 2022).
- Piotrowski, A., P., Napiorkowski, J., J., Piotrowska, A., E. (2020). Population Size in Particle Swarm Optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 58(2), 1–18. ISSN 2210-6502, <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100718>.
- Pisano, A., Usai, E. (2004). Output Feedback Control of an Underwater Vehicle Prototype by Higher-Order Sliding Modes. *Automatica*, 40(9), 1525–1531.
- Podlubny, I. (1999). Fractional-Order Systems and  $PI\lambda D\mu$  Controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44(1), 208–214.
- Qais, M. H., Hasanien, H. M., Alghuwainem, S. (2019). Enhanced Salp Swarm Algorithm: Application to Variable Speed Wind Generators. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 80, 82–96. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.01.011>
- Qiao L., Yi B., Wu D., Zhang W. (2017). Design of Three Exponentially Convergent Robust Controllers for the Trajectory Tracking of Autonomous Underwater Vehicles. *Ocean Eng.*, 134, 157–172.
- Qin, D., Huang, Q., Pan, G., Shi, Y., Li, F. Han, P. (2022). Numerical Simulation of Hydrodynamic and Noise Characteristics for a Blended-Wing-Body Underwater Glider. *Ocean Eng.* 252, 111–118.
- Ross, A., Fossen, T., I., Johansen, T., A. (2004). Identification of Underwater Vehicle Hydrodynamic Coefficients Using Free Decay Tests. In *IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems*, Italy, 2004. 362–368.
- Saadatmand, M., Gharehpetian, G. B., Siano, P., Alhelou, H. H. (2021). PMU-Based FOPID Controller of Large-Scale Wind-PV Farms for LFO Damping in Smart Grid. *IEEE Access*, 4953–94969. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3094170>
- Sabet, M.T., Daniali, H.M., Fathi, A., Alizadeh, E. (2017). Identification of an Autonomous Underwater Vehicle Hydrodynamic Model Using the Extended, Cubature, and Transformed Unscented Kalman filter. *IEEE J. Ocean Eng.* 2017, 43, 457–467.
- Sahoo, P., Takahashi, K. (2020). Numerical Study on the Hydrodynamic Performance of the DARPA Suboff Submarine for Steady Translation. In

- Salgado-Jimenez, T., Spiewak, J., M. (2004). A Robust Control Algorithm for AUV: Based on a High Order Sliding Mode, *In MTS/IEEE TECHNO-OCEAN04*, vol. 1, 2004, pp. 276–281.
- Samson, C., Ait-Abderrahim, K. (1990), Mobile Robot Control. Part 1: Feedback Control of Nonholonomic Wheeled Cart in Cartesian Space, INRIA report, France.
- Sanchez, H.S., Padula, F., Visioli, A., Vilanova, R.(2017). Tuning Rules for Robust FOPID Controllers Based on Multi-Objective Optimization with FOPDT Models. *ISA (Instrum. Soc. Am.) Trans.* 66, 344–361.
- SAUC-E, Student autonomous underwater challenge-europe, viewed 19/09/2014. [Online]. Available: <http://sauc-europe.org>
- Shi, Y., Qian, W., Q. et al. (2007), Adaptive Depth Control for Autonomous Underwater Vehicles Based on Feedforward Neural Networks. *International Journal of Computer Science and Applications*, 4(3), 107–118.
- Silvestre, C., Pascoal, A., Kaminer, I. (2002). On the Design of Gain-Scheduled Trajectory Tracking Controllers. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 12(9), 797–839.
- Singh, M., Brahmin, K., & Neema, D. D. (2016). Performance Analysis of Improving Stability Using Tuned PID and Hybrid Controllers. *2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, 83–87. <https://doi.org/10.1109/ICEPES.2016.7915910>
- Sutton, R., Naeem, W., Ahmad, S., M. (2003). Lqg/ltr Control of an Autonomous Underwater Vehicle Using a Hybrid Guidance Law, *In 1st IFAC Workshop on Guidance and Control of Underwater Vehicles*, Newport, Wales: IFAC, pp. 31–36.
- Szymak, P., Malecki, J. (2008).Control System of Underwater Vehicle Based on Artificial Intelligence Methods. *Automation and Robotics*, 17(1), 285–296.
- Takahashi, K., Sahoo, P.K. (2019), Fundamental CFD Study on the Hydrodynamic Performance of the DARPA SUBOFF Submarine. *In Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Glasgow, UK, 9–14, Volume 58776, p. V002T08A052.
- Tan, H., Diamant, R. et al. (2011), A Survey of Techniques and Challenges in Underwater Localization. *Ocean Engineering*, 38(1), 1663–1676.

- Tolba, M., Rezk, H., Diab, A., Al-Dhaifallah, M. A. (2018). Novel Robust Methodology Based Salp Swarm Algorithm for Allocation and Capacity of Renewable Distributed Generators on Distribution Grids. *Energies*, 11, 25-56.
- Tufenkci, S., Alagoz, B. B., Senol, B., Matušů, R. (2023). An Overview of FOPID Controller Design in v-Domain: Design Methodologies and Robust Controller Performance. *International Journal of Systems Science*, 54(11), 2316–2336.
- Vaganay, J., Jouvencel, B. et al.(1998), Taipan an AUV for Very Shallow Water Applications. In *Proceedings of World Automation Congress (WAC'98)*, San Diego, USA.
- Vervoort, J. (2008). Modeling and Control of an Unmanned Underwater Vehicle, Master Thesis, University of Canterbury, Department of Mechanical Engineering,
- Wallace, M., B., Max, S., D. and Kreuzer, E. (2008), Depth Control of Remotely Operated Underwater Vehicles Using an Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller, *Robotics and Autonomous Systems*, 5(8), 670–677.
- Wang, W., Clark, C., M. (2001). Modeling and Simulation of the Video Ray Pro III Underwater Vehicle.. University of Waterloo,
- Whitcomb, L., Yoerger, D. et al. (1999). Advances in Underwater Robot Vehicles for Deep Ocean Exploration: Navigation, Control, and Survey Operations. *In Navigation Control and Survey Operations in the Ninth International Symposium on Robotics Research*, 1999, 346–353.
- Yamamoto, I. (2001), Robust and Nonlinear Control of Marine System. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 11(13), 1285–1341.
- Yang, R., Probst, I. et al. (2014). Underwater Vehicle Modeling and Control Application to Ciscree Robot. *In MOQESM'14 conference*, Brest, France, 2014.
- Yang, R., Clement, B. et al. (2015). Modeling of a Complex-Shaped Underwater Vehicle for Robust Control Scheme. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 12(2), 1–16.
- Yuh, J. (2000), Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A survey. *Autonomous Robots*, 8(2), 7–24.
- Yilmaz S., Altıokka Yılmaz G. (2023). Identification of Particular Hydrodynamic Parameters for a Modular Type 4 DOF Underwater Vehicle by Means of CFD Method. *Industrial Robot*, 50(4), 609–622,

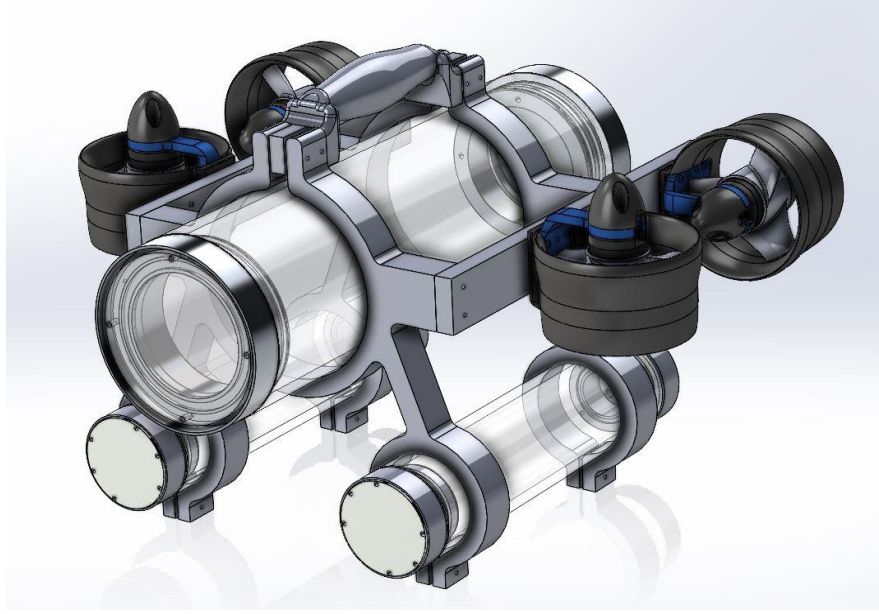
**EKLER**

## EK-A

### ARAÇ TASARIM EKİPMANLARI

#### A.1. Gvde

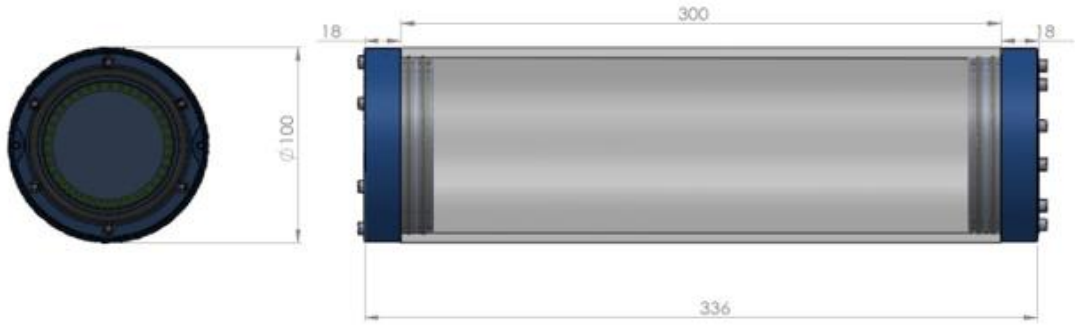
Su altı aracı RedFin, farklı görevleri yerine getirmek için tasarlanmış ve çeşitli ekipmanlarla donatılmıştır. Bu ekipmanların içinde bulunduğu tp hazne ile iticileri bir arada tutan yapı gövde olarak tanımlanmıştır. Gövde tasarlanırken, yüksek manevra kabiliyetine ve hafif yapıya sahip olması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, tasarlanmış olduğumuz gövde yapısı Şekil A.1’de gösterilmiştir



Şekil A. 1. RedFin gövde yapısı **genel görünüm**

Gövdenin CAD tasarımında basitlik amacıyla gerekli uzuvlar dışındaki fazlalıklar kaldırılmıştır. Aracın fazla gövde bileşeni içermemesi hareket kabiliyetini arttırmış ve kullanım kolaylığı sağlamıştır. Gövde imalatı için PVC malzeme kullanılması uygun görülmüştür. PVC malzeme gereken mukavemeti karşılamakla beraber hafif ve maliyeti düşük bir üründür. Gövde ile tp hazne birbirine PVC malzeme ile birleştirilip sabit kalması sağlanmıştır. Ayrıca, PVC malzeme tuzlu su ile oksitlenmemektedir.

Elektronik parçaların tamamı bir tp içine yerleştirilmiş ve bu parçalara müdahalenin kolay olması için tüpün her iki tarafında contalı kapaklar kullanarak su sızdırmazlığı sağlanmıştır. n tasarımda, elektronik parçaları muhafaza edecek hazne, aracın su altında dengede kalmasını sağlayacak şekilde gövdenin orta kısmına monte edilmiştir. Tp hazneyi oluşturan parçaların detayları Şekil A.2’de gösterilmiştir.



Şekil A.2. Elektronik ekipmanlar için tüp hazne

Su altı arcı RedFin'in gövdesini oluşturan tüp hazne tasarımı tüm elektronik parçaların, kameranın ve kabloların içine sığabileceği boyutlarda seçilmiştir. Tüp haznenin malzeme seçiminde Pleksiglas tercih edilmiştir. Bu seçimde; pleksiglas malzemenin kolay işlenebilmesi ve hafif oluşu belirleyici olmuştur. Gövdenin ayaklarını oluşturan tüp hazneler aracın bataryalarını muhafaza etmek içindir.

## A.2. Motorlar

Araçta, Şekil A.3'te gösterilen 4 adet 12 V, 30 A, 1.2 Kg-f itme gücüne sahip, su geçirmez fırçasız DC motor kullanıldı.



Şekil A.3. Su geçirmez fırçasız DC motor

## A.3. Blue 30A ESC – Fırçasız Motor Sürücü

A30 Motor Sürücüsü Triton ve M1 motor kullanılarak üretilen motor türevleri için özelleştirilmiş en uygun fiyatlı motor sürücüdür.

- Sualtı motorlarına uygun konfigure edilmiş, çift yönlü
- Blheli, Blheli\_S Konfigrasyon Sistemine Uyumlu
- Dshot150/300/600 protokollerini destekler
- 8v-24v gerilim aralığı (2s-6s)
- Aşırı ısı koruma
- Azami Akım 30 Amper

- Anlık Akım 35 Amper
- PWM – 1900 Mikrosaniye Tam İleri, 1500 Mikrosaniye Durma, 1100 Mikrosaniye Tam Geri çalışma
- PWM Durma Hassasiyeti +-50 Mikrosaniye



Şekil A.4. DC motor sürücü

#### A.4. Analog Kamera

Analog kameralar düşük gecikme değerleri ve düşük maliyetlerinden dolayı kritik robotik sistemlerin popüler bir tercihidir. Analog yayın yapan bu kameralar, herhangi bir gürültü durumunda yayının kesilmesi veya gecikmesi gibi bir durum oluşturmaz ancak görüntü kalitesi bu gürültüden etkilenir. Teknik Özellikleri;

- Görüntü Çözünürlüğü – 1200 TV Line (Azami yaklaşık 1280×1024)
- Gecikme – >100ms
- Lens – 3mm, 175 derece
- Lens Tipi – Değiştirilebilir M12
- Besleme Gerilimi – 12V



Şekil A.5. Analog kamera

#### A.5. Güç Dağıtım Kartı

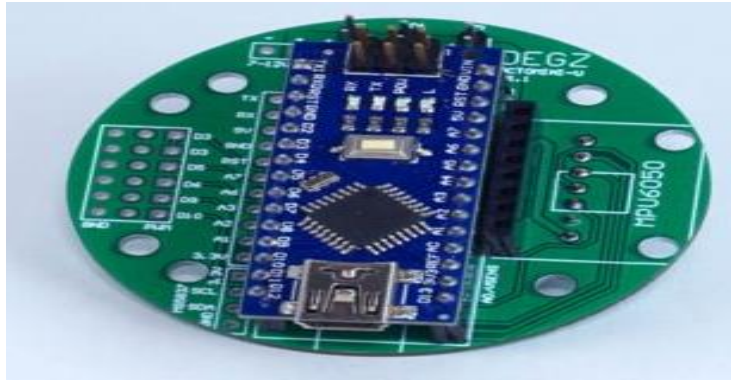
Subdrive Lo-Base üzerindeki anahtarlama elemanları sayesinde elektronik haznenin dışarısından anahtarlama yapmanızı sağlar. Yenilenen harici regülatör ile hem 5v hem de 12v kullanan cihazların aynı anda çalıştırılmasını sağlar.



Şekil A.6. Güç dağıtım kartı

#### A.6. Octomini – Su Altı Kontrolcüsü

Octomini arduino-nano temelli bir geliştirici kartıdır. *Dış çapı 55mm'den daha küçüktür.* Üzerindeki anahtarlama elemanları ile aydınlatma, tutucu kol, örnekleme gibi 3 farklı cihazın açma kapama kontrolü yüzeyden yapabilmektedir.



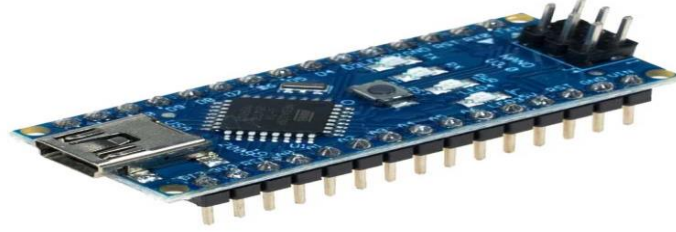
Şekil A.7. Su altı aracı kontrol kartı

#### A.7. Arduino Nano Mikroişlemcisi

Kontrol girişi el ile kumanda konsolundan joystick yardımıyla verilir. Kumanda konsolundaki Arduino NANO mikroişlemcisi, daha önceden yazılan kumanda kodları yardımıyla veriyi derler ve çalıştırmaya başlar. Daha sonra CANBUS protokolü devreye girerek CANBUS haberleşme kartı (MCP2515) aracılığıyla ve CAT6 kablo sayesinde motorlara gerekli komutu iletir.

Fırçasız DC motorları kontrol etmek için öncelikle ESC'ler ile bağlantıları yapılmıştır. Kullanılan ESC ler 2 yönlü çalışabilmektedir ve aynı anda 4 motor sürebilmektedir. Kumanda konsolundaki Arduino NANO'dan gelen girdi su altı kontrolcüsündeki arduino NANO'da tekrardan değerlendirilip ESC'lere aktarılır. Bu aktarım yine su altı

kontrolcüsünde bulunan CANBUS haberleşme kartı ile sağlanır. Ardından motorlar, joystickten gelen girdiye göre dönüş yönü ve hızını ayarlar.



Şekil A.8. Arduino NANO mikroişlemci kartı

#### A.8. Bar30 Basınç Sensörü ve MPU6050 Gyro İvme ölçer sensör

Bar30 basınç sensörü, 2 mm derinlik çözünürlüğüyle 30 Bar'a (300 m derinlik) kadar ölçüm yapabilir. Su geçirmez ve kurulumu hazır olduğundan ROV'ler, OSA'lar ve su altı enstrümantasyonu için ideal bir seçimdir. Arduino ve Raspberry Pi işlemcileri ile uyumludur. MPU6050 jiroskobu ise aracın yönelim ve ivmelenmesinin ölçümü içindir.



Şekil A.9. Bar30 Basınç Sensörü ve MPU6050 Gyro İvme ölçer sensör

## EK-B

### ANALİTİK HESAPLAMA YAKLAŞIMI İLE EK KÜTLE VE SÖNÜMLEME KATSAYILARINI HESAPLAYAN MATLAB KODLARI

#### B.1. Ek Kütle Hesabı İçin Matlab Kodu

```
clear all
clc
close all
%-----ROV için Ampirik Ek Kütle tahmincisi-----
% Bu program, degisen boyut ve sekillerdeki bir ROV için
% ek kütle matrisinin köşegen terimlerini tahmin eder.
% Program basitligi için, ek kütle matrisinin köşegen olduğu
varsayılacaktır.
% Ek olarak, program yalnızca, iki düzlemde simetrik olan
% yani +-% 10 farkın olduğu ROV'ler için Ek kütle hesaplayacaktır.
L=430.99; % ROV'un uzunluğu [mm]
H=280.69; % ROV'un yüksekliği [mm]
W=307.21; % ROV'un genişliği [mm]
rho=1000; % Sıvının yoğunluğu [kg/m^3]
PF= 36648.49; % Ön yüzey izdüşümsel alan [mm^2]
PS= 64489.4; % Yan yüzey izdüşümsel alan [mm^2]
PT= 75789.4; % Alt yüzey izdüşümsel alan [mm^2]
A=zeros(6,6); % Ek kütle matrisi
% Empirical 3D data(DNV)
EMP3D=[1,0.68;2,0.36;3,0.24;4,0.19;5,0.15;6,0.14;7,0.11];
CA3D=spline(EMP3D(:,1),EMP3D(:,2));
%.....
% Empirical 2D-data (DNV)
EMP2D=[10,1.14,0.125;5,1.21,0.15;2,1.36,0.15;1,1.51,0.234;...
0.5,1.7,0.15;0.2,1.98,0.15;0.1,2.23,0.147];
CA2DT=spline(EMP2D(:,1),EMP2D(:,2));
CA2DR=spline(EMP2D(:,1),EMP2D(:,3));
% KATSAYILAR
H3D=(H+W)/2; % Ortalama yükseklik ( For 3D-est)
W3D=H3D; % Ortalama genişlik ( For 3D-est)
CpXY=PT/(L*W); % İzdüşümsel alan katsayısı XY
CpYZ=PF/(H*W); % İzdüşümsel alan katsayısı YZ
CpXZ=PS/(L*H); % İzdüşümsel alan katsayısı XZ
% Surge Serbestlik Derecesi için (3D)
B=L/H3D;
Ca=ppval(CA3D,B);
V=L*H3D^2;
A(1,1)= Ca*V*10^(-9)*rho*(CpYZ)^2*CpXZ*CpXY;
% Surge Serbestlik Derecesi için (2D)
B=W/L;
Ca=ppval(CA2DT,B);
Ar=pi*((W*0.5)^2);
A2D=rho*Ca*Ar*10^(-6)*(CpYZ)^2*CpXZ*CpXY;
At=H*10^(-3)*A2D;
lambda=sqrt(A(1,1)/At);
A(1,1)=At*lambda;
% Heave Serbestlik Derecesi için
B=L/W;
Ca=ppval(CA2DT,B);
Ar=pi*(L*0.5)^2*10^(-6);
A2D=rho*Ca*Ar*CpXZ^2*CpXY*CpYZ;
At=A2D*H*10^(-3);
```

```

A(2,2)=At*lambda;
A2D=rho*Ca*Ar*CpXY^2*CpXZ*CpYZ;
At=A2D*W*10^-3;
A(3,3)=At*lambda;
% Roll Serbestlik Derecesi için
B=H/W;
Ca=ppval(CA2DR,B);
if (B<=1)
A2D=rho*Ca*pi*(W*0.5*10^(-3))^4*CpYZ*CpXY*CpXZ;
else
A2D=rho*Ca*pi*(H*0.5*10^(-3))^4*CpYZ*CpXY*CpXZ;
end
At=L*A2D*10^-3;
A(4,4)=At*lambda;
% Pitch Serbestlik Derecesi için
B=L/H;
Ca=ppval(CA2DR,B);
if(B>=1)
A2D=rho*Ca*pi*(L*0.5*10^(-3))^4*CpYZ*CpXY*CpXZ;
else
A2D=rho*Ca*pi*(H*0.5*10^(-3))^4*CpYZ*CpXY*CpXZ;
end
At=W*10^-3*A2D;
A(5,5)=At*lambda;
% Yaw Serbestlik Derecesi için
B=W/L;
Ca=ppval(CA2DR,B);
if(B>=1)
A2D=rho*Ca*pi*(W*0.5*10^(-3))^4*CpYZ*CpXY*CpXZ;
else
A2D=rho*Ca*pi*(L*0.5*10^(-3))^4*CpYZ*CpXY*CpXZ;
end
At=A2D*H*10^-3;
A(6,6)=At*lambda;

```

## B.2. Sönümleme Katsayılarının Hesaplanması İçin Matlab Kodu

```
clear all
clc
close all
%-----ROV için Ampirik Sönümleme tahmincisi-----
%Bu program, değişen boyut ve şekillerde bir ROV için
% sönümleme matrisinin diyagonal terimlerini tahmin eder.
% Basitlik programı nedeniyle, sönüm matrisinin köşegen olduğu
varsayılacaktır.
% Giriş değerleri
L=430.99; % ROV'un uzunluğu [mm]
H=280.69; % ROV'un yüksekliği [mm]
W=307.21; % ROV'un genişliği [mm]
rho=1025; % sıvının yoğunluğu [kg/m^3]
PF= 36648.49; % Ön yüzey izdüşümsel alan [mm^2]
PS= 64489.4; % Yan yüzey izdüşümsel alan [mm^2]
PT= 75789.4; % Alt yüzey izdüşümsel alan [mm^2]
lambda=0.16; % linear/quadratic ölçeği
I44 = 0.60428; % roll için atalet momenti
I55 = 0.46300; % pitch için atalet momenti
A44= 1.208; % roll için ek kütle
A55= 2.75; % pitch için ek kütle
C=9.88; % Geri yükleme katsayısı (pitch=roll)
% KATSAYILAR
CpXY=PT/(L*W); % İzdüşümsel alan katsayısı XY
CpYZ=PF/(H*W); % Projected Area Coefficient YZ
CpZX=PS/(L*H); % Projected Area Coefficient XZ
% .....Sürüklenme Katsayıları (2D)
Data2D =[0.5,2.5;1.5,1.8;2.5,1.4;6,0.89];
% Blevins table 10.20 page 343
Drag2D=spline(Data2D(:,1),Data2D(:,2));
% .....Sürüklenme Katsayıları (3D)
Data3D =[0,1.25;0.5,1.25;1,1.15;1.5,0.97;2,0.87;...
2.5,0.9;3,0.93;4,0.95;5,0.95];
Drag3D=spline(Data3D(:,1),Data3D(:,2));
% Doğrusal olmayan sönümleme
% Surge 3D
LD=L/((H+W)/2);
BQ3D =ppval(Drag3D,(LD));
% Surge 2D
LD=L/W;
BQ2D=ppval(Drag2D,(LD));
lambda = BQ3D/BQ2D;
% Surge nonlinear sönümleme
LD=L/((H+W)/2);
BQ(1,1)=0.5*rho*ppval(Drag2D,(LD))*H*W*10^-6*CpYZ*lambda;
% sway
LD=W/H;
BQ(2,2)=rho*0.5*ppval(Drag2D,(LD))*L*H*10^-6*CpZX*lambda;
%Heave
LD=H/W;
ppval(Drag2D,(LD));
BQ(3,3)=rho*0.5*ppval(Drag2D,(LD))*L*W*10^-6*CpXY*lambda;
% ROLL
LD=W/(H/2);
Fh=rho*(1/6)*ppval(Drag2D,(LD))*(H/2)*L*10^-6*CpZX*lambda;
Mh=Fh*(3/4)*((H/2)*10^-3)^3;
```

```

LD=H/(W/2);
Fv=rho*(1/6)*ppval(Drag2D,(LD))*(W/2)*L*10^-6*CpXY*lambda;
Mv=Fv*(3/4)*((W/2)*10^-3)^3;
BQ(4,4)=(2*Mv+2*Mh);
% PITCH
LD=L/(H/2);
Fh=rho*(1/6)*ppval(Drag2D,(LD))*(H/2)*W*10^-6*CpYZ*lambda;
Mh=Fh*(3/4)*((H/2)*10^-3)^3;
LD=H/(L/2);
Fv=rho*(1/6)*ppval(Drag2D,(LD))*(L/2)*W*10^-6*CpXY*lambda;
Mv=Fv*(3/4)*((L/2)*10^-3)^3;
BQ(5,5)=(2*Mv+2*Mh);
% YAW
LD=L/(W/2);
Fh=rho*(1/6)*ppval(Drag2D,(LD))*(W/2)*H*10^-6*CpYZ*lambda;
Mh=Fh*(3/4)*((W/2)*10^-3)^3;
LD=W/(L/2);
Fv=rho*(1/6)*ppval(Drag2D,(LD))*(L/2)*H*10^-6*CpZX*lambda;
Mv=Fv*(3/4)*((L/2)*10^-3)^3;
BQ(6,6)=(2*Mv+2*Mh);
% LINEER SÖNÜMLEME
%Roll and Pitch
BL(4,4)=2*0.025*(I44+A44)*sqrt(C/(I44+A44));
BL(5,5)=2*0.025*(I55+A55)*sqrt(C/(I55+A55));
lambda0=0.16;
lambda1=BL(5,5)/BQ(5,5);
%Surge, Sway, heave and yaw
BL(1,1)=BQ(1,1)*lambda0;
BL(2,2)=BQ(2,2)*lambda0;
BL(3,3)=BQ(3,3)*lambda0;
BL(6,6)=BQ(6,6)*lambda1;

```

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- Yılmaz, G.**, Yılmaz, S. (2022). İnsansız Sualtı Araçlarında (İSA) Hidrodinamik Sürüklenme ve Kaldırma Kuvvetlerinin Derinlik ve Hıza Bağlı Değişiminin HAD ile Analizi. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 14(1),72- 83.
- Yılmaz, S., **Yılmaz, G.** (2023). Identification of Particular Hydrodynamic Parameters for a Modular Type 4 DOF Underwater Vehicle by Means of CFD Method. Industrial Robot-The International Journal Of Robotics Research And Application, 50(4), 609-622.
- Yılmaz, G.**, Yılmaz, S. (2024). The Dynamic Modeling and Trajectory Tracking Control of an Unmanned Underwater Vehicle (UUV). International Journal of Modern Research in Engineering and Technology, 9(2), 1-15.

## ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğretimini Malatya’da tamamladıktan sonra, 1991 yılında Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü’nü kazanmıştır. Aynı bölümden 1995-1996 döneminde Elektrik Elektronik Mühendisi olarak mezun olmuştur. 1997’e kadar çeşitli firmalarda mühendis olarak çalıştırtan sonra, Eylül-1998’de Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik Bilgisayar Eğitimi Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. 1999-2002 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Bilgisayar Eğitimi ABD.’da Yüksek Lisansını tamamladı. 2004 yılında, Kocaeli Üniversitesi Gebze MYO. Elektronik Teknolojisi Programı’nda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2006-2009 yılları arasında, Gebze Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Strateji ABD.’da ikinci Yüksek Lisansını tamamladı. 2018 yılında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği ABD.’da doktora eğitimine başladı. Gebze Meslek Yüksekokulu 2011 yılında Hereke kampüsüne taşınarak Hereke Asım Kocabıyık MYO. Adını almıştır. Halen bu okulun Elektronik Otomasyon Bölümü’nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk annesidir.