

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SÜPERKAVİTE SU ALTI ARAÇLARININ HİDRODİNAMİK
MODELLENMESİ VE KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sezer KEFELİ

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Elbrus CAFEROV

Temmuz 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SÜPERKAVİTE SU ALTI ARAÇLARININ HİDRODİNAMİK
MODELLENMESİ VE KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Sezer KEFELİ
511171172**

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Elbrus CAFEROV

Temmuz 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 511171172 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Sezer KEFELİ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SÜPERKAVİTE SU ALTI ARAÇLARININ HİDRODİNAMİK MODELLENMESİ VE KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı: **Prof. Dr. Elbrus CAFEROV**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Ömer GÖREN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Seyfettin BAYRAKTAR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 16.06.21
Savunma Tarihi : 14.07.21



ÖNSÖZ

Süperkavite su altı araçları geleneksel su altı araçlarına göre farklı bir hidrodinamik karakteristiğe sahiptir. Bu nedenle bir süperkavite su altı aracının su altındaki davranışını gözlemleyebilmek için geleneksel su altı araçları için geliştirilen metotlar doğrudan kullanılamamaktadır. Geleneksel su altı araçları için geçerli olan hidrodinamik form tasarımı, hidrodinamik veritabanının oluşturulması, hidrodinamik hidrodinamik denklem setinin ve denklem setlerinin oluşturulması ile kararlılık ve performans hesaplarının yapılması gibi çalışmalar süperkavite su altı araçları için özelleştirilerek tekrardan incelenmelidir.

Su altı dünyasında süperkavitasyon olgusunun incelenmesine ve yüksek hızlı su altı araçlarının çözümlenmesine yönelik kaynak sayısı az olmakla birlikte Türkçe kaynak sayısı da bu konuda yetersiz kalmaktadır. Bu yüksek lisans tezi kapsamında süperkavitasyon olgusunun karakteristiği ve süperkavitasyon olgusuna özgü parametreler incelenmiştir. Ek olarak bu çalışma, yüksek hızlı su altı araçlarının doğal kavitasyon karakteristiğinin çözümlenebilmesi kapsamında hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz modeli doğrulama çalışmalarını, süperkavitasyon olgusuna özgü hareket denklemlerini ve kararlılık ile performans hesaplarını içeren bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Süperkavitasyon teknolojisini incelememe ve bu kapsamda disiplinli bir çalışma gerçekleştirmeme müsaade eden, tecrübesi ve bilgisiyle beni destekleyen ve bana güvenen İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Öğretim Görevlisi olan tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Elbrus CAFEROV'a teşekkürlerimi sunarım.

Ek olarak, su altı dünyasına ait bilgi birikimini her fırsatta benimle paylaşmayı eksik etmeyen ve her koşulda desteğini esirgemedi bana yol gösteren Sn. Sertaç ARSLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yüksek lisans eğitimim süresince anlayışlarını ve desteklerini eksik etmeyen ROKETSAN ailesine teşekkür ederim.

Son olarak, salgın hastalıkların motivasyonumuzu düşürdüğü bu dönemde de her türlü fedakarlıktan kaçınmadan manevi desteğini benden esirgemeyen eşim Neslihan MÜDERRİSOĞLU KEFELİ'ye ve biricik aile üyelerime teşekkürü borç bilirim.

Temmuz 2021

Sezer KEFELİ
Uçak Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Süperkavite Su Altı Araçlarının Tanımı ve Kullanım Alanları Amacı.....	2
1.2 Süperkavitasyon Rejiminin Tarihçesi	2
1.3 Süperkavitasyon Teknolojisi ve Konsepti.....	5
1.4 Benzer Sistemler ve Teknolojiler	7
1.4.1 Shkval VA-11 & Shkval-2 / Rusya.....	8
1.4.1.1 Geliştirme süreci	8
1.4.1.2 Teknik özellikleri	9
1.4.1.3 Operasyonel durumu	10
1.4.2 Hoot süperkavite torpidosu / İran.....	11
1.4.2.1 Geliştirme süreci	11
1.4.2.2 Teknik özellikleri	11
1.4.2.3 Operasyonel durumu	11
1.4.3 Barracuda / Almanya	12
1.4.3.1 Geliştirme süreci	12
1.4.3.2 Teknik özellikleri	12
1.4.3.3 Operasyonel durumu	13
2. SÜPERKAVİTASYON REJİMİNİN TANITILMASI VE KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ	15
2.1 Süperkavitasyon Rejiminin Tanıtılması	15
2.2 Süperkavitasyon Oluşturma Yöntemleri	16
2.2.1 Doğal kavitasyon.....	17
2.2.2 Yapay kavitasyon	17
2.2.3 Ortam basıncının düşürülmesi	18
2.3 Süperkavitasyon Rejiminin Karakteristik Parametrelerinin Belirlenmesi	18
2.3.1 Sürüklenme katsayısının incelenmesi	19
2.3.1.1 Disk kavitatör geometrilerinde sürüklenme katsayısının belirlenmesi	21
2.3.1.2 Konik kavitatör geometrilerinde sürüklenme katsayısının belirlenmesi	23
2.3.1.3 Yarım küre kavitatör geometrilerinde sürüklenme katsayısının belirlenmesi	24
2.3.1.4 Ogiv kavitatör geometrilerinde sürüklenme katsayısının belirlenmesi	25
2.3.2 Basınç katsayısının dağılımı	26
2.3.3 Kavitasyon zarfı duvarı üzerindeki hız	28
2.3.4 Birimsiz kavitasyon zarfı çapı (d_m/d_c)	29

2.3.4.1 Disk kavitatörler için yapılan çalışmalar.....	29
2.3.4.2 Konik kavitatörler için yapılan çalışmalar	32
2.3.5 Birimsiz kavitasyon zarfı uzunluğu (L/d_c)	34
2.3.5.1 Disk kavitatörler için yapılan çalışmalar.....	34
2.3.5.2 Konik kavitatörler için yapılan çalışmalar	36
2.3.6 Kavitasyon zarfı narinlik oranı (L/d_c)	37
2.3.6.1 Disk kavitatörler için yapılan çalışmalar.....	37
2.3.7 Hacimsel debi katsayısı.....	37
2.4 Kavitasyon Zarfı Geometrisi	38
2.5 Disk Kavitatörlerde Hücum Açısının Kavitasyon Zarfı Üzerine Etkisi	39
2.6 Froude Sayının Kavitasyon Zarfı Üzerine Etkisi	40
2.7 Yapay Kavitasyon Zarfının Oluşturulması ve Sürekliliğinin Sağlanması	43
2.7.1 Yapay kavitasyon oluşturma metotları.....	43
2.7.1.1 Akışa doğru gaz basma metodu	43
2.7.1.2 Kavitasyon zarfının içerisine gaz basma metodu	44
2.7.2 Serbest sınır tabaka etrafında oluşabilecek bozuntu	45
2.7.3 Yapay kavitasyon fazları.....	46
2.7.3.1 Kavitasyon zarfı oluşum fazı.....	47
2.7.3.2 Kavitasyon zarfı süreklilik fazı	49
2.7.4 Kavitasyon zarfı yüzeyindeki gaz sürüklemesi	52
2.7.5 Kavitasyon zarfı içerisinde süperkavite su altı aracı bulunduğu durum için debi yaklaşımı	54
2.8 Kavitasyon Zarfı Yüzeyinde Bozuntuya Sebep Olabilecek Davranışlar	55
2.8.1 Kavitasyon zarfının oluşması esnasında oluşabilecek pürüzlülük	55
2.8.2 Kavitasyon zarfının kapanma bölgesindeki akışın zarfa etkisi	56
2.8.3 Düzensiz akım ayrılması	56
2.8.4 Sınır tabaka türbülansı.....	56
2.8.5 Kavitasyon üretici sistemin titreşimi.....	57
3. SÜPERKAVİTE SU ALTI ARACI TASARIMI VE ÖZELLİKLERİ.....	59
3.1 Süperkavite Su Altı Aracının Tanımı	59
3.2 Geometrik Özellikleri.....	60
3.3 Performans Özellikleri.....	64
3.4 Fiziksel Özellikleri	67
4. TEMEL HAREKET DENKLEMLERİNİN VE ELEMANLARININ TANITILMASI	71
4.1 Hidrodinamik Eksen Takımları	71
4.1.1 Gövde eksen takımı.....	71
4.1.2 Dünya eksen takımı.....	72
4.2 Süperkavite Su Altı Aracının Gövde Eksen Takımındaki Yerleşimi	73
4.3 Dünya Eksen Takımından Gövde Eksen Takımına Geçiş	74
4.4 Kavitatör Dönüşümü	75
4.5 Dümen Dönüşümü.....	76
4.6 Araç Kinematığının İncelenmesi	81
4.7 Kabul Edilen Varsayımlar	85
4.7.1 Çevresel varsayımlar	85
4.7.2 Araç, sistem ve kavitasyon zarfı için kabul edilen varsayımlar	86
5. HİDRODİNAMİK MATEMATİK MODELİN KURULMASI VE BİLEŞENLERİN TANITILMASI	87
5.1 Standart Denizaltı Hareket Denklemlerinin Tarihçesi ve Oluşturulması	87

5.2 6 Serbestlik Derecesinde Gertler M. ve Hagen G. R. Hidrodinamik Denklem Seti İncelenmesi	88
5.3 Hidrodinamik Hareket Denklemlerinin Bileşenlerinin Tanıtılması	95
5.3.1 Hidrostatik bileşenler	95
5.3.2 Hidrodinamik bileşenler.....	96
5.3.2.1 Statik hidrodinamik katsayılar	97
5.3.2.2 Dinamik hidrodinamik katsayılar.....	98
5.4 Süperkavitasyon Rejiminin Etkisindeki Su Altı Araçları İçin Hidrodinamik Denklem Setinin Modelin Güncellenmesi	104
6. SÜPERKAVİTE SU ALTI ARAÇLARINDA DOĞAL KAVİTASYON ÇÖZÜMÜ İÇİN HİDRODİNAMİK ANALİZ MODELİ GELİŞTİRİLMESİ	107
6.1 Çözüm Uzayı ve Sınır Şartlarının Tanıtılması	108
6.2 Çözüm Ağı Tipinin Belirlemesi	110
6.3 Çözüm Ağı Yoğunluğunun Belirlenmesi	116
6.4 Türbülans Modelinin Belirlenmesi.....	119
6.5 Çok Fazlı Modelin ve Kavite Modelinin Belirlenmesi.....	123
6.6 Gaz Yüzdesinin Belirlenmesi	126
6.7 Süperkavitasyon Rejimi Doğal Kavite Karakteristiğinin HAD Metotları Kullanılarak Doğrulaması	127
6.8 Analiz Modelinin Geliştirilmesi ve Doğrulama Çalışmasının Değerlendirilmesi	126
7. SÜPERKAVİTE SU ALTI ARACININ HİDRODİNAMİK VERİTABANININ HAZIRLANMASI	137
7.1 Analiz Noktalarının ve Hidrodinamik Parametrelerin Belirlenmesi.....	138
7.2 Hücüm Açısı (α) Taraması	139
7.3 Kavite Yünuslama Açısı (δ_{cp}) Taraması.....	142
7.4 Ufki Dümen Sapma Açısı (δ_e) Taraması.....	147
7.5 Yunuslama Açısı Hızı (q) Taraması	151
7.6 5 Serbestlik Derecesinde Hareket Denklem Setinin Oluşturulması.....	156
7.6.1 Eksenel kuvvetin ifade edildiği hidrodinamik katsayıların belirlenmesi	156
7.6.2 Simetrik koşulların belirlenmesi	157
8. SÜPERKAVİTE SU ALTI ARACI İÇİN KARARLILIK VE PERFORMANS HESAPLAMALARI	161
8.1 Statik Kararlılığın İncelenmesi.....	162
8.1.1 Doğrusal statik kararlılığın incelenmesi	162
8.1.2 Yatay statik kararlılığın incelenmesi.....	166
8.2 Dinamik Kararlılığın İncelenmesi	167
8.2.1 Yatay dinamik kararlılığın incelenmesi	168
8.2.2 Düşey dinamik kararlılığın incelenmesi	171
8.3 Dönüş Yarıçapının İncelenmesi	174
8.4 Kontrol Etkinliğinin İncelenmesi	176
8.4.1 $a-\delta_{cp}$ kontrol etkinliği	176
8.4.2 $a-\delta_e$ kontrol etkinliği.....	179
9. SONUÇ VE ÖNERİLER	183
10. KAYNAKLAR	189
ÖZGEÇMİŞ	193



KISALTMALAR

BOI	: Modelin Etkin Bölgesi (Body of Influence)
CFD	: Computational Fluid Dynamics
CPU	: Central Processing Unit
DES	: Detached Eddy Simulation
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LES	: Large Eddy Simulation
NSRDC	: Naval Ship Research and Development Center
RANS	: Reynolds Averaged Navier Stokes
SD	: Serbestlik Derecesi
3D	: Üç Boyutlu

SEMBOLLER

A	: Kesit alanı (m^2)
$A_{akış}$	: Kavitasyon zarfının Akış Alanı (m^2)
$A_{sirkülasyon}$	: Kavitasyon zarfının Sirkülasyon Alanı (m^2)
A_0	: Kavitasyon zarfı yarı uzunluğu (m)
A_2	: Kavitasyon zarfının ikinci bölgesinin kapanma alanı (m^2)
B	: Süperkavite su altı aracının hidrostatik kaldırma kuvveti (N)
B_{zarf}	: Kavitasyon zarfının hidrostatik kaldırma kuvveti (N)
b_0	: Kavitasyon zarfı maksimum yarıçapı (m)
C_D	: Sürükleme katsayısı
C_{D0}	: Sıfır kavitasyon sayısında oluşan sürükleme kuvveti katsayısı
C_{p0}	: Sıfır kavitasyon sayısındaki basınç kuvveti katsayısı
C_p	: Basınç katsayısı
D	: Sürükleme kuvveti (N)
d, d_c	: Kavitatör çapı (m)
d_m	: Maksimum kavitasyon zarfı çapı (m)
Fr	: Froude sayısı
h	: Kavitasyon zarfının Akış Alanı genişliği (m)
H_x	: X yönündeki açısal momentum (kgm^2/s)
H_y	: Y yönündeki açısal momentum (kgm^2/s)
H_z	: Z yönündeki açısal momentum (kgm^2/s)
I	: Cismin yer değiştirmesi sonucu hareket eden sıvının hacmi (m^3)
I_x	: Cismin X eksenine göre eylemsizlik momenti (kgm^2)
I_y	: Cismin Y eksenine göre eylemsizlik momenti (kgm^2)
I_z	: Cismin Z eksenine göre eylemsizlik momenti (kgm^2)
I_{xy}	: Cismin XY düzlemine göre eylemsizlik momenti (kgm^2)
I_{xz}	: Cismin XZ düzlemine göre eylemsizlik momenti (kgm^2)
I_{yz}	: Cismin YZ düzlemine göre eylemsizlik momenti (kgm^2)
k	: Sınır tabakadaki gaz konsantrasyonu

K	: Yuvarlanma momenti ($N.m$)
K'	: Yuvarlanma momenti katsayısı
l	: Süperkavite su altı aracının uzunluğu (m)
L	: Kavitasyon zarfı uzunluğu (m)
L_{c0}	: Kavitatörün ayrılma bölgesinden buharlaşan bir gaz parçacığının kapanma bölgesine kadar olan hareketi süresince izlediği yol (m)
M	: Yunuslama momenti ($N.m$)
M'	: Yunuslama momenti katsayısı
m	: Süperkavite su altı aracının kütlesi (kg)
$\dot{m}$	: Kütlesel debi (kg/s)
N	: Sapma momenti ($N.m$)
N'	: Sapmam momenti katsayısı
p	: Yuvarlanma açısal hızı (rad/s)
p'	: Yuvarlanma açısal hızının serbest akım hızına oranı
$\dot{p}$	: Yuvarlanma açısal ivmesi (rad/s^2)
P_{buhar}	: Buhar basıncı (Pa)
P_{yapay}	: Kavitasyon zarfı içerisine basılan gaz basıncı (Pa)
P_{zarf}, P_c	: Kavitasyon zarf basıncı (Pa)
P_{∞}, P	: Ortam basıncı (Pa)
q	: Yunuslama açısal hızı (rad/s)
q, q_{∞}	: Dinamik basınç (Pa)
q'	: Yunuslama açısal hızının serbest akım hızına oranı
$\dot{q}$	: Yunuslama açısal ivmesi (rad/s^2)
$\dot{Q}$	: Hacimsel gaz debisi (m^3/s)
$Q_{çıkan}$	: Kavitasyon zarfından ayrılan gazın hacimsel debisi (m^3/s)
$\dot{Q}_{çıkan}$	: Kavitasyon zarfından ayrılan gazın hacimsel debi katsayısı
Q_{giren}	: Kavitasyon zarfına gaz kaynağı tarafından sağlanan gazın hacimsel debisi (m^3/s)
$\dot{Q}_{giren}$	: Kavitasyon zarfına gaz kaynağı tarafından sağlanan gazın hacimsel debisi katsayısı
r	: Sapma açısal hızı (rad/s)
r'	: Sapma açısal hızının serbest akım hızına oranı
$\dot{r}$	: Sapma açısal ivmesi (rad/s^2)
r_0	: Ogiv kavitatörlerde yuvarlanma yarıçapı (m)
Re	: Reynolds sayısı

Ri	: Richardson sayısı
S_c	: Kavite zarfının yüzey alanı (m^2)
t_{min}	: Kavite zarfının ayrılma bölgesinden buharlaşan bir gaz parçacığının kapanma bölgesine kadar olan hareketi sonucunda geçen süre (s)
u	: İlerleme doğrusal hızı (m/s)
u'	: İlerleme doğrusal hızının serbest akım hızına oranı
$\dot{u}$	: İlerleme yönündeki ivme (m/s^2)
$U_{bağlı}$	: Kavite zarfı ile basılan gaz arasındaki bağıl hız (m/s)
U_c	: Kavite zarfı üzerindeki hız (m/s)
U_g	: Gaz hızı (m/s)
$U_{g,cr}, U_{cr}$	: Yapay kavite durumundaki kritik hız (m/s)
U_∞	: Serbest akım hızı (m/s)
v	: Sapma doğrusal hızı (m/s)
v'	: Sapma doğrusal hızının serbest akım hızına oranı
$\dot{v}$	: Sapma yönündeki ivme (m/s^2)
V_g	: Kavite başlığından sağlanan gazın hızı (m/s)
w	: Düşey öteleme doğrusal hızı (m/s)
w'	: Düşey öteleme doğrusal hızının serbest akım hızına oranı
$\dot{w}$	: Düşey öteleme yönündeki ivme (m/s^2)
W	: Süperkavite su altı aracının ağırlığı (kg)
W, W_c	: Kavite zarfının hacmi (m^3)
We	: Weber sayısı
X	: Eksenel kuvvet (N)
X'	: Eksenel kuvvet katsayısı
x_B	: Hacim merkezi X koordinatı (m)
x_G	: Ağırlık merkezi X koordinatı (m)
Y	: Sapma kuvveti (N)
Y'	: Sapma kuvveti katsayısı
y_B	: Hacim merkezi Y koordinatı (m)
y_G	: Ağırlık merkezi Y koordinatı (m)
Z	: Düşey öteleme kuvveti (N)
Z'	: Düşey öteleme kuvveti katsayısı
z_B	: Hacim merkezi Z koordinatı (m)
z_G	: Ağırlık merkezi Z koordinatı (m)
α	: Hücum açısı ($^\circ$)

β	: Yanal kayma açısı ($^{\circ}$)
δ	: Kavitasyon zarfının bozuntu etkin bölge genişliği (m)
δ_a	: Yuvarlanma dümeni sapma açısı ($^{\circ}$)
δ_e	: Ufki dümen sapma açısı ($^{\circ}$)
δ_r	: Amudi dümen sapma açısı ($^{\circ}$)
ξ	: Doğrusal hız vektörü (m/s)
ϕ	: Yuvarlanma Euler Açısı ($^{\circ}$)
γ	: Oryantasyon vektörü ($^{\circ}$)
η	: Pozisyon vektörü (m)
λ	: Kavitasyon zarfının narinlik oranı
θ	: Yunuslama Euler Açısı ($^{\circ}$)
ρ	: Ortam yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_g	: Gaz yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_g, ρ_{gaz}	: Kavitasyon başlığından sağlanan gazın yoğunluğu (kg/m^3)
σ	: Kavitasyon sayısı
σ_{buhar}	: Doğal kavitasyon sayısı
τ	: Kuvvet vektörü (N)
ψ	: Sapma Euler Açısı ($^{\circ}$)
v	: Açısal hız vektörü (rad/s)
ω	: Açısal hız vektörü (rad/s)
ζ	: Dümen ok açısı ($^{\circ}$)
ς	: Moment vektörü ($N.m$)



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Literatürde yer alan süperkavite su altı araçları.	8
Çizelge 2.1: Disk kavitatör geometrisi için belirlenen sürüklenme katsayısı değerleri.	22
Çizelge 2.2: Farklı koniklik yarım açıları için sürüklenme katsayısının belirlenmesi.	23
Çizelge 2.3: Oğiv kavitatör geometrileri için sürüklenme katsayısı denklemleri.	26
Çizelge 2.4: Farklı konik yarım açıları için c sabitinin değeri.	33
Çizelge 2.5: Farklı konik yarım açıları için c sabitinin değeri.	36
Çizelge 2.6: Kavitasyon zarfının şeklini tanımlamak için kullanılan elips denklemleri.	39
Çizelge 2.7: Kritik hız değerleri.	46
Çizelge 3.1: Süperkavite su altı aracı geometrik özellikleri.	63
Çizelge 3.2: Süperkavite su altı aracı fiziksel özellikleri.	68
Çizelge 5.1: Geleneksel su altı araçları için eksenel hareket denklemleri.	92
Çizelge 5.2: Geleneksel su altı araçları için sapma hareketi denklemleri.	93
Çizelge 5.3: Geleneksel su altı araçları için yunuslama hareketi denklemleri.	94
Çizelge 6.1: Doğal kavitasyon karakteristiğinin karşılaştırma parametrelerinin veri havuzuna ve farklı çözümlerdeki HAD analizlerine bağlı sonuçları.	113
Çizelge 6.2: Karşılaştırma parametrelerinin veri havuzuna ve farklı çözümlerdeki HAD analizlerine bağlı sonuçları.	116
Çizelge 6.3: Farklı yoğunluktaki 4 çözüm ağının özellikleri.	117
Çizelge 6.4: 4 farklı çözüm ağı için gerçekleştirilen HAD analizi sonucunda elde edilen zarf parametreleri.	118
Çizelge 6.5: 45 Derece yarım açılı konik kavitatöre sahip model için literatür ve HAD sonuçları.	122
Çizelge 6.6: Şekil 27’da verilen disk kavitatöre sahip model için literatür ve HAD sonuçları.	122
Çizelge 6.7: Çok Fazlı Model ve Kavitasyon Modeli belirlenmesi kapsamında yapılan HAD analizleri sonuçları.	125
Çizelge 7.1: Hidrodinamik veritabanı oluşturulması kapsamında belirlenen analiz noktaları.	138
Çizelge 7.2: Hidrodinamik veritabanı oluşturulması kapsamında hesaplanan hidrodinamik parametreler.	139
Çizelge 7.3: Hücum açısına bağlı olarak sürüklenme kuvvetinin yüzdesel değişimi.	139
Çizelge 7.4: Hücum açısı taramasının ardından elde edilen artık değerler ve sigma değeri.	140
Çizelge 7.5: Kavitatör yunuslama açısı taraması sonucunda elde edilen artık değerler ve sigma değeri.	143

Çizelge 7.6: Ufki dümen sapma açısı taraması sonucunda elde edilen artık değerler ve sigma değeri.	148
Çizelge 7.7: Yunuslama açısal hızı taraması sonucunda elde edilen artık değerler ve sigma değeri.	152
Çizelge 7.8: Dört farklı tarama çalışması sonrasında elde edilen X'_{uu} katsayıları..	157
Çizelge 7.9: Hücum açısı taraması sonucunda elde edilen hidrodinamik katsayılar ve sapma düzlemindeki eşlenikleri.	157
Çizelge 7.10: Hücum açısı taraması sonucunda elde edilen hidrodinamik katsayılar ve sapma düzlemindeki eşlenikleri.	158
Çizelge 7.11: Kavitatör sapma açısı taraması sonucunda elde edilen hidrodinamik katsayılar ve sapma düzlemindeki eşlenikleri.	158
Çizelge 7.12: Kavitatör sapma açısı taraması sonucunda elde edilen hidrodinamik katsayılar ve sapma düzlemindeki eşlenikleri.	159
Çizelge 7.13: Yunuslama açısal hızı taraması sonucunda elde edilen hidrodinamik katsayılar ve sapma düzlemindeki eşlenikleri.	159
Çizelge 7.14: 5 Serbestlik derecesindeki hidrodinamik denklem setinde kullanılacak hidrodinamik katsayıların sonuçları.	160
Çizelge 8.1: Kavitatör kontrol etkinliğinin belirlenmesi kapsamında incelenen HAD analiz noktaları.....	177
Çizelge 8.2: Ufki dümen kontrol etkinliğinin belirlenmesi kapsamında incelenen HAD analiz noktaları.....	179

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Temsili bir süperkavite su altı aracı etrafında oluşması beklenen temsili kavitasyon zarfı [28].	6
Şekil 1.2: Süperkavite su altı araçlarının genel geometrik görünümü [30].	7
Şekil 1.3: Shkval-2 (Rusya) süperkavite torpidosu [30].	10
Şekil 1.4: Hoot (İran) süperkavite torpidosu [31].	11
Şekil 1.5: Barracuda (Almanya) süperkavite torpidosu [32].	13
Şekil 2.1: Süperkavitasyon rejiminin tanıtılması.	19
Şekil 2.2: Süperkavitasyon etkisinde “ <i>stagnation cup</i> ” geometrisi üzerinde oluşan basınç eşitliği.	20
Şekil 2.3: Disk kavitatörlerde $\sigma \leq 0.32$ için sürüklenme katsayısı değerleri.	21
Şekil 2.4: 45 derece yarım açılı konik kavitatörlerde eğilim çizgisi.	24
Şekil 2.5: Küresel kavitatörlerde reynolds sayısına ve kavitasyon sayısına bağlı olarak akım ayrılma açısı.	25
Şekil 2.6: Yuvarlanma değerine bağlı olarak oluşan Ogiv kavitatör geometrileri.	25
Şekil 2.7: Disk kavitatör için kavitasyon sayısının basınç dağılımına bağlı değişimi.	27
Şekil 2.8: 45 derece yarım açılı konik kavitatör için kavitasyon sayısının basınç dağılımına bağlı değişimi.	27
Şekil 2.9: Waid’in süperkavitasyon rejimini tanımlarken kullandığı terminoloji [6].	30
Şekil 2.10: Akım ayrılmasından maksimum kavitasyon zarfı çapına olan radyal mesafenin kavitasyon sayısına bağlı değişimi.	30
Şekil 2.11: Farklı çaplardaki disk kavitatörlerde farklı gövde çaplarında birimsiz kavitasyon zarfı çapının kavitasyon sayısına bağlı değişimi.	31
Şekil 2.12: Disk kavitatörlerde birimsiz kavitasyon zarfı çapı parametresinin kavitasyon sayısına bağlı değişimi.	32
Şekil 2.13: Konik kavitatör geometrisinin oluşturduğu temsili kavitasyon zarfı.	32
Şekil 2.14: Farklı çaplardaki 45 derece yarım açılı konik kavitatörlerde farklı gövde çaplarında birimsiz kavitasyon zarfı çapının kavitasyon sayısına bağlı değişimi [28].	33
Şekil 2.15: 45 derece yarım açılı kavitatörlerde birimsiz kavitasyon zarfı çapı parametresinin kavitasyon sayısı ile değişimi [28].	33
Şekil 2.16: Birimsiz kavitasyon zarfı yarı uzunluğunun kavitasyon sayısı ile değişimi.	35
Şekil 2.17: Birimsiz kavitasyon zarfı uzunluğunun kavitasyon sayısı ile değişimi.	35
Şekil 2.18: Disk kavitatörlerde birimsiz kavitasyon zarfı parametresinin $(L/d_c)^2/C_D$ kavitasyon sayısına bağlı değişimi.	35
Şekil 2.19: 45 derece konik kavitatörlerde birimsiz kavitasyon zarfı parametresinin $(L/dc)^2/C_D$ kavitasyon sayısına bağlı değişimi.	36
Şekil 2.20: Farklı çalışmalar sonucunda elde edilen kavitasyon zarfı şekilleri.	39
Şekil 2.21: Pozitif yönlü kavitatör sapması ve oluşan kavitasyon zarfı yönelimi.	40
Şekil 2.22: Negatif yönlü kavitatör sapması ve oluşan kavitasyon zarfı yönelimi.	40
Şekil 2.23: Sapma açısına bağlı olarak kavitasyon zarfı katsayılarının değişimi.	41
Şekil 2.24: Kavitasyon zarfının kaldırma kuvveti kaynaklı yer değiştirmesi.	42
Şekil 2.25: Akışa doğru gaz basma metodu.	44

Şekil 2.26: Kavitasyon zarfının içerisine gaz basılması.	45
Şekil 2.27: Gaz kaynağına bağlı olarak kavitasyon zarfının gelişimi.....	48
Şekil 2.28: Kavitasyon zarfı içindeki gazın hareketi.	50
Şekil 2.29: Kavitasyon zarfı içindeki sirkülasyon ve akış bölgeleri.	50
Şekil 2.30: Faz etkileşiminde olan bir kavitasyon zarfı geometrisi.	52
Şekil 2.31: Süperkavite su altı aracının içerisinde bulunduğu kavitasyon zarf modeli.	55
Şekil 3.1: Aynı kavitatör çapına sahip farklı kavitatör geometrileri için zarf profilleri.	61
Şekil 3.2: Süperkavite su altı aracının kavitatör geometrisi.	62
Şekil 3.3: Süperkavite su altı aracının kontrol yüzeyi geometrisi.	63
Şekil 3.4: Süperkavite su altı aracı geometrisi.	64
Şekil 3.5: Kullanılacak süperkavite su altı aracı etrafında oluşması beklenen, deneysel çalışmalardan elde edilmiş kavitasyon zarfı geometrisi.....	65
Şekil 3.6: Pozitif kavitatör yunuslama açısına sahip süperkavite su altı aracının oluşması beklenen kavitasyon zarfı geometrisi.....	66
Şekil 4.1: Süperkavite su altı aracının hidrodinamik denklem takımı.	72
Şekil 4.2: Süperkavite su altı aracının α - β eksen dönüşümü.....	73
Şekil 4.3: Gövde ve dünya eksen takımının tanıtılması.	75
Şekil 4.4: Kavitatör eksen dönüşümü.	76
Şekil 4.5: + dümen konfigürasyonuna sahip süperkavite su altı aracının arkadan gösterimi.....	77
Şekil 4.6: Dümen ok açısı ve sapma açısının tanıtılması.....	78
Şekil 4.7: Süperkavite su altı aracının dümen dönüşümleri.....	78
Şekil 4.8: Süperkavite su altı aracı ufki dümen sapması.	80
Şekil 4.9: Süperkavite su altı aracı amudi dümen sapması.....	80
Şekil 4.10: Süperkavite su altı aracı amudi yuvarlanma dümeni sapması.....	81
Şekil 4.11: Eksen takımı geçiş vektörlerinin ifade edilmesi.....	82
Şekil 5.1: Hidrodinamik denklem setinin bileşenlerinin genel şeması.....	95
Şekil 6.1: Hidrodinamik analiz modeli geliştirilmesinin genel şeması.	108
Şekil 6.2: Silindirik çözüm uzayı ölçüleri.	110
Şekil 6.3: Eliptik BOI hacminin boyutlandırılması.	110
Şekil 6.4: 4 farklı tipteki çözüm ağı modellemesi.	112
Şekil 6.5: Birimsiz kavitasyon zarfı uzunluğuna bağlı basınç katsayısı dağılımının 4 farklı çözüm ağına göre değişimi.	114
Şekil 6.6: 2 farklı çözüm ağı kullanılarak gerçekleştirilen had analizlerindeki torpido geometrisi [55].	115
Şekil 6.7: Tetrahedral ve polyhedral çözüm ağı tipleri.....	115
Şekil 6.8: 4 farklı çözüm ağı yoğunluğunda HAD analizleriyle elde edilen kavitasyon zarfları.	118
Şekil 6.9: Kontrol yüzeyleri olmayan torpido modeli üzerinde su fazı yüzdesi dağılımının 2D gösterimi.	122
Şekil 6.10: Yapılan HAD analizi sonuçlarına göre elde edilen kavitasyon zarfı geometrisi.....	125
Şekil 6.11: Kavitasyon zarfı uzunluğunun sıvı fazı oranına bağlı gösterimi.....	127
Şekil 6.12: Kavitasyon zarfı çapının sıvı fazı oranına bağlı gösterimi.	127
Şekil 6.13: 0.05 kavitasyon sayısında 45 derece yarım açılı konik kavitatör ve disk kavitatör için elde edilen zarf geometrileri.	129
Şekil 6.14: Sırasıyla 0.02 ve 0.08 kavitasyon sayılarında kavitasyon zarfı geometrileri.	130

Şekil 6.15: Disk kavitatörlerde had sonucunda elde edilen sürüklenme katsayısının literatür veri havuzu ile karşılaştırılması.....	131
Şekil 6.16: Disk kavitatörlerde had sonucunda elde edilen kavitasyon zarfı çap parametresinin literatür veri havuzu ile karşılaştırılması.	131
Şekil 6.17: Disk kavitatörlerde had sonucunda elde edilen kavitasyon zarfı uzunluk parametresinin literatür veri havuzu ile karşılaştırılması.	131
Şekil 6.18: 45 derece yarım açılı konik kavitatörlerde had sonucunda elde edilen sürüklenme katsayısının literatür veri havuzu ile karşılaştırılması.	132
Şekil 6.19: 45 derece yarım açılı konik kavitatörlerde had sonucunda elde edilen kavitasyon zarfı çap parametresinin literatür veri havuzu ile karşılaştırılması.	132
Şekil 6.20: 45 derece yarım açılı konik kavitatörlerde had sonucunda elde edilen kavitasyon zarfı uzunluk parametresinin literatür veri havuzu ile karşılaştırılması.	133
Şekil 7.1: Hücum açısına bağlı olarak birimsizleştirilmiş eksenel kuvvetin incelenmesi.....	141
Şekil 7.2: Hücum açısına bağlı olarak birimsizleştirilmiş düşey öteleme kuvvetinin incelenmesi.....	141
Şekil 7.3: Hücum açısına bağlı olarak birimsizleştirilmiş yunuslama momentinin incelenmesi.....	142
Şekil 7.4: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki düşey öteleme kuvvetinin değişimi.	144
Şekil 7.5: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz eksenel kuvvetin değişimi.	145
Şekil 7.6: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz düşey öteleme kuvvetinin değişimi.	146
Şekil 7.7: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz yunuslama momentinin değişimi.	147
Şekil 7.8: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz eksenel kuvvetin değişimi.	150
Şekil 7.9: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz düşey öteleme kuvvetinin değişimi.	150
Şekil 7.10: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz yunuslama momentinin değişimi.	151
Şekil 7.11: Yunuslama açısal hızına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz eksenel kuvvetin değişimi.	154
Şekil 7.12: Yunuslama açısal hızına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz düşey öteleme kuvvetinin değişimi.	155
Şekil 7.13: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz yunuslama momentinin değişimi.	155
Şekil 8.1: Hücum açısına bağlı lineerleştirilmiş yunuslama momenti ifadesi.....	163
Şekil 8.2: Lineerleştirilmiş düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti katsayısı.	165
Şekil 8.3: Sapma açısına bağlı lineerleştirilmiş sapma momenti ifadesi.....	166
Şekil 8.4: HAD analizleri yapılarak 5° kavitatör yunuslama açısında gerçekleştirilen hücum açısı taraması sonuçları.	178
Şekil 8.5: Düşey öteleme kuvveti için $\delta_{cp}(\alpha)$ kontrol etkinliği.	178
Şekil 8.6: Yunuslama momenti için $\delta_{cp}(\alpha)$ kontrol etkinliği.	179
Şekil 8.7: HAD analizleri yapılarak 2° ufki dümen sapma açısında gerçekleştirilen hücum açısı taraması sonuçları – Düşey Öteleme Kuvveti.....	180

Şekil 8.8: HAD analizleri yapılarak 2° ufki dümen sapma açısında gerçekleştirilen hücum açısı taraması sonuçları – Yunuslama Momenti.....	180
Şekil 8.9: Düşey öteleme kuvveti için $\delta_e(\alpha)$ kontrol etkinliği.	181
Şekil 8.10: Yunuslama momenti için $\delta_e(\alpha)$ kontrol etkinliği.	181



SÜPERKAVİTE SU ALTI ARAÇLARININ HİDRODİNAMİK MODELLENMESİ VE KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Yüksek hızlı su altı araçları hidrodinamik, aerodinamik ve termodinamik gibi bilimleri bünyesinde barındıran çok disiplinli bir teknolojiye sahiptir. Yüksek hızlı su altı araçlarına ait mühendislik disiplinlerini birlikte inceleyen teknoloji süperkavitasyon teknolojisi olarak adlandırılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında süperkavitasyon teknolojisi bir süperkavite su altı aracı özelinde incelenmiştir.

Süperkavite su altı araçları geleneksel su altı araçlarından farklı alt sistemlere sahiptirler. Bu alt sistemler aracın burun bölümünde yer alan kavitasyon başlığı ve kuyruk bölümünde yer alan roket motorlu itki sistemleridir. Süperkavite su altı araçları sahip oldukları bu özelleşmiş alt sistemler sayesinde su altında +160 knot gibi yüksek hızlara ulaşabilmektedirler. Herhangi bir insan kontrolüne ihtiyaç duymadan otonom olarak seyir edebilen süperkavite su altı araçları geleneksel su altı araçlarına benzer bir dış forma sahiptirler.

Tez kapsamında ilk olarak süperkavite su altı araçları ve süperkavitasyon olgusu tanıtılmıştır. Ardından disk ve konik kavitatör gibi kavitatör tipleri için literatürden elde edilen teorik eşitliklerden ve deneysel çalışmalardan yararlanılarak bir tarama çalışması yapılmış, bu sayede bir veri havuzu oluşturulmuştur. Veri havuzu oluşturulurken sürüklenme kuvveti, birimsiz kavitasyon zarfı uzunluğu ve birimsiz kavitasyon zarfı çapı gibi süperkavitasyon olgusuna özgü parametreler incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalardan yararlanılarak bir veri havuzu oluşturulmasının amacı süperkavitasyon karakteristiğinin çözümlenmesi ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri kullanılarak yapılacak olan doğrulama çalışmaları için bir referans oluşturmaktır. Doğrulama çalışması için bir veri havuzu seçilmesinin nedeni ise farklı bilim insanları tarafından gerçekleştirilen çalışmaları bir araya toplayarak olası ölçüm, hesaplama ve sayısal hataları minimuma indirmektedir.

Süperkavite su altı aracı etrafında istenen kavitasyon zarfının oluşması için kavitasyon sayısının düşürülmesi gerekmektedir. Lakin her zaman istenen kavitasyon sayısına doğal koşullarla ulaşılammaktadır. Bu gibi durumlarda kavitasyon sayısını düşürmek için yapay kavitasyon metotları kullanılmaktadır. Tez kapsamında yapay kavitasyon oluşturma metotları ile yapay kavitasyonun oluşum ve süreklilik fazları hakkında teorik bilgilendirmeler yapılmıştır. Ancak tezin ilerleyen bölümlerinde yapay kavitasyon rejimi sisteme dâhil edilmemiş ve bu kapsamda süperkavite su altı aracının beklenen kavitasyon sayısına doğal kavitasyon yoluyla ulaşabildiği varsayılmıştır. Bu durumun temel nedeni yapay kavitasyon etkisinin sistemin hidrodinamik karakteristiğini değiştirmemesidir. Bu etki yalnızca sistemde kullanılacak roket motorlu itki sisteminin performansı ile ilişkilidir.

Süperkavitasyon olgusunun, süperkavite su altı aracı ve kavitasyon zarfı karakteristiğinin aktarılmasının ardından tez kapsamında kullanılacak olan süperkavite su altı aracı tanıtılmıştır. Bu kapsamda 2 metre uzunluğunda 15 cm çapında bir süperkavite su altı aracı tasarlanmıştır. Kullanılan süperkavite su altı aracının burun

bölümünde 5 cm çapında bir disk kavitatör tercih edilmiştir. Bununla birlikte süperkavite su altı aracında herhangi bir sabit kanat kullanılmamış, yalnızca dümenlere yer verilmiştir. Dümenlerin süperkavitasyon rejiminden etkilenmemesi içinse dümenler gövdeye geleneksel su altı araçlarından farklı olarak 180° döndürülmüş bir şekilde belirli bir ok açısında yerleştirilmiştir. Bu şekilde bir yol izlenmesinin nedeni su altı aracının kontrol yüzeylerinde kavitasyon zarfı oluşumunu engellemek ve bu sayede dümenlerde oluşan ıslak alanlardan yararlanarak istenilen kuvvet ve momentleri üretmektir. Süperkavite su altı aracının geometrisinin tanıtılmasından sonra süperkavite su altı aracından beklenen performans gereksinimleri belirtilmiştir. Performans gereksinimlerinin belirlenmesinde Bölüm 2'de verilen deneysel çalışmalar kullanılarak elde edilen veri havuzundan yararlanılmıştır. Ek olarak, form tasarımı yapılan ve performans gereksinimleri belirlenen süperkavite su altı aracının fiziksel özellikleri belirlenmiş ağırlık ve sephiye hesaplamaları yapılmıştır. Sephiye hesaplaması yapılırken kavitasyon zarfının ve süperkavite su altı aracının hacim merkezleri ve sephiye kuvvetleri ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Süperkavite su altı aracının hareket denklemleri tanımlanırken geleneksel su altı araçlarında kullanılan yöntem izlenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak hidrodinamik eksen takımları ile dünya eksen takımı tanıtılmıştır. Ardından dünya eksen takımından gövde eksen takımına geçiş anlatılmış, bu kapsamda süperkavite su altı aracının dönüşümünü, kavitatör dönüşümünü ve kontrol yüzeyi dönüşümünü ifade eden matematiksel ifadeler çıkartılmıştır. Eksen takımlarının tanıtılmasının ve eksen dönüşümlerinin elde edilmesinin amacı süperkavite su altı aracının kinematiğinin incelenmesidir.

Bölüm 5'te süperkavite su altı aracının hidrodinamik denklem seti oluşturulmuş ve denklem setinde yer alan hidrodinamik katsayılar tanıtılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak standart denizaltı hareket denklemleri çıkarılmıştır. Bu kapsamda 6 serbestlik derecesinde Gertler M. ve Hagen G. R. hidrodinamik denklem seti oluşturulmuştur. Oluşturulan model üzerinden boyutsuzlaştırılmış kuvvetler, momentler, çizgisel hızlar ve açısal hızlar verilmiştir. Sonrasında eksenel, sapma ve yuvarlanma hareket denklemleri elde edilmiş, denklemlerde yer alan katsayılar hidrostatik ve hidrodinamik bileşenler olmak üzere iki alt grupta incelenmiştir. Geleneksel su altı araçlarını temsil eden katsayıların belirlenmesinin ardından süperkavitasyon olgusuna özgü durumlar belirlenmiş, bu kapsamda ters akış etkileri, ek su kütlesi, akuple etkiler vb. etkiler ihmal edilerek süperkavite su altı araçları için güncellenmiş hidrodinamik denklem seti oluşturulmuştur. Süperkavitasyon rejiminin etkisiyle hidrodinamik denklem setinin güncellenmesiyle 5 SD için süperkavitasyon hareket denklem seti oluşturulmuştur.

Süperkavite su altı aracının kararlılık ve performans hesaplamalarını yapabilmek amacıyla sistemin doğal kavitasyon çözümü etkisinde hidrodinamik analiz modeli geliştirilmiştir. Bu kapsamda literatürde yer alan teorik eşitlikler, deneysel veriler ve ampirik denklemlerden yararlanılmıştır. HAD analiz doğrulama çalışması kapsamında denek taşı araştırması süresince birimsiz kavitasyon zarfı uzunluğu, çapı ve sürüklenme kat sayısı gibi süperkavitasyon rejimini ifade edebilecek ve birer karşılaştırma ölçütü olarak kullanılabilecek parametrelerden yararlanılmıştır. Elde edilen HAD sonuçlarının deneysel veri havuzu içerisinde yer aldığı görülmüştür. Denek taşlarının belirlenmesinin ardından çözüm uzayının, çözüm ağının, hava burgacı modelinin, çok fazlı modelin ve kavitasyon modelinin belirlenmesi çalışmalarına yer verilmiştir. Bu kapsamda bir süperkavite su altı aracının HAD analizini gerçekleştirirken polyhedral çözüm ağının, $k - \omega$ SST türbülans modelinin ve Schnerr-Sauer kavitasyon modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. Sonrasında geliştirilen analiz modelinin doğruluğu denek taşı çalışmaları ile karşılaştırılarak incelenmiş, bu kapsamda denek taşı

alışmaları yüksek sadakatle ifade edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada elde edilen değerlerin veri havuzundaki teorik çalışmalarla ve deneysel verilerler uyumlu bir eğilimde olduğu görülmüştür. Hidrodinamik analiz modelinin geliştirilmesiyle birlikte sistemin hareket denklemlerinde yer alan hidrodinamik katsayılar belirlenebilecek ve bu sayede sistemin hidrodinamik performansı incelenebilecektir.

Tez kapsamında geometrik modeli oluşturulan 5 cm kavitatör çapındaki 2 metre uzunluğundaki süperkavite su altı aracı için farklı operasyon koşullarında gerçekleştirilen HAD analizleri sonucunda 5 serbestlik derecesinde bir hidrodinamik veri tabanı oluşturulmuştur. 5 serbestlik derecesindeki hidrodinamik veri tabanı oluşturulurken süperkavite su altı aracı için ilerleme kuvveti, düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti incelenmiştir. Sapma kuvveti ve sapma momenti de yapılan varsayımlardan yararlanılarak sırasıyla düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momentinin simetrik koşulu olarak değerlendirilmiştir. Süperkavite su altı aracında pervane gibi sistemi ters akış etkilerine maruz bırakacak bir etken olmamasından ötürü sistemde asimetrik etkilerin ve akuple manevra katsayılarının bulunmadığı değerlendirilerek 5 serbestlik derecesinde hidrodinamik denklem seti oluşturulmuş, bu kapsamda hidrodinamik katsayılar belirlenmiştir. Veri tabanı oluşturma çalışması kapsamında toplamda 433 adet seyir koşulu incelenmiştir.

Tez kapsamında süperkavite su altı aracı için geliştirilen hidrodinamik analiz modeli kullanarak hidrodinamik katsayıların çıkarılmasının ardından son olarak aracın kararlılık ve performans hesaplamaları yapılmıştır. Bu kapsamda süperkavite su altı aracının statik ve dinamik kararlılığı incelenmiş, aracın statik ve dinamik olarak kararlı bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Süperkavite su altı aracının statik olarak kararlı bir yapıya sahip olmasının nedenin geleneksel su altı araçlarından farklı olarak burun bölümünde daralan kuyruk bölümünde ise daralmayan bir yapıya sahip olmasından ötürü basınç merkezinin ağrlık merkezinin gerisinde çıkmasıdır. Sistemin dinamik kararlılığı incelenirken de kavitatör ve dümenler olmak üzere iki adet kontrolye de yer verilmiş, iki kontrolü için de ayrı ayrı dinamik kararlılık hesaplamaları yapılarak sistemin dinamik kararlılığı incelenmiştir. Yapılan kararlılık hesaplarının ardından süperkavite su altı aracının sapma manevrası performansı incelenmiş bu kapsamda aracın sapma manevrası esnasındaki minimum dönüş yarıçapı ıkarılmıştır. Süperkavite su altı aracının kontrol etkinliği incelenmiştir.

MODELLING AND INVESTIGATION OF THE HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF SUPERCAVITATING UNDERWATER VEHICLES

SUMMARY

High-speed underwater vehicles have complex technologies that incorporate with scientific fields such as fluid mechanics, aerodynamics and thermodynamics. This technology combines the scientific principles of high-speed underwater vehicles and is known as supercavitation technology. Within the scope of this paper, a supercavitating underwater vehicle with super-cavitation phenomena is studied.

The supercavitating vehicles have different subsystems from the traditional underwater vehicles. They are the cavitation head located in the nose part and the rocket-powered propulsion system located in the tail part of the underwater vehicle. With its specialized subsystems, the supercavitating underwater vehicle can reach up to 160 knots. The supercavitating underwater vehicle can travel autonomously without any human-based manual control, and its appearance is similar to that of a traditional underwater vehicle.

Supercavitating underwater vehicles have the ability to use cavitation technology to travel at high speeds. Normally, cavitation is an undesirable process for underwater vehicles because of its irregular structure under normal circumstances. However, cavitation has been found to be particularly useful for supercavitating underwater vehicles when inadvertent continuity is ensured. When the cavitation number is decreased, the cavitation phenomenon is called as supercavitation due to the regularization of cavitation bubbles. In this process, stabilized cavity bubbles have potential to enclose the supercavitating vehicle and this structure is called as the cavitation envelope.

The cavitation envelope formed under the action of supercavitation has the ability to enclose the underwater vehicle, so the viscous and pressure force effects of the wet zones on the underwater vehicle can be minimized. An underwater vehicle that can be capable of producing a supercavitating process is called as a supercavitating vehicle. In order for an underwater vehicle to become a supercavitating vehicle, it must have reduced the cavitation number and increased the continuity and stability of the cavity bubbles.

However, using cavitation alone may not be able to obtain the required cavitation number. In this case, the underwater vehicle needs a large amount of thrust to form the required supercavitation envelope. Supercavitating vehicles provide this high thrust through a rocket-powered propulsion system. Owing to its custom subsystems, supercavitation underwater vehicles that can form a cavitation envelope and enclose the supercavitating vehicle under the effect of supercavitation which can minimize the effect of their wet areas and, due to its cavity envelope, the drag force reduces up to 90%.

After the introducing supercavitating vehicles and supercavitation phenomena within the scope of the thesis, literature studies were carried out using theoretical equations

and experimental studies on disc and conic cavities by establishing a database. When generating the database, the specific parameters of the supercavitation phenomenon is verified, such as drag force coefficient, dimensionless cavity length and dimensionless cavity diameter. The purpose of database is to analyze the characteristics of supercavitation and obtain reference values for verification and validation studies using Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis. The reason for selecting the validation study is to collect reference values by different scientists to minimize the possible measurement error.

After investigating the cavitation envelope parameters of the supercavitation phenomenon, Waid's experimental researches are examined to define the relationship between the cavity envelope closure of the supercavitating vehicle and angle of attack of the disk cavitator.

The desired cavity envelope should be formed around the supercavitating underwater vehicle, and the cavitation number should be reduced. When the cavity envelope encloses the supercavitating vehicle during operation, cavitation is called as developed cavitation and vehicle is called as cavity running supercavitating vehicle. On the other hand, the number of cavities cannot always be reduced to a desired level through natural cavitation conditions. In this case, the amount of cavitation can be reduced by ventilating the gas into the cavitation envelope, and cavitation number is reduced artificially. Therefore, the reduction of the cavitation by ventilation is called artificial cavitation. This article provides theoretical information about the artificial cavitation method and the formation and continuity stages of artificial cavitation. However, in this thesis, the artificial cavitation mechanism is not included in the system, and it is assumed that the underwater vehicle can reach the expected cavitation number naturally. The main reason for this assumption is that the artificial cavitation effect is only related to the performance of the rocket propulsion system that is used in the system, and does not affect the hydrodynamic characteristics of the system.

After the supercavitation phenomenon, supercavitating vehicle and cavity envelope characteristics are proposed, the geometric specifications of the supercavitating vehicle is introduced. Disk cavitator is preferred at the front section of the supercavitating vehicle as the cavitator type. In addition, supercavitating vehicle has no fixed wings. It has only 4 control surfaces, and the control surfaces are set on the body at a certain sweep angle. The reason why sweep angle is preferred on control surfaces is to avoid the supercavitation effect on the control surfaces to generate the desired force and moment.

Using the geometry of the supercavitating underwater vehicle, the expected performance requirements of the system are pointed out. In order to determine the performance requirements, the experimental results and empirical equations in the second chapter are used. In addition, the physical characteristics of the supercavitating vehicle are determined. After the geometry and performance requirements of the vehicle are determined, weight and buoyancy calculations are performed for supercavitating vehicle and cavity envelope. After that, center of gravity and center of buoyancy are determined. However, in the research, the volume center of the supercavitating vehicle is used as a reference volume center.

While defining the equation of motion and mathematical equation for set of the supercavitating vehicle, the procedures of the traditional underwater vehicles are followed. Firstly, hydrodynamic reference frame and global reference frame are introduced. Then, the transition matrix from the global reference frame to the body reference frame is explained. In this case, mathematical expressions are extracted, which express the transformation of the supercavitating vehicle and control surfaces

of the supercavitating vehicle including cavitator. The purpose of introducing the reference frames and matrix transformation from frame to frame is to investigate the kinematics of the supercavitating vehicle.

In Chapter 5, the mathematical model of the supercavitating vehicle is established, and the hydrostatic and hydrodynamic coefficients are extracted and placed into the mathematical model. In this case, the standard equation set for traditional underwater vehicles is cited first. Taylor Series Expansion is used when extracting the traditional equations of motion set. In this case, the Gertler M.ve Hagen G.R. mathematical model is generated. Non-dimensional forces, moments, linear velocities, and angular velocities are established. Then hydrostatic and hydrodynamic components of the equation set is separated into two subgroups.

After determining the coefficients that represent traditional underwater vehicles motion, the specific conditions of the supercavitation phenomenon is determined. In this case, owing to supercavitating vehicles have different phenomena than traditional underwater vehicles, cross flow effects, additional masses, couple effects, etc. were ignored. After that, the mathematical model for supercavitating vehicles is updated and under the supercavitation effect, a mathematical model of fluid mechanics is introduced and a set of equations of motion with 5 degrees of freedom is established.

A hydrodynamic analysis model is established for the natural cavitation of the system to calculate the stability and performance of the supercavitating underwater vehicle. In this context, theoretical equations, experimental data and empirical equations are used in the literature. The length of the dimensionless cavity length, the diameter and the drag coefficient are used as standards of comparison to express the supercavitation characteristics. After determining benchmark study to generate the CFD analyze modelling, the domain, mesh, turbulence model, multi phase model and cavitation model are selected with respect to reference studies. In this manner, a benchmark study is performed with high reliability. The purpose of this research is to verify the trendlines of the supercavitation parameters according to the experimental data in the database which are obtained through a theoretical investigation in the second section. After the benchmark study is completed, the hydrodynamic coefficients of the equation of the motion of the supercavitation vehicle are determined with the CFD studies. The purpose of establishing this verification study is to evaluate the hydrodynamic performance of the supercavitating vehicle.

In the scope of this article, CFD analyze are performed under different operating conditions for 2 meter long supercavitating vehicle with 5 cm cavitator diameter to generate 5 degree of freedom equation of motion set. While generating the hydrodynamic database, axial force, normal force and pitching moment of the supercavitating vehicle are studied. In addition, lateral force and yawing moment are derived from the symmetrical conditions for the supercavitating vehicle. As a result, pitch plane is transformed to the yaw plane to generate 5 DOF hydrodynamic mathematical model. Since it has no propeller effect on the supercavitating underwater vehicle, the system does not have reverse flow effects, asymmetrical effects and couple effects. Therefore, 5 DOF hydrodynamic equation set is created under the following conditions. In this case, the coefficients and equation set are obtained with 433 CFD analysis.

After establishing the hydrodynamic analysis model of the supercavitating underwater vehicle and the hydrodynamic coefficients, the stability and performance analysis of the vehicle are carried out within the scope of this article. In this case, the static and dynamic stability of the supercavitating vehicle are investigated. After this investigation, the supercavitating vehicle is found as a statically and dynamically

stable. The reason of supercavitating vehicle is statically stable is that the center of pressure is behind the center of gravity unlike traditional underwater vehicles because supercavitating vehicles have a narrow structure at their nose section although traditional underwater vehicles have a narrow structure at their tail section.

The dynamic stability of the control surfaces which are cavitator, rudder and elevator are investigated for supercavitating vehicles. First, the lateral and vertical dynamic stability of the rudder and elevator are determined. After that same dynamic stability elements are performed for cavitator controller. After the static and dynamic stability calculation are completed, the performance of the yaw maneuvering of the supercavitating vehicle is checked and the rotation radius of the yaw maneuvering is executed. At last, the control effectiveness of the supercavitation vehicle is investigated in terms of angle of attack, cavitator deflection, elevator and rudder deflection.



1. GİRİŞ

20. yüzyılın sonlarına doğru gelişen su altı teknolojileri ile birlikte yüksek hızlı su altı araçlarının incelenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Yüksek hızlı su altı araçları hidrodinamik, aerodinamik ve termodinamik gibi bilimleri bünyesinde barındıran çok disiplinli bir teknolojiye sahiptir. Yüksek hızlı su altı araçlarına ait bu bilimleri inceleyen teknoloji de süperkavitasyon teknolojisi olarak adlandırılmıştır. Süperkavitasyon teknolojisi kullanılarak su altı araçlarının +160 knot gibi yüksek hızlara ulaştırılabileceği değerlendirilmiştir. Temel prensibi su altı araçları üzerindeki ıslak alan etkilerini en aza indirmek olan süperkavitasyon teknolojisi normal koşullarda su altı araçları için istenmeyen bir durum olan kavitasyon fiziğinin bir alt başlığıdır.

Basınç ve hız değişimine bağlı doğal veya yapay yollarla elde edilebilen süperkavitasyon rejimi düşük kavitasyon sayılarında kavitasyon baloncuklarının sürekli bir hale gelerek eliptik bir form oluşturmuş halidir. Kavitasyon zarfı olarak adlandırılan bu form kendi içinde sirkülasyon ve akışkan bölgesi olmak üzere 2 adet bölgeden oluşmaktadır. Sirkülasyon bölgesi tamamen gaz fazının yüksek hızlı su altı aracı üzerinde hareket etmesi sonucu oluşan sirkülasyonları, akışkan bölgesi de gaz formunun su formu ile etkileşimi sonucu oluşan kavitasyon zarfının gaz-sıvı arayüzünü ifade etmektedir. Yüksek hızlı su altı araçlarının sahip olduğu kavitasyon zarfındaki sirkülasyonlu bölge sayesinde yüzeyde oluşacak viskoz kuvvetlerinin etkisi aradaki yoğunluk farkına bağlı olarak 1800 kat gibi bir mertebede azalmaktadır. Bu nedenle kavitasyon zarfı süperkavitasyon rejimi için önemlidir.

Yüksek hızlı su altı araçlarının sahip oldukları roket motorlu itki sistemleri tek başına gerekli kavitasyon zarfını oluşturabilecek kabiliyete sahip değildir. Bu nedenle yüksek hızlı su altı araçları istenen kavitasyon zarfını oluşturmak için kavitatör adı verilen kavitasyon baloncukları oluşumunu kolaylaştıran özelleşmiş yapılara ihtiyaç duymaktadırlar. Süperkavitasyon teknolojisine sahip yüksek hızlı su altı araçları ortalama 50 knot hıza kadar operasyon yapabilen geleneksel su altı araçları ile kıyaslandığında farklılaşmış bir tasarım ve analiz gereksinimlerine sahiptir. Bu

nedenle gerekli teknik isterleri karşılayabilecek bir tasarımın oluşturulabilmesi ve doğrulanabilmesi amacıyla geleneksel su altı araçları için kullanılan yöntemlere ek olarak kavitasyon başlığı ve roket motorlu itki sistemleri gibi süperkavitasyon teknolojisini ilgilendiren özgün alt sistemlerin ele alınması gerekmektedir.

1.1. Süperkavite Su Altı Araçlarının Tanımı ve Kullanım Alanları

Süperkavite su altı araçları sahip oldukları kavitasyon baloncukları üreten kavitatörü, roket motorlu itki sistemi, kavitasyon zarfının oluşmasına ve sürekliliğini korumasına yardımcı olan gaz tankı ve düzenleyicisi gibi geleneksel su altı araçlarının sahip olmadığı alt sistemlere sahiptirler. Sahip oldukları özelleşmiş alt sistemleri sayesinde teorik olarak su altında ses hızına kadar çıkabilmektedirler. Bu araçların yüksek hızlarda seyir yapabilme kabiliyetlerinden ötürü tepki süreleri kısadır. Süperkavite su altı araçları kontrol sistemleri, güç sistemleri, elektronik bölümü ve harp başlığı gibi geleneksel su altı araçlarında yer alan alt sistemleri barındırmaktadırlar. Herhangi bir insan kontrolüne ihtiyaç duymadan operasyon yapabilme kabiliyetine sahip olan süperkavite su altı araçları geleneksel su altı aracı hidrodinamik formuna benzer bir forma sahip yüksek hızlı araçlardır.

1.2. Süperkavitasyon Rejiminin Tarihçesi

20. yüzyılın ortalarında kavitasyon tünellerinde kavitasyon fiziğinin incelenmesi sırasında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar süperkavitasyon teknolojisini ortaya çıkarmıştır. Bu kapsamda ilk süperkavite akışların incelenmesi de 1946 yılında Reichardt tarafından yapılmıştır. Süperkavite akışlar konusunda öncü bilim insanlarından biri olan Reichardt farklı kavitatör geometrileri üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir [1]. Reichardt elde ettiği deneysel verileri kullanarak kavitasyon zarfı uzunluğunu ve maksimum çapını ifade eden ampirik denklemler elde etmiştir. Ek olarak yaptığı deneysel çalışmalarla disk kavitatörler üzerinde yapay kavitasyonu gözlemlemiştir. Reichardt'ın çalışmaları sonrasında 1948 yılında *Iowa Institute of Hydraulic Research State University of Iowa* kavitasyon tüneline gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında katı cisim yüzeyi ile serbest akış bölgesindeki su arasındaki hız farkına bağlı olarak oluşan basınç dağılımına göre kavitasyon incelemeleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda kavitasyon büyüklüğünün bölgesel basıncın veya ortam hızının değiştirilmesi ile mümkün olduğu

değerlendirilmiştir. Efros 1946 yılında süperkavite akış problemlerini incelemek amacıyla uyumlu haritalama teknikleri üzerinde çalışmalar yapmıştır [2]. Hunter Rouse ve John S. McNown tarafından herhangi bir hücum veya kayma açısına sahip olmayan disk ve 45 derece yarım açılı konik kavitatörlere sahip silindirik modeller üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda farklı kavitasyon sayılarında basınç dağılımına bağlı olarak kavitasyon zarfının uzunluğu incelenmiştir. Bu sayede basınç dağılımındaki ani düşüşe incelenerek kavitasyon zarfı uzunluğu tayin edilmeye çalışılmıştır [3]. 1953 yılında Tulin süperkavite akışların modellenmesine yönelik iki boyutlu narin cisimler teorisini (two dimensional slender body theory) geliştirmiştir [4]. 1955 yılında Self ve Ripken serbest su jeti tünellerinde denge durumundaki kavitasyonlu akışları incelemişlerdir [5]. 1957 yılında ise Waid gerçekleştirdiği deneysel çalışmalarla disk kavitatörler üzerinde oluşan kavitasyon zarflarını incelemiştir. Aynı zamanda disk kavitatörlerin farkı hücum açılarında oluşturdukları kavitasyon zarflarını da incelemiş, disk kavitatörler özelinde hücum açısı, kavitatör çapı ve seyir hızına bağlı olarak oluşması beklenen kavitasyon zarfının geometrisini veren ampirik denklemler geliştirmiştir [6]. 1964 yılında Tulin iki boyutlu süperkavite akışların incelenmesi amacıyla karışıklık metotlarının (perturbation methods) kullanımını ileri sürmüştür [7]. Cuthbert ve Street kaynak-kuyu akış metotlarını narin eksenel simetrik gövde için kavitasyon eksen boyunca Riabouchinsky kavitasyon kapanma modelinden yararlanarak kullanmışlardır. Yalnızca birkaç durum için başarılı olmaları ile birlikte kavitasyon zarfı şeklini kullandıkları metot ile tayin etmeye çalışmışlardır [8]. 1965 yılında Klose ve Acosta 45 derece yarım açılı konik kavitatörler için kavitasyon zarfı şekillerini ve disk kavitatörler üzerinde oluşan sürüklenme kuvvetini incelemişlerdir [9]. Brennan 1969 yılında potansiyel akış fonksiyonu ekseninde eksenel simetrik geometrilerde disk ve küre tipi kavitatörlerin arkasında oluşan kavitasyonlu akışları analiz etmek amacıyla gevşeme metodunu kullanmıştır [10]. Süperkavitasyon teknoloji kapsamında 1970’li yıllara kadar yapılan çalışmaların genelinde süperkavitasyonlu akışların analitik metotlarla ve deneysel çalışmalarla çözümü üzerine çalışılmıştır. Sonrasında ise yapılan çalışmalara ek olarak sayısal metotlar da süperkavitasyonlu akışların incelenmesi kapsamında kullanılmaya başlanmıştır. 1974’te Chou, eksenel simetrik geometrilerde süperkavitasyonlu akışları narin cisim teorisini kullanarak çözülmesi kapsamında Cuthbert ve Street tarafından gerçekleştirilen çalışmaları ilerletmiştir [8, 11]. 1984 yılında Aitchison bir tüp içerisinde sonlu çaptaki ve sonsuz uzunluktaki bir disk kavitatör kullanılarak

gerçekleştirilen süperkavitasyonlu akışları çözmek amacıyla değişken sonlu elemanları kullanmıştır [12]. 1989'ta Uhlman düz plaka bir hidrofoil üzerinde süperkavitasyonlu akışları lineer olmayan potansiyel akış prensibine göre çözmek için yüzey tekillik metodunu (surface singularity method) kullanmıştır [13]. 1991 yılında Vorus süperkavite akışlarda Laurent serisini kavitasyon zarfı geometrisini tanımlamak amacıyla kullanmıştır ve bunun sonucunda gerçeğe daha yakın kavitasyon zarfı kapanma profilleri elde etmiştir. Vorus'un elde ettiği sonuçlar daha önceki tahminlere göre sürüklenme kuvvetinin belirlenmesinde bir takım farklılıkları da ortaya çıkarmıştır [14]. Kuria 1997 yılında Chou'nun yaptığı gibi narin cisim problemlerini çözmeye çalışmıştır. Chou'dan farklı olarak tadil edilmiş Chebyshev polinomları ile Spektral metodunu kullanmış, bir takım spesifik problemler için çözümler elde etmiştir [15]. 1994'lü yılların başlarında, süperkavitasyon etkisindeki eksenel simetrik geometriler için iki adet hidrodinamik sayısal model geliştirilmiştir. Bunlardan ilki Varghese tarafından geliştirilen narin geometriler teorik modeli, ikincisi ise Kirschen tarafından geliştirilen sınır elemanları modelidir [16, 17, 18]. Elde edilen bu modeller literatürde yer alan sayısal ve deneysel sonuçlarla kıyaslanmış ve yüksek sadakatli sonuçlar elde edilmiştir. 1995'te Kinnas ile Mishima & Kinnas süperkavite hidrofoiller ve süperkavite kanatlar etrafındaki akışları incelemişler. Yaptıkları çalışmalar kapsamında süperkavitasyonlu akışlarda Lagrange çarpım metodunu kullanarak optimize edilmiş hidrofoil geometrileri elde etmişlerdir [19, 20]. 1996 yılındaysa Mishima sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış optimizasyon problemlerinde çarpım metodlarını ve gecikme parametresi güncelleme şemasını kullanarak hidrofoil optimizasyonu ve kavitasyon modellenmesi üzerine çalışmalar yapmıştır [21]. 2003 yılına gelindiğinde ise Hase düzlemsel ve eksenel simetrik süperkavite akışları modellemek amacıyla iç kaynak metodunu geliştirmiştir [22]. 2005'te Verghese, Uhlman, Kirschner yüksek hızlarda seyir yapan eksenel simetrik geometrilerin kısmi kavitasyonlu akışlarının sayısal analizleri için sınır elemanları metodunu kullanmışlardır [23]. Aynı yıl içinde, Alyanak birçok farklı kavitatör geometrisi tasarlamış, süperkavite torpidolarda optimize edilmiş bir kavitatör geometrisi elde etmek amacıyla kavitatör geometrisinin optimizasyon parametrelerini düzenlemiştir [24]. Alyanak kavitatör modellenmesinde kullanılmasını öngördüğü birtakım birimsiz parametreleri tanımlamıştır [25]. Choi ise kavitatör geometrisi optimizasyon prosedürünü tasarım hassasiyet analizleri kullanarak incelemiştir [26]. 2007 yılında

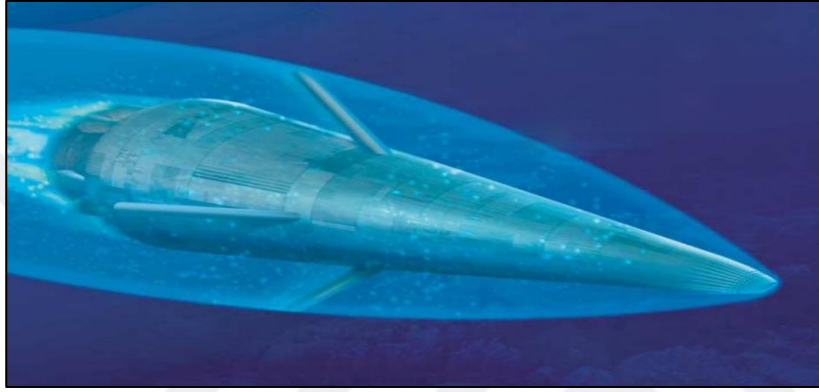
Shafaghat iki boyutlu süperkavite akışları çözmek için sınır elemanları metodunu kullanılmıştır [27].

2000’li yıllara kadar süperkavitasyon rejiminin karakteristiğinin çözümlenmesi kapsamında öncelikle teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda deneysel verilerden elde edilen ampirik eşitliklerden ve teorik ifadelerden faydalanılarak süperkavitasyon karakteristiği modellenmeye çalışılmış ve sınır elemanları yöntemleri, serbest akış üzerinde sınır tabaka çözümü gibi konular irdelenmiştir. Gelişen teknolojiyle birlikte yapılan çalışmalar sayısal yöntemleri de içine alacak şekilde incelenmiş, süperkavitasyon rejiminin karakteristiği sayısal yöntemler yardımıyla da çözümlenmeye çalışılmıştır. Son 15 yılda ise süperkavite araçları özellikle sayısal metotların geldiği seviye ile birlikte analiz ortamlarında incelenebilmiş ve süperkavitasyon fiziğinin kapsamı bir adım ileriye taşınarak kavitasyon zarfının içerisine gaz basılması, yapay kavitasyonun incelenmesi, kavitasyon zarfı plüm etkileşimi gibi konuların çözülebilirliği görülmüştür. Bu tez çalışması kapsamında ise süperkavitasyon rejiminin doğal kavitasyon karakteristiğinin incelenmesi, hidrodinamik denklem setinin oluşturulması, hidrodinamik katsayıların elde edilmesi, kararlılık ve performans hesaplarının yapılması gibi konulardaki çalışmalara yer verilmiştir. Çalışmada süperkavite su altı araçlarının hedeflenen kavitasyon zarfını doğal kavitasyon sayesinde elde ettiği varsayımı yapılmış, temel hareket denklemleri ve bu denklemlerin hidrodinamik çözümlenmesi bu bağlamda incelenmiştir.

1.3. Süperkavitasyon Teknolojisi ve Konsepti

Süperkavite torpido sistemleri, geleneksel ağır torpidolardan farklı olarak temelinde iki farklı alt sisteme sahiptirler ve bu iki özgün alt sistemleri sayesinde süperkavite su altı aracı özelliği kazanırlar. Bu sistemler torpidonun burun bölgesinde yer alan kavitasyon üretici mekanizmalar ve arka gövde bölümünde bulunan roket motorlu itki sistemleridir. Süperkavite su altı araçları sahip oldukları kavitasyon üretici mekanizmalarının ürettikleri kavitasyon baloncukları ve roket motorlu itki sistemlerinin sağladığı yüksek itki kabiliyetleri sayesinde aracın etrafında kavitasyon zarfı olarak adlandırılan gaz fazından oluşan ve su altı aracını sıvı fazından ayıran yapıya ulaşırlar. Bu kavitasyon zarfı, süperkavite su altı aracının etrafını sararak, aracın bir kavitasyon balonu içerisindeymiş gibi seyir yapmasına olanak sağlar. Gaz fazı içerisinde hareket eden su altı aracının üzerinde ıslak alan etkilerinin azalmasından

ötürü bu teknoloji araca düşük direnç seviyelerinde (sürüklenme kuvveti) operasyon yapabilme kabiliyeti kazandırır. Ek olarak süperkavite su altı araçlarının sahip oldukları roket motorlu itki sistemleri, bu araçların su altında yüksek hızlarda hareket etme kabiliyeti sağlar. Süperkavitasyon teknolojisini kullanarak su altında bir hava kabarcığı içerisinde çok yüksek hızlarda seyir yapabilen, yüksek zarar verme potansiyeline sahip, su altı veya su üstü platformlarından atılabilen su altı sistemlerine süperkavite su altı aracı adı verilir. Süperkavite su altı aracı etrafında oluşması beklenen temsili kavitasyon zarfıyla birlikte Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Temsili bir süperkavite su altı aracı etrafında oluşması beklenen temsili kavitasyon zarfı [28].

Süperkavite su altı araçları kavitasyon zarfı oluşturabilmeleri ve seyirlerine kavitasyon zarfı içerisinde devam edebilmeleri için yüksek itki kuvvetine ihtiyaç duyarlar. Geleneksel ağır torpidolarda yer alan pervaneli itki sistemleri, su altı araçlarını 160 knot gibi yüksek hız mertebelerine çıkarabilmek için yeterli kabiliyete sahip değildirler. Bu nedenle süperkavite su altı araçları geleneksel su altı araçlarından farklı olarak ihtiyaç duydukları yüksek itki kuvvetlerini pervaneli itki sistemlerini kullanarak sağlamazlar. İhtiyaç duyulan itki kuvvetinin yüksek seviyelerde olmasından ötürü süperkavite su altı araçlarında roket motorlu itki sistemleri tercih edilmektedir.

Süperkavite su altı araçlarının su ortamında +160 knot gibi yüksek hızlarda seyir edebilmesi için minimize edilmesi gereken kuvvet direnç (sürüklenme) kuvvetidir. Süperkavite su altı araçları tasarlanırken özellikle ıslak alan etkisinde oluşacak olan viskoz ve basınç kuvvetinin minimize edilmesi kapsamında burun bölümünde kavitasyon başlığı adı verilen özelleşmiş bir sistem kullanılmaktadır. Su altı aracının burun bölümünde bulunan kavitasyon başlığının ana görevi su altı aracının etrafında kavitasyon zarfı oluşumunu sağlamaktır. Ancak süperkavite su altı araçlarının istenen kavitasyon zarfını oluşturması yalnızca kavitasyon başlığı tarafından üretilen

kavitasyon baloncuklarıyla mümkün değildir. Kavitasyon başlığına ek olarak süperkavite su altı aracının istenen kavitasyon zarfını oluşturmaları ve seyrine gaz fazından oluşan kavitasyon zarfı içerisinde devam edebilmesi için su altı aracına sürekli olarak yüksek seviyelerde bir itki kuvveti beslenmesi gerekmektedir.

Roket motorlu itki sistemleri ve süperkavite su altı aracının kavitasyon başlığı sayesinde istenen kavitasyon zarfı oluşturulabilecek ve araç seyri boyunca bu kavitasyon zarfı içerisinde tutulabilecektir. Bu süreçte süperkavite su altı araçları ile seyir yapılan sıvı fazı arasında bir gaz tabakası oluştuğu için su altı aracı üzerinde oluşan ıslak alan etkileri minimize edilebilecektir. Bu sayede seyir koşullarına ve su altı aracının geometrisine bağlı olarak aracın üzerindeki sürüklenme kuvveti $\leq 82\%$ mertebesinde azalacaktır [29]. Dolayısıyla, kavitasyon başlığı ve roket motorlu itki sistemlerinin etkisiyle oluşan kavitasyon zarfı içerisinde yer alan sistemin üzerindeki viskoz ve basınç kuvvetleri, serbest akışın sıvı fazı yerine gaz fazı içerisinde olmasından ve serbest akış bölgesinde daha düşük hız vektörlerinin yer almasından ötürü sıfıra yakın seviyelerde kalacaktır.

Su altı aracı üzerinde oluşan kuvvetlerin direkt su ile temas eden yüzeylerinin minimize edilmesinden ötürü yüksek hızlı seyir koşullarında süperkavite su altı araçları üzerinde oluşan toplam sürüklenme kuvveti geleneksel torpidolara kıyasla düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu özelliklerinden ötürü süperkavite su altı araçları geleneksel su altı araçlarından farklı burun ve kuyruk geometrilerine sahiptirler. Burun bölümünde kavitasyon başlığı ve kuyruk bölümünde roket motorlu itki sistemi bulunduran SHKVAL süperkavite su altı aracının genel geometrik yapısı Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2: Süperkavite su altı araçlarının genel geometrik görünümü [30].

1.4. Benzer Sistemler ve Teknolojiler

Süperkavitasyon karakteristiğinin su altı araçları üzerinde incelenmesi amacıyla ilk olarak literatür araştırması yapılmış ve sonrasında dünyada kullanılan benzer sistemler incelenmiştir. Çizelge 1.1’de literatüre giren süperkavite su altı aracı üretici ülkeler genel özellikleriyle birlikte verilmiştir.

Çizelge 1.1: Literatürde yer alan süperkavite su altı araçları.

Ülke	Rusya [30]		İran [31]	Almanya [32]
Su Altı Aracı	Shkval VA-111	Shkval II	Hoot	Barracuda
Boy (mm)	8200	8200	8200	2300
Çap (mm)	533	533	533	160
Ağırlık (kg)	~2700	~2700	~2500	~110
Kovan Çıkış Hızı (knot)	~50	~50	~50	-
Seyir Hızı (knot)	~200+	~300+	≤225	~400
Menzil (km)	7	15	11	6
Harp Başlığı	Nükleer Harp Başlığı	Geleneksel veya Nükleer Harp Başlığı (350kg)	Geleneksel veya Nükleer Harp Başlığı	Geleneksel Harp Başlığı (10 kg)
Güdümlü Sistemi	Ataletsel Güdümlü	Terminal Güdümlü	Terminal Güdümlü	Geliştirilmiş Terminal Güdümlü
İtme Sistemi	Roket Motorlu	Roket Motorlu	Roket Motorlu	Roket Motorlu

1.4.1. Shkval VA-11 & Shkval-2 / Rusya

1.4.1.1. Geliştirme süreci

VA-111 Shkval torpidosunun geliştirme çalışmaları, 1960’lı yılların başında Rus bilim insanı Mikhail Merkulov’un Kiev/Ukrayna’da bulunan Akışkanlar Dinamiği Araştırma Enstitüsü’nde (NII-24), kavitasyonlu akışkanlar üzerine yaptığı çalışmalarıyla başlamıştır. NII-24 Akışkanlar Dinamiği Enstitüsü’nün ve GSKB-47 Uygulamalı Hidromekanik Araştırma Enstitüsü’nün yaptığı 20 yıla yakın çalışmalar sonrasında 1977 yılında operasyonel ilk örnek Sovyet Donanması için üretilmiştir. Ortaya çıkan ilk örnek güdümsüz ve kısa menzillidir. O yıllarda deniz altı haberleşme, tespit ve sınıflandırma kabiliyetlerinin sınırlı olması sebebiyle Shkval torpidosunun, denizaltılara ve torpidolara karşı tedbir odaklı kullanılması amaçlanmıştır. Torpidonun

geliştirme çalışmaları ilk örnek olarak ortaya çıkmasından itibaren devam edilmiş ve 1998 yılında hizmete giren Shkval VA-11 torpidosunun yeni modu olan Shkval-2'nin ihraç versiyonunun tanıtımı 1999'da Abu Dhabi'de gerçekleştirilen IDEX 99 fuarında yapılmıştır. Günümüzde halen Shkval-2 torpidosunun kullanımına ve geliştirme çalışmalarına devam edilmektedir. Ekim/2015 yılında Rusya "Predator" isimli yeni bir süperkavite torpido çalışmalarının olduğunu, bu torpidonun geliştirilmiş arama ve güdüm özellikleri sayesinde yüksek hassasiyetli tespit özelliği olduğunu ve denizaltılar için büyük bir tehdit oluşturacağını basına bildirmiştir. Ancak Predator torpidosunun geliştirme çalışmaları tamamlanmamış ve henüz Rus Donanması'nda aktif olarak kullanılmaya başlanmamıştır.

1.4.1.2. Teknik özellikleri

VA-111 torpidosu 533 mm çapındaki torpido tüplerinden 50 knot hız ile atılabilen ve kovandan çıkış itibari ile arkasındaki ana roket motorunun devreye girmesi sayesinde 200 knot hıza ulaşabilen süperkavite özellikli ağır torpidodur. Burun bölgesinde bulunan kavitasyon başlığı olarak adlandırılan özelleşmiş sistemi sayesinde torpido etrafında düzenli bir kavitasyon zarfı oluşur ve torpidonun suyla temasının minimize edilmesiyle torpido üzerindeki sürüklenme kuvveti yüksek mertebelerde azalır. Bu durum torpidonun yüksek hızlara ulaşmasında etkilidir. Shkval torpidosu katı yakıtlı roket sistemi ile itkisini sağlamaktadır. Süperkavite torpidolar seyir boyunca kavitasyon başlığının daimi çalışması ve yüksek hızlarda seyir yapması sebebiyle yüksek enerji kapasitesine ihtiyaç duyarlar. Bu durum süperkavite torpidolarının menzil değerini düşürür. Bu nedenle Shkval VA-111 torpidosu 7 km ve geliştirilmiş modu olan Shkval-2 torpidosu da en fazla 15 km menzile sahiptir. Günümüzde yapılan geliştirme çalışmaları kapsamında süperkavite torpidolarının menzil kapasitesinin artırılması hedeflenmektedir.

VA-111 torpidosunun ilk tasarımlarında sadece ataletsel güdüm sistemi bulunmaktadır ve bu güdüm sistemi ile hücum etmektedir. Ancak yapılan tasarım çalışmaları sonrasında ortaya çıkan Shkval-2 mod'unda terminal güdüm sistemi geliştirilmiş ve torpidoya dâhil edilmiştir. Torpidonun ilk versiyonları nükleer harp başlığı taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Sonraki tasarımlarda geleneksel harp başlığı taşıyabilen konfigürasyonu da geliştirilmiştir. Bu torpidolar yüksek tahrip gücüne sahiptirler ve 350 kg harp başlığı taşıma kapasiteleri vardır.

Shkval torpidosu, bir kısmı kavitasyon zarfı içerisinde bir kısmı da kavitasyon zarfı dışarısına bulunan 4 adet kontrol yüzeyi sayesinde kontrol edilir. Shkval torpidolarında sabit kanat yoktur ve kontrol yüzeyleri torpedo kovan içerisindeyken kapalıdır, torpidonun kovandan çıkışı itibarı ile kontrol yüzeyleri açılır ve torpidoyu kontrol eder. Shkval torpidosunun kontrol yüzeylerinin belli açılarda konumlandırılabilirdiği değerlendirilmektedir. Shkval-2 torpidosunun sahip olduğu çok yüksek hızlarda seyir yapabilme kabiliyetinden ötürü manevra kabiliyetleri düşüktür. Yapılan geliştirme çalışmalarında torpidonun manevra kabiliyetini arttırmak için vektör kontrollü itki sağlayıcılar üzerinde çalışılmaktadır. Shkval-2 torpidosunun görseli Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3: Shkval-2 (Rusya) süperkavite torpidosu [30].

1.4.1.3. Operasyonel durumu

Süperkavite torpidolar, Rus Donanması tarafından 1977 yılından itibaren operasyonel olarak kullanılmaktadır. Üretimleri, Kırgızistan'daki %75'i Rus Hükûmetine ait tesislerde yapılmaktadır. 1998 yılında terminal güdüm sistemine sahip ve Shkval VA-

111'e göre daha uzun menzile sahip Shkval-2 torpidosunun testleri yapılmış, sonrasında operasyonel olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Shkval-2'nin ihraç versiyonunun tanıtımı 1999 yılında Abu Dhabi'de gerçekleştirilen IDEX 99 fuarında yapılmıştır. Süperkavite torpido teknolojisindeki geliştirilmesi gereken arama ve tespit güdümü, menzil, manevra kabiliyeti gibi özelliklerden ötürü Shkval-2 torpidosunu geliştirme çalışmaları günümüzde devam edilmektedir. Rusya Shkval torpidosunun tersine mühendislik üzerinden teknolojisinin çözümlenmesini engellemek amacıyla ithalat versiyonu olan Shkval-E torpidosunu üretmiştir ve bu versiyon 1998 yılında Çin Donanması tarafından 40 adet alınmıştır. Daha sonralarında da sınırlı sayıda Shkval-E Torpidosu Fransa ve İran Donanmaları tarafından alınmıştır. Bu mühimmat günümüzde Rusya, Çin, Fransa ve İran Donanmalarında mevcuttur.

1.4.2. Hoot süperkavite torpidosu / İran

1.4.2.1. Geliştirme süreci

Hoot Torpidosu İran Deniz Kuvvetleri tarafından Rusya'nın Shkval torpidosu üzerinden tersine mühendislik yapılarak İran Donanması için geliştirilmiştir. Kalifikasyon atışları İran Donanması'nın yaptığı bir tatbikatta, bir su üstü gemisinden atılarak ve bir denizaltıyı imha ederek Nisan 2006 yılında yapılmıştır. İran bu mühimmatı, geleneksel torpidolardan kat ve kat hızlı yüksek tahribat güçlü bir torpido şeklinde 2006 yılında dünyaya duyurmuştur. 2007 yılında da Hoot torpidosunun geliştirilmesine yönelik atışlı deniz testleri raporlanmıştır. Günümüzde Hoot süperkavite torpidosu kullanımına devam edilmektedir.

1.4.2.2. Teknik özellikler

İran Deniz Kuvvetleri tarafında geliştirilen bu torpido Shkval-2 Torpidosu kullanılarak tersine mühendislik yöntemleriyle geliştirildiği için, teknik özellikleri bakımından Shkvak-2 torpidosunun replikasıdır. 11-15 km uzaklıktaki bir hedef için yaklaşık 220 knot hızla kullanılabilen, yüksek patlayıcı kapasiteli, katı yakıtlı roket motoruna sahip, terminal güdümlü bir süperkavite torpidodur. Hoot süperkavite torpidosu Şekil 1.4'te gösterilmiştir.

1.4.2.3. Operasyonel durumu

2006 yılında İran Donanması tarafından kullanılmaya başlanılan bu torpidonun 2007 yılı ve sonrasında geliştirme testlerine devam edilmiştir. Günümüzde İran Donanması

envanterinde bulunmaktadır. Şekil 1.4'te Hoot süperkavite su altı aracının görseli verilmiştir.



Şekil 1.4: Hoot (İran) süperkavite torpidosu [31].

1.4.3. Barracuda / Almanya

1.4.3.1. Geliştirme süreci

Alman mühendisler Süperkavite teknolojisi üzerinde çalışmaya 1970'li yılların sonlarında başlamışlardır. 1980'li yılların sonlarında Diehl BTG Savunma şirketi tarafından Barracuda isminde ilk Alman su altı roketi geliştirmeye başlanmıştır. 10 yıl sonra, 1990'lı yılların sonlarında Diehl BTG Savunma şirketi tarafından Barracuda torpidosunun ilk başarılı atışlı testleri icra edilmiştir. Sonrasında bu torpidonun geliştirme süreçlerinde Diehl BTG Savunma ve Altas Elektronik şirketi ortaklaşa çalışmışlardır. Barracuda torpidosunun geliştirme süreci, Alman Diehl BTG Defence Savunma Şirketinin Süperkavite torpido geliştirme projesi üzerinde çalıştıklarını 2004 yılında dünyaya duyurmaları ile açığa çıkmıştır. Bu torpidonun kalifikasyon faaliyetleri henüz tamamlanmamıştır ve geliştirme çalışmalarına devam edilmektedir.

1.4.3.2. Teknik özellikler

Barracuda torpidosu itkisini katı yakıtlı roket motoru ile sağlamakta ve 220 knot seyir hızına ulaşabilmektedir. Torpidonun seyri boyunca etrafında düzenli kavitasyon zarfı oluşumunu için burun bölümünde torpidonun manevralarına göre hareket eden diğer süperkavite torpidolardan farklı olarak konik şeklinde kavitatör geometrisine sahip kavitasyon başlığı geometrisi bulunmaktadır. Torpidonun elektronik bölümünde geliştirilmiş ataletsel güdüm sistemi ve arayıcı elektronik birimi bulunmaktadır.

Alman mühendisler Barracuda'nın arayıcı ve güdüm özelliklerini geliştirmek için torpido üzerinde (burun, kuyruk vb. çeşitli bölgelerde) sonar dizini yerleştirme çalışmaları yapmışlardır. Ancak süperkavite su altı araçlarının sahip olduğu yüksek gürültü seviyesi ve kavitasyonlu akış karakteristiği yerleştirilen sonarları kör etmiş ve işlevsel bir şekilde kullandırtmamıştır. Süperkavite torpido teknolojisinin zorluğuna rağmen Barracuda sahip olduğu fiber-optik özellikli jiroskop ve otomatik arayıcı birim sayesinde muadillerine göre gelişmiş bir güdüm özelliğine sahiptir.

Alman mühendisler yaptıkları atışlı testlerde bu torpidoya düz bir doğrultuda gitme ve bir yay rotasını takip etme görevlerini gerçekleştirmişlerdir.

Barracuda torpidosu ilk olarak Mayıs 2005'te Singapur'da düzenlenen IMDEX fuarında sergilenmiştir. Geliştirici şirket bu torpidonun Shakval torpidosuna göre daha hızlı, daha yüksek manevra kapasiteli ve geliştirilen arayıcı birimi sayesinde daha yüksek hassasiyetli güdüm kabiliyetine sahip olduğunu bildirmiştir.

Barracuda torpidosu, diğer Süperkavite torpidolara göre oldukça hafiftir ve toplamda 110 kg ağırlığında, 2300 mm uzunluğunda ve 160 mm çapındadır. Toplamda 10 kg harp başlığı taşımaktadır ve en fazla hızı 450 knot civarında olup manevra dönüş çapı 120 metre mertebelerindedir. Bu torpido hedefe yönelme aşamasında hedefin etrafında tam bir dönüş yapabilme kabiliyetine sahiptir. Barracuda torpidosunun kavramsal görseli Şekil 1.5'te gösterilmiştir.



Şekil 1.5: Barracuda (Almanya) süperkavite torpidosu [32].

1.4.3.3. Operasyonel Durumu

1990'lı yılların sonlarında atışlı testlerle tasarımı doğrulanan Barracuda torpidosunun 2005 yılında Singapur'daki IMDEX fuarında dünyaya tanıtılmasının ardından

geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Bu torpidonun güdüm, hız, manevra ve menzil gibi performans parametrelerinde Shkval torpidosundan daha iyi olduğu iddia edilmiş ve belirli bir seviyeye gelmiş olsa da, kalifikasyon faaliyetleri tamamlanmamıştır. Bu nedenle Alman Donanması tarafından aktif olarak kullanılmamakta ve donanmanın envanterinde yer almamaktadır.



2. SÜPERKAVİTASYON REJİMİNİN TANITILMASI VE KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Bu bölümde ilk olarak süperkavitasyon rejimi hakkında genel bilgilendirme yapılmıştır. Sonrasında süperkavitasyon rejiminin doğal kavitasyon, yapay kavitasyon ve kapalı test düzeneklerinde ortam basıncın düşürülmesi olmak üzere üç farklı şekilde elde edilebileceğinden bahsedilmiştir. Sonrasında süperkavitasyon rejiminin karakteristik parametreleri belirlenmiştir. Bu kapsamda sürüklenme katsayısı, basınç katsayısı gibi süperkavitasyon rejimi karakteristik parametreleri belirlenmiştir. Ardından kavitasyon zarfı geometrisinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen kavitasyon zarfı geometrileri gösterilmiş ve disk kavitatöre sahip sistemlerin farklı hücum açılarında sahip olması beklenen kavitasyon zarfı geometrileri gösterilmiştir. Son olarak da yapay kavitasyon aşamalarına değinilmiş ve kavitasyon zarfı yüzeyinde bozuntuya sebep olabilecek davranışlar incelenmiştir.

2.1. Süperkavitasyon Rejiminin Tanıtılması

Su altında düzenli bir akış rejimini Bernoulli Prensibine göre ele aldığımızda, akış hızının arttığı bölgelerde statik basınç değerinde düşüşler gözlemlenecektir. Akış hızının artmasıyla birlikte statik basınç değerinin buharlaşma basıncına yaklaşması sonucunda kabarcık şeklinde baloncuk oluşur ve oluşan bu baloncuk oluşumuna kavitasyon adı verilir. Isınma kaynaklı faz değişiminin aksine bu bölümde anlatılan kavitasyon yalnızca basınç değişimi kaynaklı oluşmaktadır.

Normal şartlarda kavitasyon su altı araçları için istenmeyen bir süreçtir. Ancak, anlık basınç değişiminin aksine basınç değişiminin sürekliliğinin sağlandığı durumlarda kavitasyon baloncuklarının birleşmesiyle ortaya çıkan kavitasyon bulutu su altı aracının etrafını tamamen sarabilecek kabiliyete sahiptir. Süperkavitasyon rejiminin temelini oluşturan kavitasyon bulutuna kavitasyon zarfı da denilmektedir. Kararlı ve sürekli bir yapıya sahip olan kavitasyon zarfı sardığı yüzeyleri su buharı ile kaplayarak su altı aracı üzerindeki ıslak alan etkileri kaynaklı ortaya çıkan kuvvetleri minimuma indirir.

Süperkavitasyon rejimi etkisinde yüksek hızlarda seyir yapan bir süperkavite su altı aracı değerlendirildiğinde dinamik basınç değerinin su altı aracının burun bölümündeki durma noktasında sıfıra ulaşır. Yüksek hızlı su araçlarının burun bölümünde kavitasyon başlığı adı verilen özelleşmiş bir alt sistem bulunmaktadır. Kavitasyon başlığının akışa maruz kalan ön kısmında yer alan kavitatör geometrisinin merkezinde durma noktası oluştuktan sonra, kavitatörün merkezinden köşelerine doğru harekete geçen hız vektörleri akım ayrılması oluşuncaya kadar ivmelenir ve bu bölgedeki statik basınç değerinin azalmasına neden olur. Hız vektörünün artması ile bölgedeki statik basınç değeri buharlaşma basıncına yaklaşır ve akım ayrılması ile birlikte kavitasyon baloncukları oluşur. Akım ayrılması esnasında meydana gelen kavitasyon baloncukları basınç farkının sabit tutulmasıyla daimi bir yapıya ulaşır ve oluşan kavitasyonlar kavitasyon zarfı adı verilen eliptik bir geometriyi oluşturur. Oluşan kavitasyon zarfının amacı, su altı aracının etrafını sararak su altı aracını yüksek yoğunluklu su ortamından izole ederek adeta aracın bir gaz balonunun içerisinde hareket etmesini sağlamak ve araç üzerinde oluşacak ıslak alan etkilerini minimize etmektir. Bu sayede su altı aracı üzerindeki viskoz kuvvetler en aza indirgenir. Ek olarak manevra halindeki bir su altı aracı değerlendirildiğinde yalnızca viskoz kuvvetler değil basınç kuvvetleri de ıslak alan etkilerinin kaldırılmasıyla en aza indirgenmiş olur. Basınç değişimi kaynaklı oluşan su buharı sayesinde ıslak alan etkilerinin minimize edilmesi sonucunda su altı aracı üzerinde oluşan basınç ve viskoz kuvvetlerin büyük ölçüde ortadan kaldırılmasına yarayan bu rejime de süperkavitasyon rejimi denir. Literatürdeki deneysel çalışmalar incelendiğinde kavitasyon zarfının etkisiyle su altı aracı üzerinde oluşan sürüklenme kuvveti değerinin %82'ye kadar düşürülebileceği görülmüştür [33].

2.2. Süperkavitasyon Oluşturma Yöntemleri

Süperkavitasyon rejiminin temelinde sürekli ve kararlı kavitasyon baloncukları oluşturarak kavitasyon zarfının elde edilmesi yer almaktadır. Kavitasyon zarfının tayini kavitasyon sayısı ile sağlanmaktadır. Kavitasyon sayısı statik basınç değişiminin dinamik basınç ile birimsizleştirilmesi sonucunda ortaya çıkan bir benzerlik parametresidir [34]. Aynı zamanda kavitasyon sayısı kavitasyon olduğu koşullarda negatif basınç katsayısı olarak da değerlendirilebilir. Kavitasyon sayısının istenen mertebelere düşürülebilmesi süperkavite su altı aracının tasarımında önemli rol

oynamaktadır. Bu kapsamda ortam yoğunluğu sabit kabul edildiğinde üç farklı şekilde kavitasyon sayısı düşürülerek istenilen kavitasyon zarfı elde edilebilir.

2.2.1. Doğal kavitasyon

Operasyonun gerçekleştiği ortamın derinliği ve yoğunluğu sabit kabul edildiğinde yüksek hızlı su altı aracının burun bölgesinde bulunan kavitatör geometrisi ve aracın seyir hızının artırılması kaynaklı kavitasyon sayısının düşürülmesi sonucunda oluşturulan kavitasyon rejimine doğal kavitasyon denir. Doğal kavitasyon sonucu oluşan kavitasyon zarfının iç basıncı (P_{zarf}) buharlaşma basıncına (P_{buhar}) eşittir. Doğal kavitasyon sayısı denklem 2.1’de ifade edilmiştir. 20°C su sıcaklığında ortalama buharlaşma basıncı 2350 Pascal alınabilir.

$$\sigma_{buhar} = \frac{P_{\infty} - P_{buhar}}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2} \quad (2.1)$$

Doğal kavitasyonlu akışlarda düzenli bir kavitasyon zarfı elde edebilmek için kavitasyon sayısının yaklaşık olarak 0.1’in altında olması ($U_{\infty} \geq 45 \text{ m/s}$) gerekmektedir. Su altı aracının katı yakıtlı roket motorunun etkisiyle ivmelenmesi sürecinde doğal kavitasyon rejimiyle oluşan kavitasyon zarfı su altı aracı üzerindeki ıslak alan etkilerini ve dolayısıyla sürükleme kuvvetini zamana bağlı olarak düşürmektedir. Yakıtın daha verimli kullanılması ve istenilen rejime daha hızlı ulaşılabilmesi amacıyla doğal kavitasyon rejimi tek başına tercih edilmemeli yapay kavitasyon rejimiyle desteklenmelidir.

2.2.2. Yapay kavitasyon

Su altında kavitasyon sayısının doğal koşullarda düşürülmesi operasyon hızının yükseltilmesiyle sağlanabilmektedir. Ancak, su altı aracının hızını yükseltmek bir mertebeden sonra mümkün olmamaktadır. Bu nedenle yapay kavitasyon adı verilen rejim ortaya çıkmıştır.

Kavitasyon sayısının düşürülmesi yalnızca su altı aracının hızının artırılmasıyla değil aynı zamanda yüksek hızlı aracın kavitasyon başlığı adı verilen özelleşmiş alt sistemini kullanarak doğal kavitasyonla oluşan kavitasyon zarfının içine gaz basılmasıyla da mümkündür. Bu sayede ortam basıncı ile buharlaşma basıncı arasındaki fark azalacak ve kavitasyon sayısı doğal kavitasyon sonucu ulaştığı değerin daha da altına düşebilecektir. Burada dikkat edilmesi gereken konu, yapay kavitasyon rejiminin aktif

edilebilmesi için öncelikle doğal kavitasyonun oluşmuş olması gerekliliğidir. Bu nedenle yapay kavitasyon doğası gereği doğal kavitasyonla bir uyum içerisinde varlığını sürdürebilmektedir.

$$\sigma = \frac{P_{\infty} - P_{zarf}}{1/2 \rho U_{\infty}^2} = -C_p \quad (2.2)$$

$$P_{zarf} = P_{yapay} + P_{buhar} \quad (2.3)$$

Denklem 2.2’de kavitasyon sayısının basınç katsayısının negatif değerine eşit olduğu, denklem 2.3’te de kavitasyon zarfı içerisindeki toplam basıncın yapay kavitasyon basıncı ile buhar basıncının toplamına eşit olduğu ifade edilmiştir. Derin seyir koşullarında veya su altı aracının seyir hızının düşük olduğu durumlarda kavitasyon sayısı ≥ 0.1 olacak ve aracın etrafında istenen kavitasyon zarfı oluşturulamayacaktır. Bu gibi durumlarda kavitasyon başlığından doğal kavitasyon sonucu oluşan kavitasyon zarfının içerisine gaz basılarak, zarfın içerisindeki gaz basıncı belirli bir değerde tutulabilir ve bu sayede seyir koşullarına bağlı olarak kavitasyon zarfı istenen geometrik ölçülere ulaşabilir. Kavitasyon başlığı, gaz tankında sıkıştırılmış bir şekilde tutulan gazı, özelleşmiş sistemleri yardımıyla kavitasyon başlığının burun kısmında bulunan kavitatörden kavitasyon zarfının içine basarak kavitasyon zarfı ile dış ortam arasındaki yerel basınç farkını istenen seviyede tutar. Dış basınç ile iç basınç arasındaki farkın düşürülmesi prensibiyle elde edilen kavitasyon rejimi yapay kavitasyon olarak adlandırılır.

2.2.3. Ortam basıncının düşürülmesi

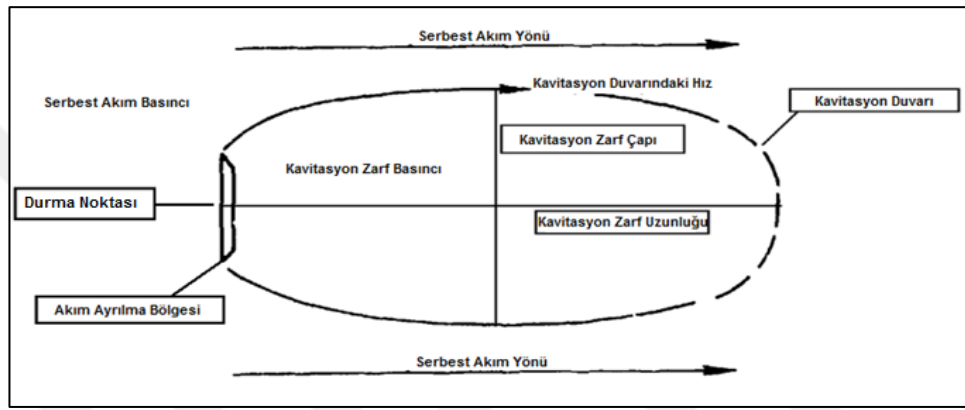
Süperkavitasyon oluşturulmasının bir başka yöntemi de ortam basıncının düşürülmesidir. Kapalı bir sisteme sahip olan test düzeneklerinde kavitasyon zarfını oluşturmak için ulaşılması gereken basınç farkı ortam basıncının düşürülmesiyle elde edilir. Bu yöntem kavitasyon tünellerinde kullanılır.

2.3. Süperkavitasyon Rejiminin Karakteristik Parametrelerin Belirlenmesi

Yüksek hızlı su altı araçlarının geleneksel ağır sıklet torpidolara kıyasla çok yüksek hızlara ulaşabilmelerinin nedeni süperkavitasyon rejimini kullanmalarıdır. Süperkavitasyon rejiminin ve buna bağlı olarak kavitasyon zarfının su altı aracına sağladığı faydaların nicel olarak incelenebilmesi için akış rejimini ve kavitasyon

zarfının özelliklerini tarif eden karakteristik parametreler belirlenmelidir. Bu sayede kavitasyon rejiminin karakteristiği incelenebilir ve bu parametreleri iyileştirerek gerekli tasarım girdileri oluşturulabilir.

Bu kapsamda öncelikle süperkavite su altı araçları üzerinde oluşan sürüklenme kuvveti katsayısı ifade edilmiş, sonrasında kritik kavitasyon sayısına bağlı olarak zarf boyunca basınç dağılımı incelenmiş ve ardından aracın kavitasyon zarfını tanımlayan boyutsuz kavitasyon zarfı parametreleri anlatılmıştır. Son olarak da yapay kavitasyonlu durumlar için geçerli olan hacimsel debi katsayısı incelenmiştir. Şekil 2.1’de süperkavitasyon rejimini tanımlayan elemanlar ifade edilmiştir.



Şekil 2.1: Süperkavitasyon rejiminin tanıtılması [33].

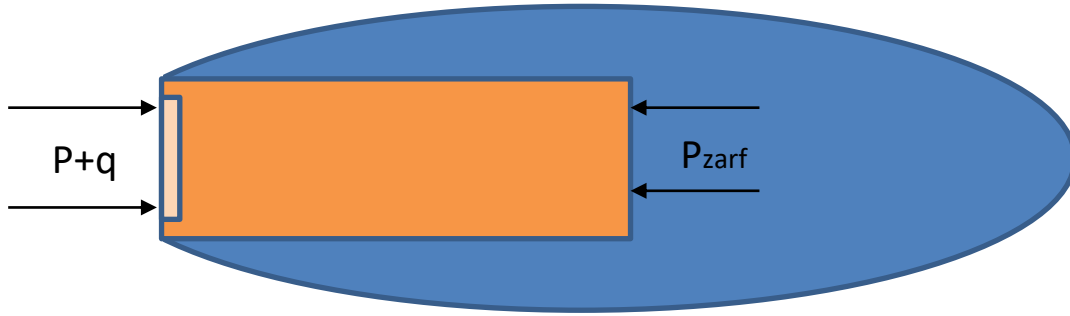
2.3.1. Sürüklenme katsayısının belirlenmesi

Kavitasyon zarfı içerisinde kalan bir kavitatör geometrisi üzerinde herhangi bir viskoz etkiye rastlanmayacaktır. Bu nedenle kavitasyon zarfı içerisinde yüzen geometrilerde yalnızca kavitatör geometrisi üzerinde oluşan kuvvetler sürüklenme kuvveti hesabında dikkate alınmaktadır. Şekil 2.2 incelendiğinde “*Stagnation Cup*” olarak adlandırılan kavitatör geometrisinin kavitasyon zarfı içerisinde yer aldığı görülmektedir. “*Stagnation Cup*” kupa bardak gibi bir geometriyi ifade etmek ile birlikte bu geometri kullanılarak bir durma yüzeyi oluşturulması amaçlanmaktadır [33]. Denklem 2.5’te basınç kuvveti kaynaklı oluşan sürüklenme kuvveti, denklem 2.5’te ise genel sürüklenme kuvveti ifadesi verilmiştir. Verilen kavitatör üzerinde oluşacak efektif kuvvet ve buna bağlı olarak ortaya çıkacak sürüklenme kuvveti ile sürüklenme katsayısı ifadeleri de denklem 2.6’daki gibi olacaktır [33].

$$(P_{toplamlam} - P_{zarf})A \quad (2.4)$$

$$D = (P_{\infty} + q_{\infty} - P_{zarf})A = qAC_D \quad (2.5)$$

$$C_D = 1 + \sigma \quad (2.6)$$



Şekil 2.2: Süperkavitasyon etkisinde “stagnation cup” geometrisi üzerinde oluşan basınç eşitliği.

Kavitasyon sayısının “0” olduğu durumu ele alırsak kavitatör geometrisi üzerinde oluşacak sürüklenme kuvveti C_{D0} şeklinde ifade edilebilir. Bu örnekte “Stagnation Cup” geometrisi referans alındığı için C_{D0} değerinin 1’e eşit olması beklenmektedir.

$$C_D = C_{D0}(1 + \sigma) \quad (2.7)$$

Genel olarak su altı araçları üzerindeki sürüklenme kuvveti ve katsayısı denklem 2.8-11’de ifade edilmiştir [33].

$$D = \int (P - P_c) dA \quad (2.8)$$

$$C_D = \frac{D}{qA} = \frac{1}{A} \int \left[\frac{(p - p_{\infty})}{q} + \frac{(p_{\infty} - p_c)}{q} \right] dA \quad (2.9)$$

$$C_D = \frac{1}{A} \int [C_p + \sigma] dA \quad (2.10)$$

$$C_{D0} = \frac{1}{A} \int C_{p0} dA \quad (2.11)$$

Kavitasyon sayısının “0” olduğunda sürüklenme kuvveti katsayısı C_{D0} ile ifade edilirken basınç kuvveti katsayısı da C_{p0} ile ifade edilmektedir. Kavitasyon zarfı içerisindeki herhangi bir noktada ortam basıncı zarf basıncına eşit olacaktır [33].

$$1 - C_p = (1 + \sigma) \quad (2.12)$$

$$1 - C_p = (1 + \sigma)(1 - C_{p0}) \quad (2.13)$$

$$(1 + \sigma)C_{p0} = C_p + \sigma \quad (2.14)$$

Son elde edilen ifade sürüklenme kuvveti katsayısı denkleminde uygulandığında Reichardt tarafından önerilen sürüklenme katsayısı denklemi elde edilecektir [33].

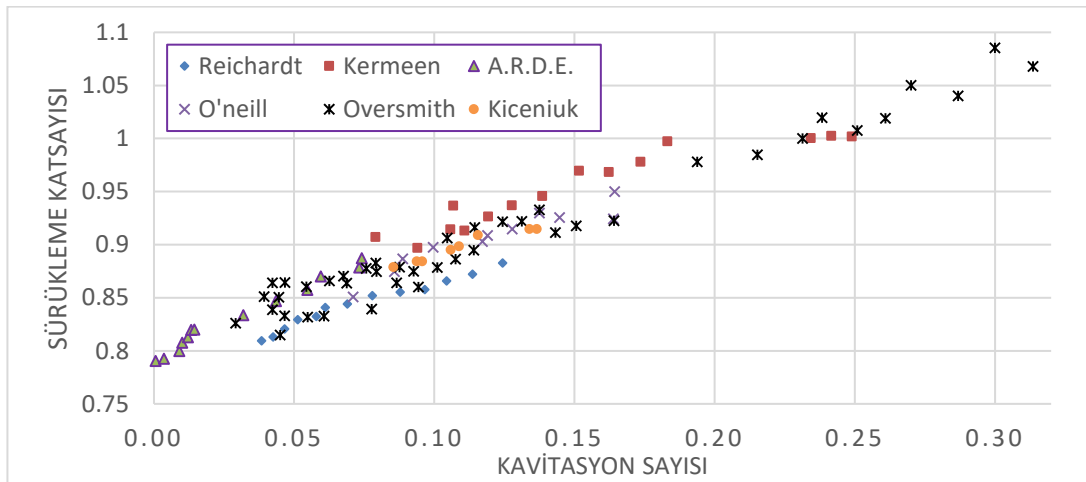
$$C_D = \frac{1 + \sigma}{A} \int C_{p0} dA \quad (2.15)$$

$$C_D = C_{D0}(1 + \sigma) \quad (2.16)$$

2.3.1.1. Disk kavitatör geometrilerinde sürüklenme katsayısının belirlenmesi

Süperkavitasyon rejiminin incelenmesi kapsamında disk kavitatörler en çok tercih edilen kavitatör şekilleridir [33]. Bu tez çalışması kapsamında da tasarlanacak su altı aracı için kavitatör tipi olarak disk kavitatör tercih edilmiştir. Literatürde disk kavitatörlerin diğer kavitatör tiplerinden önce incelenmesinin nedenleri genel olarak disk kavitatörlerde kavitasyon zarfının oluşumu için ihtiyaç duyulan minimum kavitasyon sayısı değerinin diğer kavitatörlerden daha yüksek olması ve disk kavitatörlerin deneysel çalışmalarla incelenmeye daha elverişli olmasıdır. Literatürde disk kavitatörler kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların yeterli olgunlukta olması bilim insanları tarafından bulunan sonuçların bir karşılaştırma parametresi olarak değerlendirilebilmesine olanak sunmuştur.

Şekil 2.3'te disk kavitatör geometrisi kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen sürüklenme katsayısı değerlerinin kavitasyon sayısı bağlı eğilimi gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Disk kavitatörlerde $\sigma \leq 0.32$ için sürüklenme katsayısı değerleri.

Kavitasyon sayısının 0.4 değerinin altında veya üstünde olmasına bağlı olarak Garabedian, Armstrong, Reichardt, O'Neill, Oversmith vb. birçok bilim insanı tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda elde ettikleri sürüklenme kuvveti katsayıları değerleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde elde edilen bütün verilerin bir eğilim içerisinde olduğu gözlemlenmektedir. Eğilimin dışında kalan deneysel verilerin ölçüm hatasından kaynaklı olduğu değerlendirilmektedir [33].

Yapılan tez çalışması kapsamında incelenecek olan kavitasyon sayıları 0.1'den küçük olacaktır. Verilen deneysel çalışmalar dikkate alınarak düşük kavitasyon sayılarında süperkavite su altı aracı üzerinde oluşacak sürüklenme kuvveti katsayısı değeri belirlenirken Oversmith tarafından geliştirilen ampirik eşitlik dikkate alınmıştır [35]. Oversmith yaklaşımı üzerinden oluşturulan sürüklenme katsayısı ve sürüklenme kuvveti denklemleri sırasıyla denklem 2.17 ve 2.18'deki gibidir [33].

Çizelge 2.1: Disk kavitatör geometrisi için belirlenen sürüklenme katsayısı değerleri.

Bilim İnsanları	Sürüklenme Katsayısı	
	$\sigma \leq 0.4$	$\sigma > 0.4$
Reichardt [1]	0.792	-
O'Neill [36]	0.814	-
Kiceniuk [37]	0.814	-
Oversmith [35]	0.815	0.812
A.R.D.E [38]	0.816	-
Brennan [10]	0.833	0.840
Kermeen [35]	0.837	0.836
Eisenberg-Pond [39]	-	0.809
Klose-Acosta [9]	-	0.814
Garabedian [40]	0.827 (Teorik)	

$$C_D = 0.815 (1 + \sigma) \quad (2.17)$$

$$D = \frac{1}{2} [0.815 (1 + \sigma)] \rho U^2 \left(\frac{\pi}{4} d_c^2 \right) \quad (2.18)$$

2.3.1.2. Konik kavitatör geometrilerinde sürüklenme katsayısının belirlenmesi

Sürüklenme katsayısının belirlenmesine yönelik literatürdeki çalışmalar incelendiğinde disk kavitatör geometrisine sahip kavitatörlerle sınırlı kalınmadığı konik, yarım küre, ogiv gibi birçok farklı çeşit kavitatörler kullanılarak da çalışmalar yapıldığı görülmektedir [33].

Konik kavitatörler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar konik kavitatörlerin sürüklenme sayılarının kavitasyon sayısına ek olarak koniklik yarım açısına bağlı olarak da değiştiğini göstermektedir. Bu nedenle 5° , 10° , 15° , 30° , 45° ve 63.5° koniklik yarım açılarına sahip olan kavitatörler üzerinde deneysel çalışmalar yapılmış ve sürüklenme katsayısı değerleri ampirik olarak ifade edilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda elde edilen sürüklenme katsayısı denklemi denklem 2.19'da ve ulaşılan sonuçlar Çizelge 2.2'de verilmiştir.

$$C_D = C_{D0} + (dC_D/d\sigma) \sigma \quad (2.19)$$

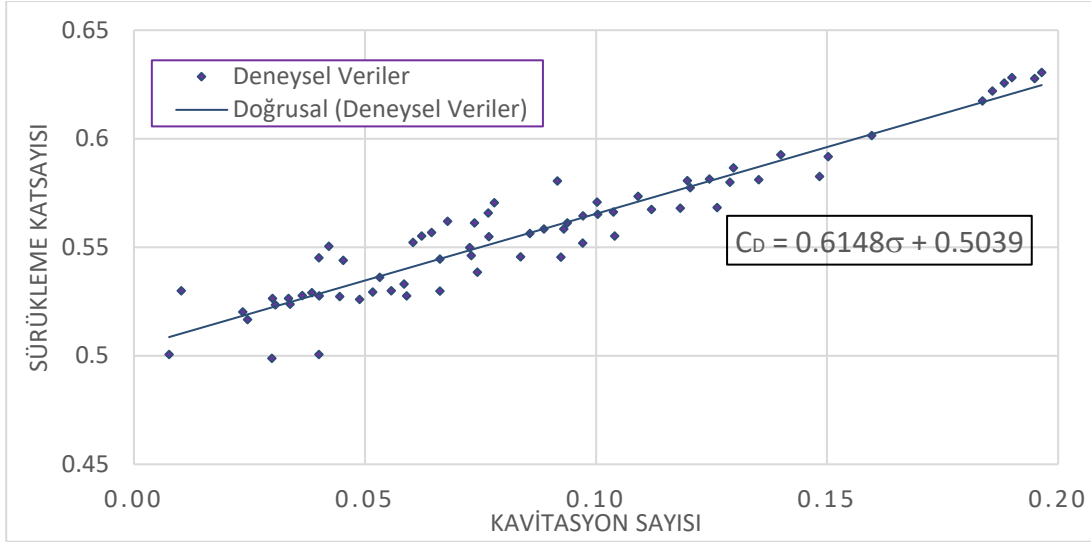
Çizelge 2.2: Farklı koniklik yarım açıları için sürüklenme katsayısının belirlenmesi.

Konik Yarım Açısı	Ampirik Sonuçlar		
	C_{D0}	$dC_D/d\sigma$	$C_D(\sigma = 0.1)$
5° [34]	0.0362	0.9	0.1262
10° [34]	0.0765	0.822	0.1587
14° [1]	0.142	0.398	0.182
15° [31, 32, 34]	0.151	0.587	0.210
26.6° [1]	0.319	0.434	0.362
30° [34]	0.347	0.510	0.398
45° [37]	0.498	0.663	0.564
63.5° [1]	0.637	0.549	0.692
90° [33]	0.815	0.815	0.896

Çizelge 2.2'de görüldüğü üzere koniklik yarım açısı arttıkça kavitatör geometrisi üzerinde oluşan sürüklenme katsayısı artmaktadır. Ayrıca, 90 derece koniklik yarım açısının disk kavitatör geometrisinin sürüklenme katsayısı değerini ifade ettiği görülmektedir.

Şekil 2.4'te 45 derece koniklik yarım açısına sahip olan kavitatör geometrisi için Reichardt, Kermeen, Cox-Moccoll, O'Neill, Oversmith ve Kiceniuk tarafından

yapılan çalışmalarda elde edilen deneysel veriler ve bu deneysel veriler kullanılarak elde edilen sürüklenme katsayısı denklemi verilmiştir [33]. Yapılan çalışmada bütün deneysel verilerin birbiri içerisindeki tutarlılığını ve sürüklenme katsayısının bir eğilim içerisinde olduğu göstermektedir.



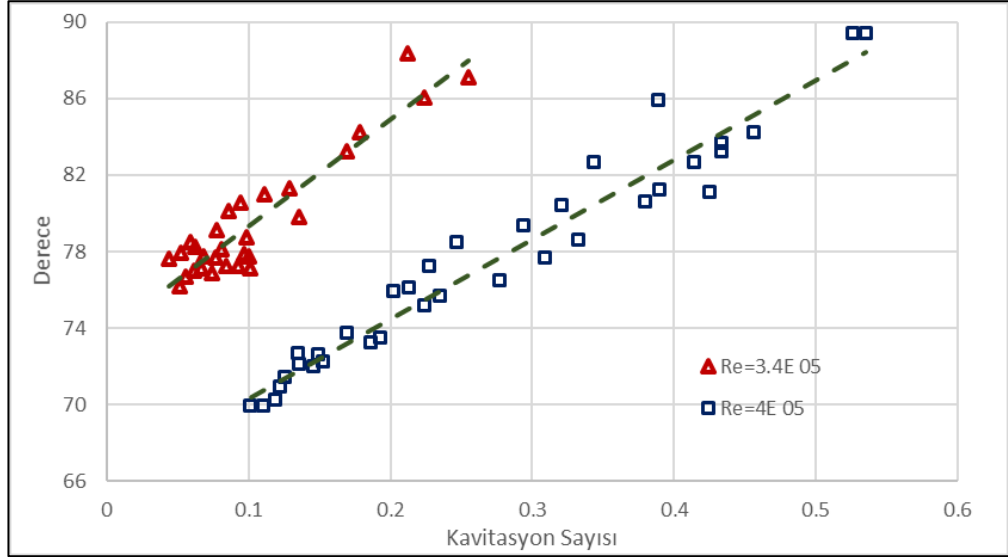
Şekil 2.4: 45 derece yarım açılı konik kavitatörlerde eğilim çizgisi [33].

2.3.1.3. Yarım küre kavitatör geometrilerinde sürüklenme katsayısının belirlenmesi

Yarım küre kavitatör geometrileri disk ve konik kavitatör geometrilerinin aksine artan eğimli bir yüzeye sahiptirler. Bu nedenle yarım küre ve ogiv gibi kavitatör geometrilerinde akım ayrılmasının oluşup kavitasyon sürecinin başlayacağı bölgeyi belirlemek daha zordur.

Küresel kavitatörler üzerinde yapılan çalışmalarda akış karakteristiğinin akım ayrılmasının oluştuğu bölgeye bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Küresel kavitatörlerde akım ayrılmasının oluştuğu noktalar kümesi Reynolds sayısına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu kapsamda süperkavitasyon rejiminin oluşmaya başladığı bölgeler belirlenirken Reynolds sayısı da bir girdi parametresi olarak ele alınmıştır. Bu nedenle yapılan deneysel çalışmalar deneye özgü kalmaktadır.

Yarım küre kavitatörlerde serbest akışın yüzeyden ayrılma açısı kavitasyon sayısı ve Reynolds sayısına göre farklılık gösterir. Hsu ve Perry yarım küre kavitatörler üzerinde akım ayrılma açılarına bağlı olarak farklı Reynolds sayılarında deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 2.5'te verilmiştir [42].

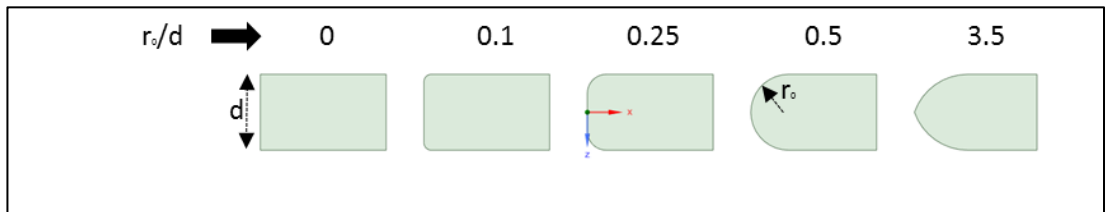


Şekil 2.5: Küresel kavitatörlerde Reynolds sayısına ve kaviteasyon sayısına bağlı olarak akım ayrılma açısı.

2.3.1.4. Ogiv kavitatör geometrilerinde sürükleme katsayısının belirlenmesi

Ogiv tipi kavitatör geometrileri konik kavitatörler gibi birçok alt geometriye sahiptir. Ogiv kavitatörler incelenirken dikkat edilmesi gereken kıstas kavitatörün köşelerindeki yuvarlanma yarıçapının kavitatör yarıçapına oranıdır. Bu orana bağlı olarak ogiv kavitatör geometrilerinde ampirik sürükleme katsayısı denklemleri değişiklik göstermektedir.

Ogiv kavitatörlerin disk kavitatörlerden farkı Şekil 2.6'da gösterildiği gibi belirli bir yuvarlama değerlerine sahip olmalarıdır. Bu durum kavitatörün akışa maruz kalan alanını azaltmakta dolayısıyla sürükleme kuvvetinde düşüşe neden olmaktadır. Aynı zamanda bu yuvarlanma oranı akım ayrılmasını belirsizleştirebilir ve akım ayrılma bölgesini öne taşıyabilir. Bu sebeplerden ötürü Ogiv kavitatörler ideal kaviteasyon özelliklerinin yakalanmasında zorluklara yol açabilmekte ve bu kapsamda yarım küre kavitatörlere benzemektedir.



Şekil 2.6: Yuvarlanma oranına bağlı olarak oluşan ogiv kavitatör geometrileri.

Çizelge 2.3'te birçok bilim insanı tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda farklı yuvarlanma oranlarına sahip ogiv kavitatörlerin sahip olacakları sürüklenme kuvveti katsayısı değerleri verilmiştir [33].

Çizelge 2.3: Ogiv kavitatör geometrileri için sürüklenme katsayısı denklemleri.

$C_D = C_{D0} + (dC_D/d\sigma) \sigma$	r_0/d	$C_D = C_{D0} + (dC_D/d\sigma) \sigma$	r_0/d
$0.195+0.209\sigma$	1	0.44	0.25
$0.114+0.416\sigma$	2	0.14	1.5
$0.1515+0.595\sigma$	1	0.62	0.1
$0.0716+0.626\sigma$	3	0.09	3.5
$0.056+0.54\sigma$	5	0.11	2.7
$0.04+0.55\sigma$	7	0.22	1
0.41	0.2	0.13	3

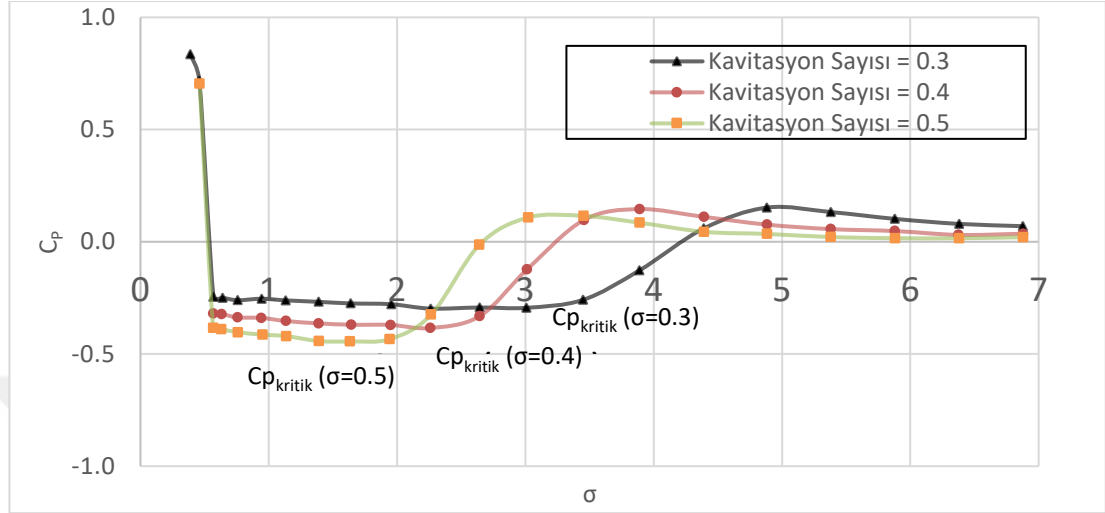
2.3.2. Basınç katsayısının dağılımı

Süperkavitasyon rejiminin etkin olduğu bir akış karakteristiğinde kavitasyon sayısına, kavitatör tipine ve kavitatör çapına bağlı olarak basınç dağılımında farklılıklar gözlemlenmektedir. Durma noktasında statik basınca eşit olan toplam basınç akım ayrılma noktalarına geldiğinde kritik basınç değerine ulaşır. Ortam yoğunluğuna, seyir hızına ve ortam basıncına bağlı olarak ilk kavitasyon baloncuklarının gözlemlenmeye başladığı kavitasyon sayısına kritik kavitasyon sayısı denir. Akım ayrılmasının gerçekleştiği noktadan itibaren gerekli basınç farkı sağlandığında kavitasyon zarfı oluşmaya başlar. İdeal bir kavitasyon zarfında, zarf boyunca kritik basınç katsayısı sürekliliğini korur ve kritik basınç katsayısının sürekliliğini koruduğu bu bölgeye bakılarak kavitasyon zarfının boyu tayin edilebilir.

Kritik kavitasyon sayısı ve su altı aracı üzerindeki kavitasyon sayısı dağılımı kavitatör geometrilerine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Disk gibi küt geometrilerde akım ayrılması şeklin köşelerinde oluşurken yarım küre, ogiv gibi geometrilerde akım ayrılmasının oluşacağı bölge seyir koşullarına dolayısıyla Reynolds sayısına bağlı farklılık göstermektedir. Bu duruma ek olarak kavitatörün köşelerinde oluşan akım ayrılması sonucunda elde edilen kavitasyon zarfı boyutları, kenarlara ulaşmadan meydana gelen akım ayrılması sonucu oluşan kavitasyon zarfına göre daha büyük ve daha tahmin edilebilirdir.

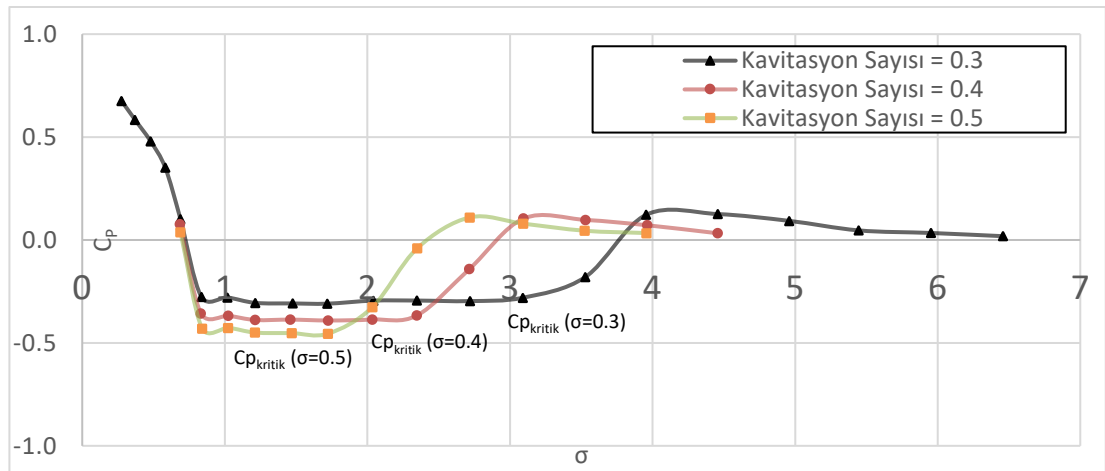
Şekil 2.7'de bir disk kavitatöre sahip silindirik bir geometri üzerinde, 3 farklı kavitasyon sayısında, basınç katsayısının birimsiz kavitasyon zarfı uzunluğuna bağlı

olarak değişimi gösterilmiştir [3]. Şekilde kavitasyon sayısı azaldıkça birimsiz kavitasyon zarfı uzunluğunda artışlar görülmektedir. Kavitasyon sayısının 0.3 olduğu durumdaki kavitasyon zarfı uzunluğu 0.5 olduğu durumdaki zarfı uzunluğunun neredeyse iki katıdır.



Şekil 2.7: Disk kavitatör için kavitasyon sayısının basınç dağılımına bağlı değişimi.

Şekil 2.8’de ise 45 derece yarım açılı bir konik kavitatör geometrisi üzerinde 3 farklı kavitasyon sayısında basınç katsayısının birimsiz kavitasyon zarfı uzunluğuna bağlı olarak değişimi gösterilmiştir [3]. Şekil 2.7 ile Şekil 2.8 karşılaştırıldığında aynı kavitasyon sayısında disk kavitatöre sahip bir geometrinin 45 derece yarım açılı bir konik kavitatöre göre daha uzun bir kavitasyon zarfı sunduğu gözlemlenmiştir. Ancak, disk kavitatörler üzerinde oluşan ıslak alan etkilerinin konik kavitatörlere göre daha fazla olmasından ötürü disk kavitatör geometrileri daha çok sürüklenme kuvvetine neden olmaktadır.



Şekil 2.8: 45 derece yarım açılı konik kavitatör için kavitasyon sayısının basınç dağılımına bağlı değişimi.

Özetlemek gerekirse Şekil 2.7 ve Şekil 2.8 kritik basınç katsayısı, kavitatör tipinin basınç dağılımına etkisi ve kavitasyon zarf uzunluğunun basınç katsayısının dağılımına göre tayini gibi konuların anlaşılması açısından önem arz etmektedir. Ek olarak, kritik basınç katsayı kavitasyonun olduğu durumlarda geçerlidir. İki şekil değerlendirildiğinde disk kavitatörlerin konik kavitatörlere göre kritik basınç katsayısına (negatif kavitasyon sayısı) daha erken ulaştığı görülmektedir. Ek olarak aynı kavitasyon sayılarında disk kavitatörler konik kavitatörlere göre kritik basınç katsayısına ulaşılmasının ardından kavitasyon zarfının sürekliliğinin korunması konusunda daha kabiliyetlidirler. Bu sayede disk kavitatörler hacimce daha geniş bir kavitasyon zarfı sunabilmektedir.

2.3.3. Kavitasyon zarfı duvarı üzerindeki hız

Bernoulli Denklemine göre kavitasyon zarfı üzerindeki hız değeri ile seyir hızı arasında doğrudan bir bağıntı kurulabilir. Kavitasyon zarfı içerisinde kararlı şekilde seyir yapan bir süperkavite su altı aracı değerlendirildiğinde, kavitasyon zarfının oluşabilmesi için kavitasyon zarfının duvarına uygulanması gereken statik basınç değerini kavitasyon zarfının iç basıncından her zaman daha yüksek olmalıdır. Ancak, oluşan basınç farkı çok yüksek olması durumunda o bölgedeki statik basınç kavitasyon baloncuklarını sönmüleyecek ve süperkavitasyon etkileri kaybolacaktır. Bu sebeple kavitasyonun sahip olduğu basınç değeri statik basınçtan küçük olmakla birlikte statik basınca yakın olmalıdır. Bunun sonucunda kavitasyon zarfının duvarı üzerindeki hız değeri her zaman serbest akış bölgesindeki hız değerinden biraz daha yüksek olacaktır.

$$\sigma = \frac{(P_{\infty} - P_c)}{\left(\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2\right)} = \left(\frac{U_c}{U_{\infty}}\right)^2 - 1 \quad (2.20)$$

$$U_c = U_{\infty}(1 + \sigma)^{1/2} \quad (2.21)$$

Bernoulli Denklemi sonucunda kavitasyon duvarı üzerindeki hız değerinin seyir hızından daha fazla olacağı ispatlanmasının ardından bu kapsamda Sınır Tabakası Teorisi ile sınır tabaka kalınlığının kavitasyon sayısı üzerine olan etkisinden bahsedilebilir. Sınır tabakasının kalınlığı Reynolds sayısı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Örneğin, seyir hızı arttıkça sınır tabakanın incelmelerinden ötürü, seyir hızı ile kavitasyon duvarı arasındaki hız farkı azalacaktır. Buna bağlı olarak aradaki basınç farkı da azalacak ve kavitasyon sayısı düşecektir. Bunun sonucunda daha kararlı ve düzenli bir kavitasyon profili elde edilmiş olacaktır.

2.3.4. Birimsiz kavitasyon zarfı çapı (d_m/d_c)

Literatürde kavitasyon zarfı çapının belirlenmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. İlk olarak bu bölümde Reichardt ve Garabedian'ın kavitasyon zarfı çapının belirlenmesine kapsamında geliştirdikleri teorik formüller verilmiştir [1, 40]. Sonrasında, Waid ve Self & Ripken'in yaptığı deneysel çalışmalar sonucu elde ettikleri deneysel veriler kavitatör tiplerine göre kategorize edilerek değerlendirilmiştir [5, 6]. Aşağıda kaynak kuyu metodunu kullanan Reichardt [1] ve sayısal yöntemleri kullanan Garabedian [39] tarafından geliştirilen teorik denklemler sırasıyla verilmiştir. Verilen teorik denklemler disk ve farklı koniklik yarım açılarındaki konik kavitatör geometrileri için geçerlidir.

$$(d_m/d_c)^2/C_D = 1/(\sigma - 0.132\sigma^{8/7}) \quad (2.22)$$

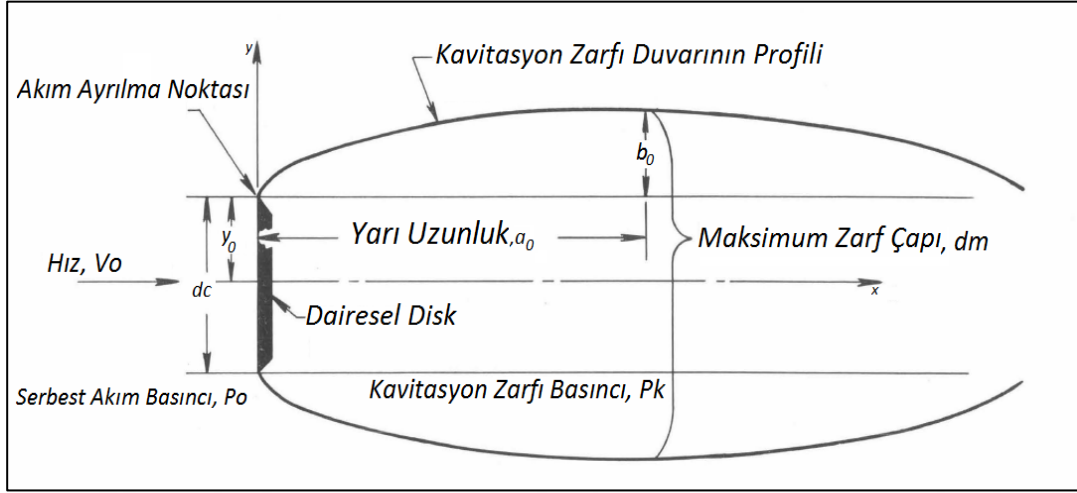
$$(d_m/d_c)^2/C_D = 1/\sigma \quad (2.23)$$

Yukarıdaki denklemdeki gibi veri havuzu oluşturulurken birimsiz kavitasyon zarfı çapı parametresinin karesi sürüklenme kuvveti ile birimsizleştirilmiştir. Bu şekilde yeni bir birimsiz parametre oluşturulmasının nedeni kavitatör tipine bağlı olarak değişen sürüklenme kuvvetini ifadeye dahil ederek elde edilen sonuçları kavitatör tipinden bağımsız hale getirmektir. Sonuç olarak disk ve konik kavitatörlerde $(d_m/d_c)^2/C_D$ parametresi kavitasyon sayısına bağlı incelendiğinde elde edilen sonuçların aynı kavitasyon sayısında kavitatör tipinden bağımsızlaştığı görülmüştür. Buradan kavitatör tipinin değiştirilmesinin kavitasyon zarfı parametreleri üzerindeki etkisinin sürüklenme kuvvetinin değişimi kaynaklı olduğunu çıkmaktadır. Ayrıca, elde edilen sonuçların sürüklenme kuvvetinden bağımsız hale getirilmesi literatürdeki farklı kavitatör tipleri için verilen deneysel sonuçların birbirleriyle karşılaştırılabilmesine imkan tanımıştır. Burada anlatılan durum bir diğer kavitasyon zarfı parametresi $(L/d_c)^2/C_D$ ifadesi için de geçerlidir.

2.3.4.1. Disk kavitatörler için yapılan çalışmalar

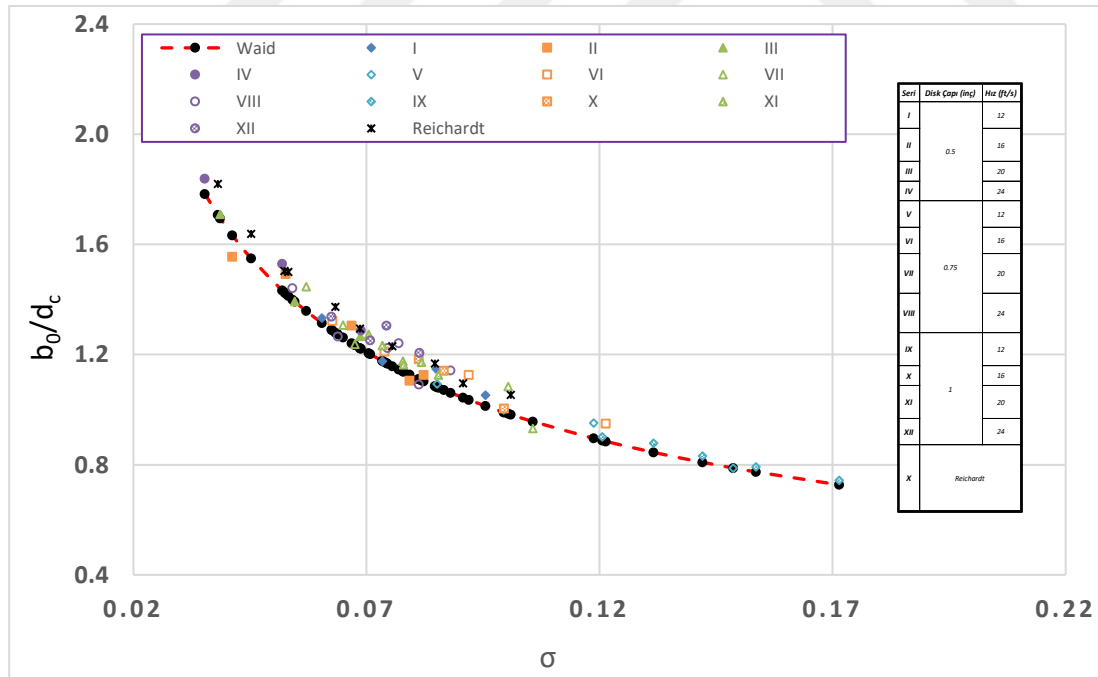
Disk tipi kavitatörler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar incelediğinde ilk olarak Waid'in yaptığı çalışmalar dikkat çekmektedir. Waid disk tipi kavitatörler üzerinde yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda birimsiz kavitasyon zarfı çapını sürüklenme kuvveti ile birimsizleştirerek $(d_m/d_c)^2/C_D$ parametresini kavitasyon sayısına bağlı incelemiştir. Waid yalnızca disk kavitatörler üzerine çalışmalar yapmış ve yaptığı

çalışmalarda süperkavitasyon rejimini ifade etmek için Şekil 2.9’da verilen terminolojiyi kullanmıştır [6].



Şekil 2.9: Waid'in süperkavitasyon rejimini tanımlarken kullandığı terminoloji [6].

Şekil 2.10’da Waid tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda kavite zarfı uzunluğunun kavite sayısına bağlı olan değişimi verilmiştir [6]. Waid yaptığı deneysel çalışmalarla disk tipi kavitatörlerde kavite sayısını kavite sayısına ve kavitatör çapına bağlı olarak tanımlanmıştır.



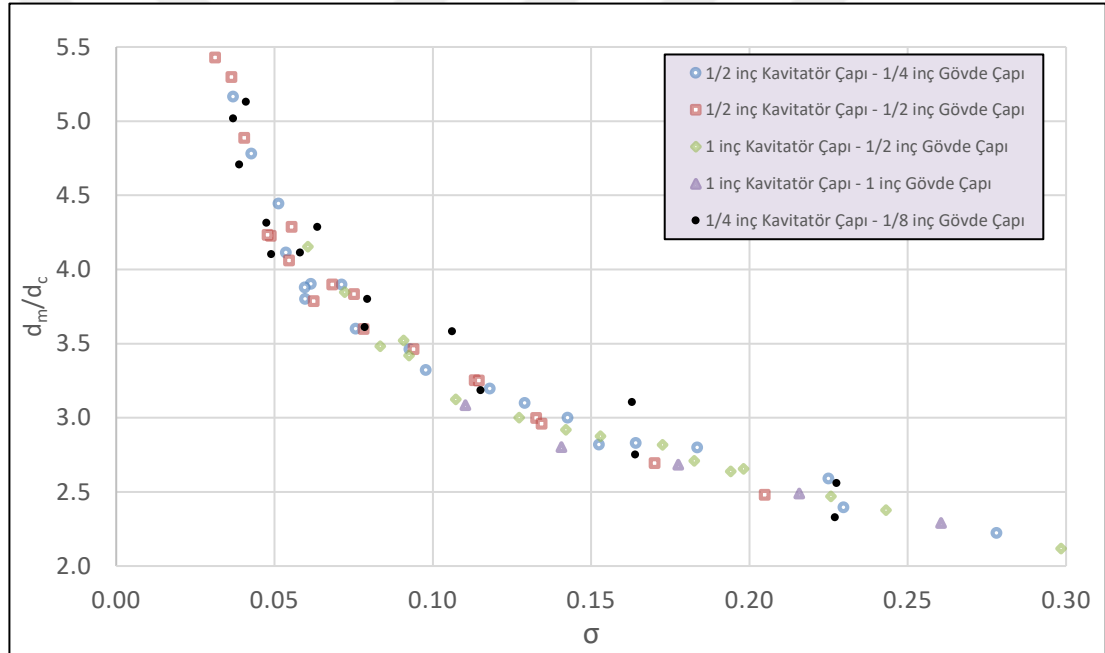
Şekil 2.10: Akım ayrılmasından maksimum kavite zarfı çapına olan radyal mesafenin kavite sayısına bağlı değişimi [6].

Şekil 2.10 incelendiğinde, Waid'in disk kavitatörler üzerinde yaptığı deneysel çalışmaları kavitatör çapı ve seyir hızına bağlı olarak incelediği görülmektedir. Ayrıca,

Waid yaptığı deneysel çalışmalarda Reichardt'ın verilerini de bir karşılaştırma kriteri olarak kullanmıştır. Şekil 2.10'daki kırmızı kesik çizgilerle gösterilmiş eğri de Waid'in elde ettiği deneysel verilere bağlı olarak ortaya çıkardığı ampirik denklemi ifade etmektedir. Elde edilen ampirik denklem, denklem 2.24'te gösterilmiştir [6].

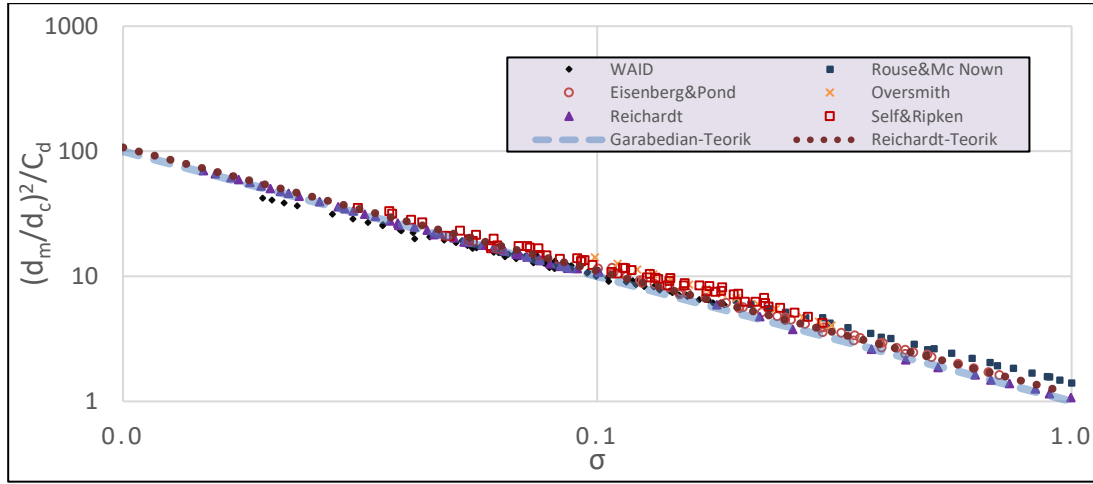
$$(b_0/d_c)^2 = 0.267 \sigma^{-0.568} \quad (2.24)$$

Disk kavitatörler üzerine yapılan çalışmalar Reichardt, Garabedian ve Waid ile sınırlı değildir. Self&Ripken de dikey bir kavitasyon tüneline disk ve koni gibi farklı kavitatör tipleri için deneysel çalışmalar yapmıştır. Yapılan çalışmalarda kavitatör geometrisi arkasında yer alan tutucu platformun gövde çapı da bir değişken olarak ele alınmıştır. Şekil 2.11'de disk kavitatörlerin kavitasyon zarfı çapını belirlemek üzere yapılan deneysel çalışmalar gösterilmiştir [5].



Şekil 2.11: Farklı çaplardaki disk kavitatörlerde farklı gövde çaplarında birimsiz kavitasyon zarf çapının kavitasyon sayısına bağlı değişimi [5].

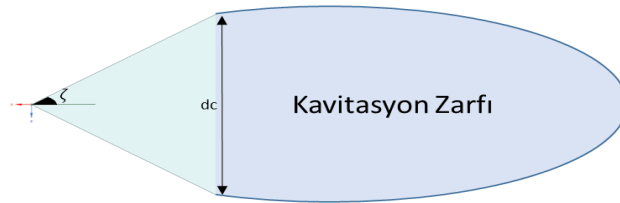
Şekil 2.12'de disk kavitatörler için kavitasyon zarf çapının kavitasyon sayısına bağlı tayin edilmesi çalışması kapsamında farklı bilim insanları tarafından gerçekleştirilen deneysel veriler gösterilmiştir. Bu deneysel verilere ek olarak Garabedian'ın ve Reichardt'ın elde ettiği teorik eğriler de Şekil 2.12'de gösterilmiştir [33]. Elde edilen bütün deneysel ve teorik veriler kullanılarak oluşturulan Şekil 2.12 disk tipi kavitatörlerde kavitasyon zarfı çapının belirlenmesi kapsamında deneysel veri havuzunun taranması ve kavitasyon zarfı çapının kavitasyon sayısına bağlı değişimini anlaşılması açısından önemlidir.



Şekil 2.12: Disk kavitatörlerde birimsiz kaviteasyon zarfı çapı parametresinin kaviteasyon sayısına bağlı değişimi [33].

2.3.4.2. Konik kavitatörler için yapılan çalışmalar

Konik kavitatörlerin oluşturacağı kaviteasyon zarf çapının belirlenmesi amacıyla $(d_m/d_c)^2/C_D$ parametresinin kavitatörün koniklik açısına ve kaviteasyon sayısına bağlı olarak değişimi deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Şekil 2.13'te örnek bir konik kavitatör geometrisi kullanılarak oluşabilecek bir kaviteasyon zarfı gösterilmiş ve kavitatör geometrisi üzerinde konik kavitatör yarım açısı (koniklik yarım açısı) ifade edilmiştir.



Şekil 2.13: Konik kavitatör geometrisinin oluşturduğu temsili kaviteasyon zarfı ve koniklik yarım açısı.

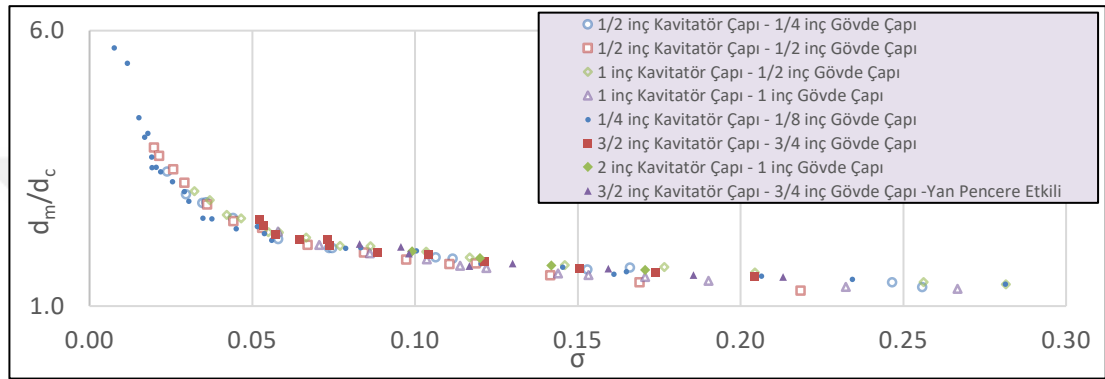
Konik kavitatörler koniklik yarım açısına bağlı olarak disk kavitatörlerden farklılık göstermektedirler. Bu nedenle koniklik yarım açısı konik kavitatörlerin kaviteasyon zarfı özelliklerinin belirlemede bir değişken olarak kullanılmaktadır. Koniklik açısına bağlı olarak konik kavitatörlerin oluşturduğu kaviteasyon zarf çapını belirlemek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen ampirik eşitlik denklem 2.25'te ifade edilmiştir [33]. Denklem 2.25'te kullanılan C sabitinin farklı koniklik açıları için alması gerektiği değerler Çizelge 2.4'te verilmiştir.

$$(d_m/d_c)^2/C_D = C \sigma^{-0.91} \quad (2.25)$$

Çizelge 2.4: Farklı konik yarım açıları için c sabitinin değeri.

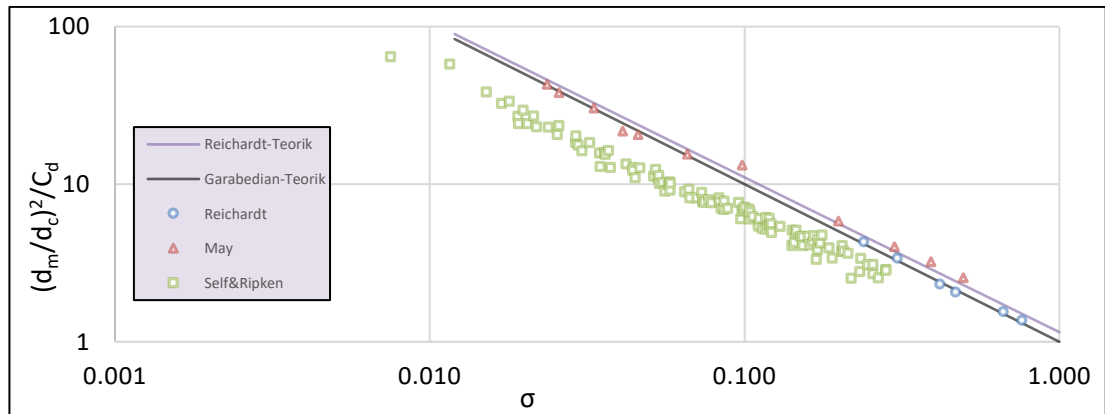
C	Koniklik Yarım Açısı
1.48	67.5°
1.38	45°
1.31	22° - 27°
1.28	14°

Şekil 2.14'te ise Self&Ripken tarafından 45 derece koniklik açısına sahip konik kavitatörler için farklı kavitatör ve gövde çapı için oluşan kavitasyon zarfı çapının kavitasyon sayısına bağlı değişimi gösterilmiştir [5].



Şekil 2.14: Farklı çaplardaki 45 derece yarım açılı konik kavitatörlerde farklı gövde çaplarında birimsiz kavitasyon zarfı çapının kavitasyon sayısına bağlı değişimi [33].

Şekil 2.14'te 45 derece yarım açılı konik kavitatörler için kavitasyon zarfı çapının kavitasyon sayısına bağlı tayin edilmesi kapsamında farklı bilim insanları tarafından gerçekleştirilen deneysel veriler gösterilmiştir. Bu deneysel verilere ek olarak Garabedian'ın ve Reichardt'ın elde ettiği teorik denklemler de eklenmiştir. Elde edilen bütün deneysel ve teorik sonuçlar kullanılarak oluşturulan Şekil 2.15, 45 derece yarım açılı konik kavitatörler için deneysel veri havuzunun taranması ve kavitasyon zarfı çapının kavitasyon sayısına bağlı değişimini anlaşılması için önemlidir.



Şekil 2.15: 45 derece yarım açılı kavitatörlerde birimsiz kavitasyon zarfı çapı parametresinin kavitasyon sayısı ile değişimi [33].

2.3.5. Birimsiz kavitasyon zarfı uzunluğu (L/d_c)

Literatürde kavitasyon zarfının uzunluğunun belirlenmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. İlk olarak Reichardt disk, küre veya konik tipteki kavitatörler üzerinde hem teorik hem de deneysel çalışmalar yapmıştır. Yaptığı çalışmalar sonucunda kavitasyon zarfı uzunluğunun kavitatör çapına oranını kavitasyon zarfının narinlik oranını (L/d_m) ve birimsiz kavitasyon zarfı çapını kullanarak ampirik olarak ifade etmiştir. Farklı kavitatör tipleri için Reichardt tarafından geliştirilen eşitlik denklem 2.26'da verilmiştir [1].

$$\frac{L}{d_c} = \frac{L}{d_m} \frac{d_m}{d} = \frac{\sigma + 0.008}{\sigma(0.066 + 1.7\sigma)} \left[\frac{C_D}{\sigma - 0.132\sigma^{8/7}} \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

2.3.5.1. Disk kavitatörler için yapılan çalışmalar

Disk kavitatörler üzerinde çalışmalar yapan Waid, disk kavitatörlerin kavite zarfı uzunluğunu belirlemek amacıyla 1/2, 3/4 ve 1 inçlik çap ölçülerine sahip kavitatörler kullanarak deneysel çalışmalar yapmış ve bir veri havuzu oluşturmuştur [6].

Şekil 2.16'da Waid'in farklı disk çaplarında ve çeşitli seyir hızlarında yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda elde ettiği sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 2.16'da kırmızı kesikli çizgi ile gösterilen eğri, Waid'in gerçekleştirdiği deneysel çalışmaları kullanarak elde ettiği ampirik eşitliğe ait olan eğridir [6]. Bu eğriyi ifade eden matematiksel eşitlik denklem 2.27'de gösterilmiştir.

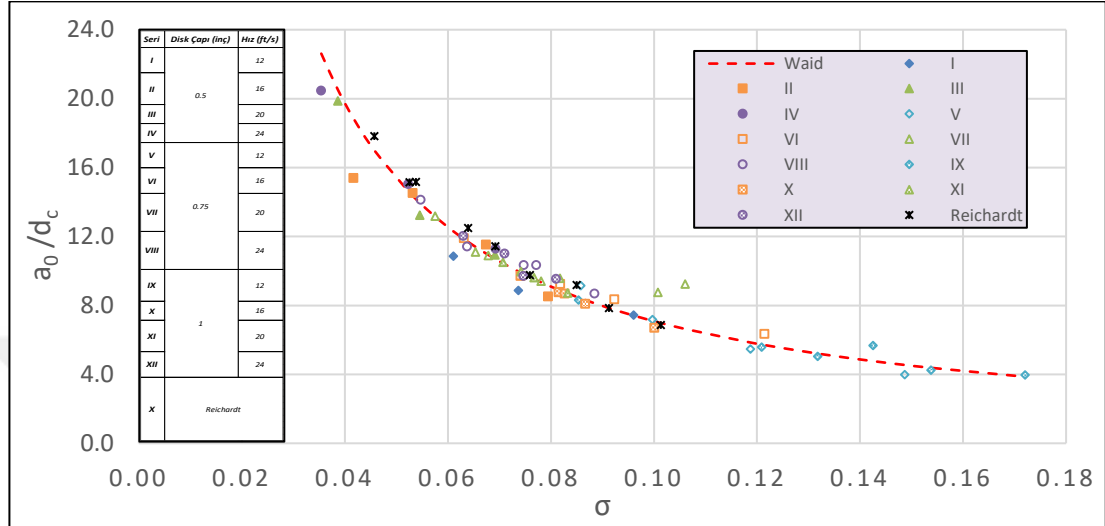
$$L/d_c = 1.08\sigma^{-1.118} \quad (2.27)$$

Waid yaptığı deneysel çalışmalarda kavite zarfı yarı uzunluğunu tanımlamak için Şekil 2.16'da gösterilen A_0 ifadesini kullanmıştır.

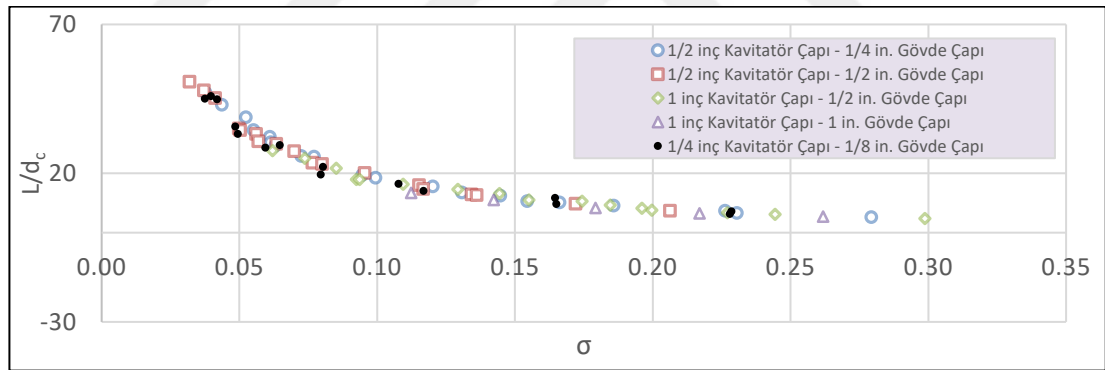
Şekil 2.17'de ise Self&Ripken tarafından farklı kavitatör ve gövde çapları için kavite zarfı uzunluğunu belirlemek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar gösterilmiştir [5].

Elde edilen bütün deneysel ve teorik veriler kullanılarak oluşturulan Şekil 2.18 ise disk tipi kavitatörler için kavite zarfı uzunluğunun deneysel veri havuzunun taranması ve kavite zarfı uzunluğunun kavite sayısına bağlı değişimini anlaşılması için önemlidir. Şekil 2.18'te yer alan Garabedian teorik çözümünde kavite sayısı 1'e

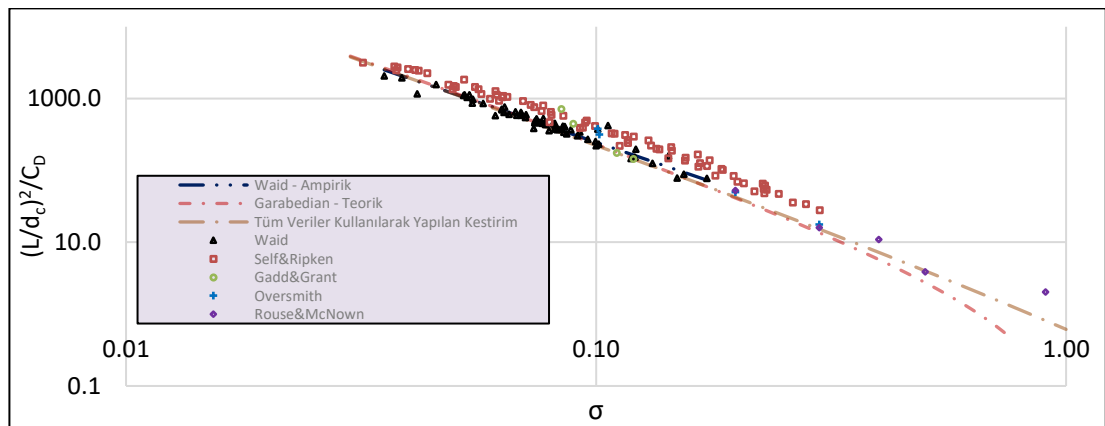
yaklaştıkça kavitasyon zarfı uzunluğunun 0'a yaklaştığı görülmektedir. Bu nedenle Garabedian'ın bulduğu çözüm düşük kavitasyon sayılarında doğru sonuçlar vermektedir [43]. Ek olarak aynı şekilde gösterilen Reichardt'ın yaptığı çözümde ulaşılan eğrinin $0.04 \leq \sigma \leq 0.12$ kavitasyon sayısı aralığında disk kavitatörler için geçerli olduğu bilinmektedir [33].



Şekil 2.16: Birimsiz kavitasyon zarfı yarı uzunluğunun kavitasyon sayısı ile değişimi [6].



Şekil 2.17: Birimsiz kavitasyon zarfı uzunluğunun kavitasyon sayısı ile değişimi [5].



Şekil 2.18: Disk kavitatörlerde birimsiz kavitasyon zarfı parametresinin $(L/d_c)^2/C_D$ kavitasyon sayısına bağlı değişimi [33].

2.3.5.2. Konik kavitatörler için yapılan çalışmalar

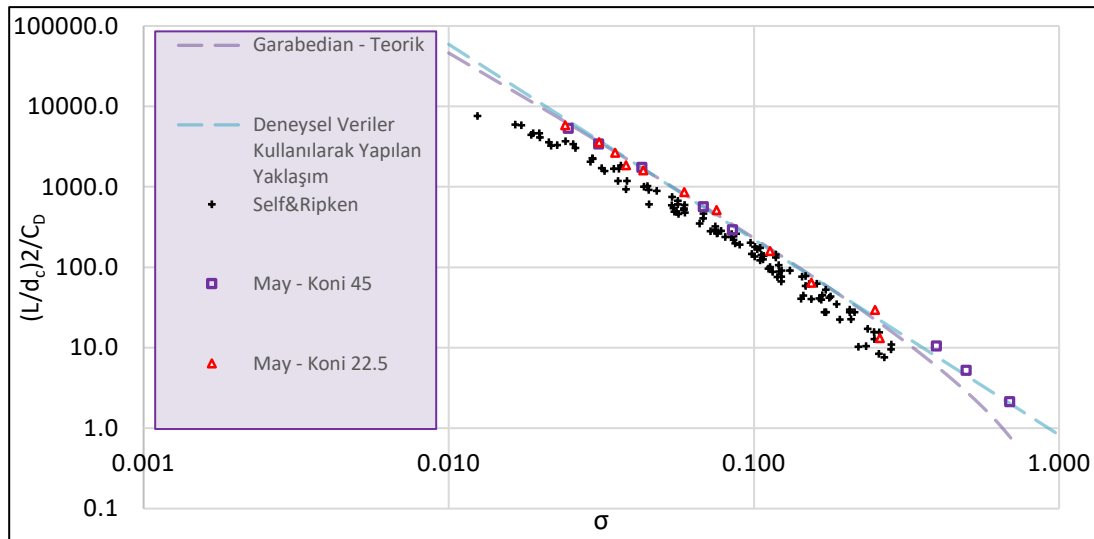
Konik kavitatörlerde kavitasyon zarfı uzunluğunu tayin etmek amacıyla $(L/d_c)^2/C_D$ parametresi kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda $(L/d_c)^2/C_D$ parametresi kavitatörün koniklik açısına ve kavitasyon sayısına bağlı olarak incelenmiş ve sonuç olarak elde edilen matematiksel ifade denklem 2.28’de verilmiştir. Çizelge 2.5’te, denklem 2.28’de kullanılan C birimsiz katsayısının kavitatörün koniklik açısına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Verilen C değerleri deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen amprik eşitliklerden türetilmiştir [33].

$$(L/d)/C_D^{1/2} = C \sigma^{-1.214} \quad (2.28)$$

Çizelge 2.5: Farklı konik yarım açıları için c sabitinin değeri.

C	Konik Yarım Açısı
0.873	67.5°
0.907	45°
0.949	22°-27°
0.915	14°

Şekil 2.19’da da Garabedian’ın amprik çözümlerinde kavitasyon sayısı 1’e yaklaştıkça kavitasyon zarfı uzunluğu da 0’a yaklaşmaktadır. Bu nedenle disk kavitatörlerde olduğu gibi Garabedian’ın bulduğu amprik çözüm düşük kavitasyon sayılarında doğru sonuçlar vermektedir [43]. Şekil 2.19’da gösterilen Reichardt’ın yaptığı çözüm sonrası ulaştığı eğri $0.04 \leq \sigma \leq 0.12$ kavitasyon sayısı aralığında konik kavitatörler için de geçerlidir.



Şekil 2.19: 45 derece konik kavitatörlerde birimsiz kavitasyon zarfı parametresinin $(L/d_c)^2/C_D$ kavitasyon sayısına bağlı değişimi [33].

Şekil 2.19’da da görüldüğü gibi konik kavitatörlerde iki farklı yarım açığa sahip kavitatörlerin deneysel verileri incelendiğinde kullanılan birimsiz parametrelerin $((d_m/d)/C_D^{1/2}, (L/d)/C_D^{1/2})$ farklı kavitatör tipleri için birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

2.3.6. Kavitasyon zarfı narinlik oranı (L/d_m)

Reichardt yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda kavitasyon zarfının narinlik oranı, kullanılan kavitatörün şeklinden bağımsız olacak şekilde sadece kavitasyon sayısına bağlı olarak ifade etmiştir. Yaptığı deneysel çalışmalarda maksimum kavitasyon sayısını 0.1 ile sınırlandırmış ve sadece disk, kupa, konik tipteki gibi akım ayrılma bölgesi belirgin olan kavitatör tiplerini tercih etmiştir [1].

Kavitasyon zarfının geometrik parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılan $(d_m/d)/C_D^{1/2}$ ve $(L/d)/C_D^{1/2}$ ifadeleri sadece kavitasyon sayısına bağlı olarak değiştiği bilinmektedir [33]. Reichardt’ın bu ifadeleri belirlemek için yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda ortaya çıkan kavitasyon zarfı narinlik oranı ifadesi denklem 2.29’da verilmiştir.

$$\frac{L}{d_m} = 1.067 \sigma^{-0.658} - 0.52 \sigma^{0.465} \quad (2.29)$$

2.3.6.1. Disk kavitatörler için yapılan çalışmalar

Waid, kavitasyon zarfı parametrelerini belirlemek amacıyla yaptığı deneysel çalışmaları kullanarak disk kavitatörler için kavitasyon zarfı narinlik oranını denklem 2.30’daki gibi ifade etmiştir [6].

$$\frac{L}{d_m} = \frac{1.08 \sigma^{-1.118}}{0.534 \sigma^{-0.568} + 1} \quad (2.30)$$

2.3.7. Hacimsel debi katsayısı

Süperkavitasyon rejimi için bir hacimsel debi katsayısından bahsedebilmemiz için kavitasyon zarfının içerisine bir gaz beslenmesi gerekmektedir. Basılan bu gazı ifade etmek için kullanılan ifade hacimsel debi katsayısıdır. Kavitasyon zarfının içerisine gaz basılarak yapay kavitasyon zarfının elde edilmesi ve elde edilen kavitasyon zarfının sürekliliğinin sağlanması için kavitasyon başlığında yer alan özelleşmiş sistemin operasyon koşullarına göre ortama kontrollü bir şekilde gaz basması

gerekmektedir. Burada elde edilecek kavitasyon zarfının istenilen ölçülere ulaşabilmesi, dolayısıyla istenen yapay kavitasyon sayısının elde edilebilmesi için zarfa basılacak olan gazın hacimsel debi katsayısının belirlenmesi gerekmektedir. Yapay kavitasyon rejimi oluşturabilme kabiliyetine sahip bir süperkavite su altı aracının kavitasyon başlığından sağlanacak hacimsel debi katsayısı denklem 2.31'deki gibi bir birimsiz katsayıyla ifade edilebilmektedir [44, 45].

$$C_Q = \frac{\dot{Q}}{U_\infty d_c^2} \quad (2.31)$$

$\dot{Q}$ ile kavitasyon zarfının içerisine basılacak hacimsel gaz debisi ifade edilmiştir. Birimi m^3/s 'dir. Birleşik teori kapsamında kavitasyon zarfının istemliliğinin bozulmasına yönelik oluşan gaz kaçaklarının (gaz fazının sıvı fazı ile etkileşimde olduğu ve kavitasyon zarfının kapandığı bölgede) giderilmesi için hacimsel debi katsayısının Froude sayısına, doğal kavitasyon sayısına ve yapay kavitasyon sayısına bağlı olarak incelenmesi gerekmektedir [34].

2.4. Kavitasyon Zarfı Geometrisi

Yüksek hızlarda doğal veya yapay kavitasyon rejimlerinin etkisiyle hareket eden bir su alt aracının sahip olacağı kavitasyon zarf geometrisini belirlemek için d_m/d , L/d ve L/d_m gibi birimsiz kavitasyon zarfı parametreleri tanımlanmıştır. Bölüm 2.3'de verilen süperkavitasyon rejiminin karakteristik parametrelerine bağlı olarak istenen seyir koşullarında kavitasyon zarfının uzunluk ve çap değerlerine ulaşmak mümkündür. Kavitasyon zarfı uzunluğu ve çapı değerlerinden yola çıkılarak kavitasyon zarfının geometrisinin belirlenmesine yönelik yapılan deneysel çalışmalar ve bu çalışmalar sonucunda elde edilen ampirik ifadeler bu bölümde anlatılmıştır.

Kavitasyon zarfının geometrik şekli genel olarak elipsoit denklemiyle ifade edilmektedir.

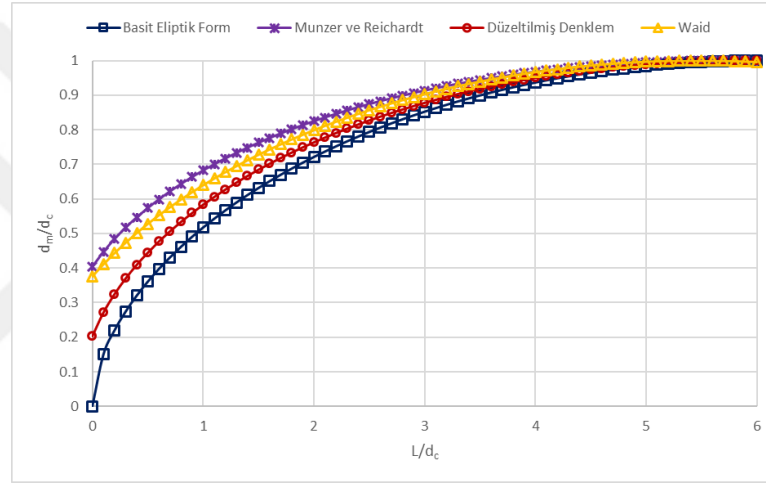
$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^n = 1 \quad (2.32)$$

Literatürde kavitasyon zarfının şeklini belirlemek için yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde kavitatör geometrisinin dört farklı süperelips denklemiyle ifade edilebileceği gözlemlenmiştir. Bu ifadelerde a/b oranı 6 olarak alınmış, n için de 1.8, 2.0 ve 2.4 değerleri kullanılmıştır. Bulunan süperelips denklemi ifadeleri Çizelge

2.6’da verilmiş ve bu ifadelerle ait grafikler aynı kavitasyon zarfı geometrisi için Şekil 2.20’de gösterilmiştir [6, 46].

Çizelge 2.6: Kavitasyon zarfının şeklini tanımlamak için kullanılan elips denklemleri.

Basit Eliptik form:	$\left(\frac{x-6}{6}\right)^2 + y^{1.8} = 1$
Münzer’in ve Reichardt’ın birlikte geliştirdikleri denklem:	$\left(\frac{x-5.65}{6}\right)^2 + y^{2.4} = 1$
Düzeltilmiş Elips Denklemi:	$\left(\frac{x-5.875}{6}\right)^2 + y^2 = 1$
Waid’ in geliştirdiği denklem:	$\left(\frac{x-5.46}{6}\right)^2 + \left(\frac{y-0.25}{0.75}\right)^{1.8} = 1$



Şekil 2.20: Farklı çalışmalar sonucunda elde edilen kavitasyon zarf şekilleri.

Kavitasyon zarfının dış hatları belirlenirken akım ayrılma çizgisi ve kavitatör geometrisine göre ortaya çıkabilecek olan farklılıklar dikkate alınmıştır. Bu kabuller altında ortaya çıkan kavitasyon zarf şekilleri $n=2$ olduğu durumda eliptik şekle oldukça yakındır. Bu sebeple süperkavite su altı araçları için kavitasyon zarfının şeklini belirlerken yukarıda geliştirilmiş denklemler yerine $n=2$ olduğu durumdaki basitleştirilmiş elipsoit denklemi tercih edilmiştir.

2.5. Disk Kavitatörlerde Hücum Açısının Kavitasyon Zarfı Üzerine Etkisi

Literatürde farklı kavitatör hücum açılarındaki yapılan deneysel çalışmalara bakıldığında, yeterli deneysel verileri ve buna bağlı olarak elde edilen ampirik sonuçları olan kavitatör şekillerinin başında disk tipi kavitatörler gelmektedir. Bu kapsamda, Waid disk kavitatörler üzerinde yaptığı deneysel çalışmalardan yararlanarak farklı sapma açıları için disk kavitatörlerin kavitasyon zarflarındaki

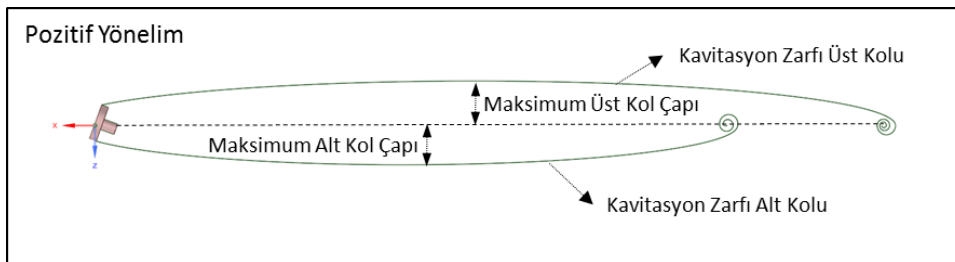
değişimleri denklem 8.18'deki, 8.19'daki ve 8.20'deki ampirik eşitliklerle ifade etmiştir [6].

$$\frac{d_m}{d} = 0.534\sigma^{-0.568} + 1 = \frac{2Q}{\sigma^S} + 1 \quad (2.33)$$

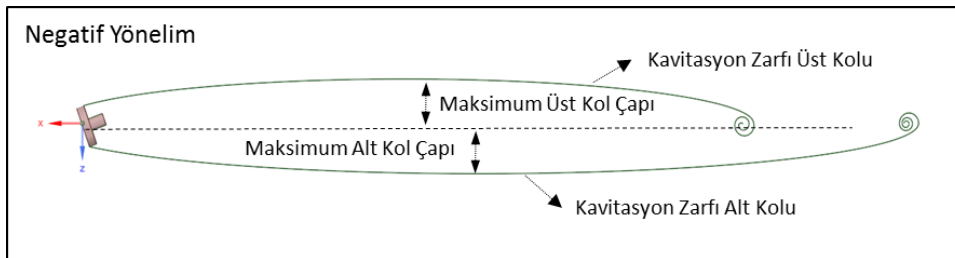
$$\frac{L}{d} = 1.08\sigma^{-1.118} = 2M/\sigma^{1.118} \quad (2.34)$$

$$M = 0.54(1 \pm \sin^2 \alpha) \quad (2.35)$$

Şekil 2.21'de disk tipi bir kavitatörün pozitif yönlü sapma açısı yönelimleri, Şekil 2.22'de ise negatif yönlü sapma açısı yönelimleri ve buna bağlı olarak oluşması beklenen kavitasyon zarfları gösterilmiştir. Kavitatörün yönelimleri esnasında kavitasyon zarfının üst ve alt kollarının birbirlerinden farklılaştığı gözlemlenmiştir. Hücum açısının yönüne bağlı olarak ortaya çıkan bu farklılaşma sonucunda oluşan kavitasyon zarfının kapanma bölgesi kavitatör üzerinde herhangi bir hücum açısı olmadığı durumda oluşan kapanma bölgesinden farklılık göstermektedir. Kavitasyon sayısının 0.1'in altında olduğu durumlarda disk kavitatörler üzerinde herhangi bir hücum açısı olmadığı zaman oluşan kavitasyon zarfının kapanma bölgesinde herhangi bir ayrılma olmazken, hücum açısının olduğu durumda kavitasyon zarfı üst kolu ile alt kolu birbirlerinden ayrılmakta ve sonuç olarak iki farklı kapanma bölgesi oluşmaktadır. Sonuç olarak kavitasyon zarfının üzerindeki kavitatör sapma açısı kaynaklı iki farklı bölgede ayrı ayrı kapanması sonucunda ortaya çıkan şekil “İkili veya İkiz Vorteks” olarak adlandırılmaktadır [33].

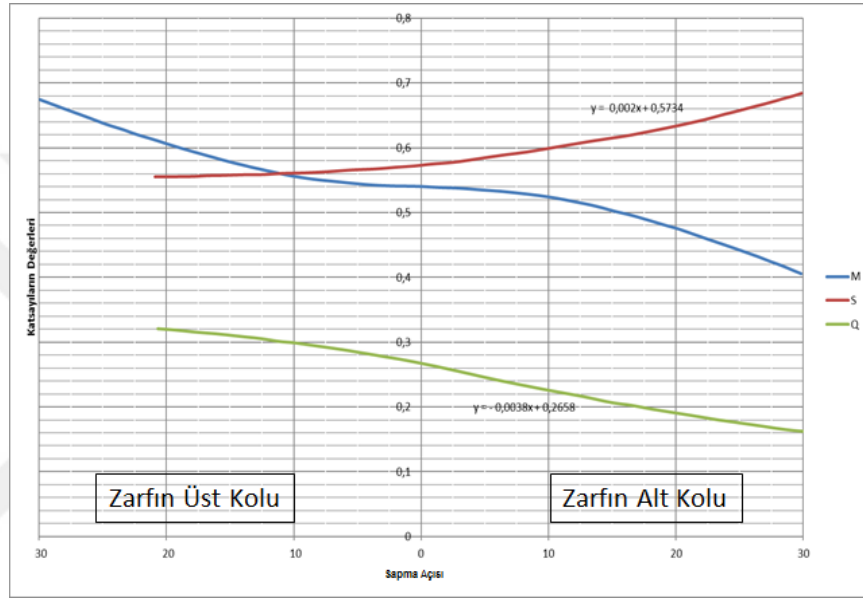


Şekil 2.21: Pozitif yönlü kavitatör sapması ve oluşan kavitasyon zarfı yönelimi.



Şekil 2.22: Negatif yönlü kavitatör sapması ve oluşan kavitasyon zarfı yönelimi.

Waid tarafından belirlenen ampirik eşitliklerin kullanılabilmesi amacıyla Şekil 2.23'te pozitif sapma açısına sahip olan bir kavitatör için S, M, Q katsayıları tanımlanmıştır [6]. Sapma açısı ekseninin sağ tarafı kavitasyon zarfının alt kolunu, sol tarafı ise üst kolunu tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu durumda kavitasyon zarfının alt kolunu belirlerken M katsayısının bulunmasında kullanılan $\sin^2 \alpha$ ifadesi pozitif işaretli, üst kolunu belirlerken de $\sin^2 \alpha$ negatif işaretli alınmıştır. Katsayıların belirlenmesiyle birlikte Waid'in belirlediği kavitasyon zarf geometrisini ifade eden denklem kullanılarak kavitasyon zarfının alt ve üst kol geometrileri belirlenebilmektedir.



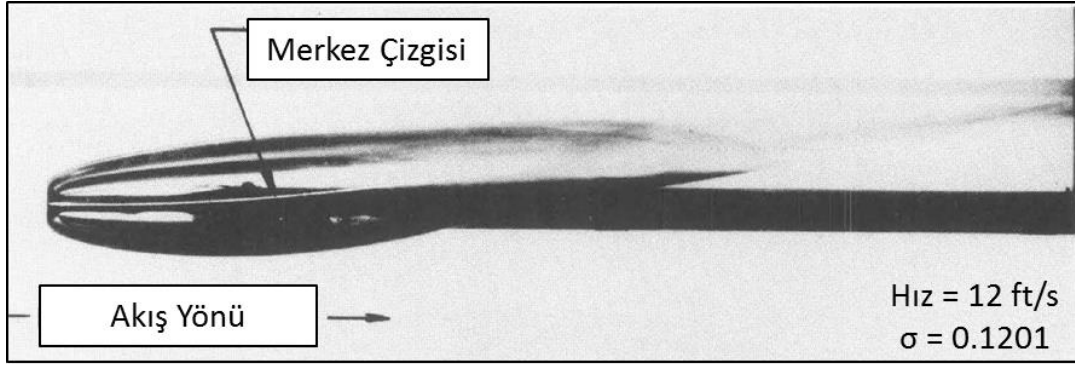
Şekil 2.23: Sapma açısına bağlı olarak kavitasyon zarfı katsayılarının değişimi.

Literatürdeki deneysel ve teorik çalışmalar incelendiğinde disk kavitatör dışındaki kavitatör tiplerinin kavitasyon zarf şekillerinin sapma açısına bağlı olarak değişimi hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır. Bu sebeple konik ve küre gibi kavitatörlerin sapma açısına bağlı olarak kavitasyon zarfında meydana getirdiği değişiklikler deneysel çalışmalar ve/veya HAD çalışmaları üzerinden incelenmelidir.

2.6. Froude Sayısının Kavitasyon Zarfı Üzerine Etkisi

Su altı aracının düşük hızlarda seyir ettiği durumlarda ortaya çıkan kavitasyon zarfı üzerindeki yerçekimi kuvvetinin etkisi, gaz dolu kavitasyon baloncuklarında kaldırma kuvveti kaynaklı satıha doğru bir yer değişimlerine sebep olmaktadır [6]. Seyir hızı arttırıldığında ise araç üzerindeki yerçekimi etkileri ihmal edilebilir seviyelere gelmekte ve kavitasyon baloncuklarına uygulanacak kaldırma kuvveti kaynaklı zarfın düşey eksenindeki asimetrikliği kaybolmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar

kapsamında yerçekimi etkisi kaynaklı kavitasyon zarfında meydana gelmesi beklenen asimetrik yapı kavitasyon zarfının ikinci yarısından itibaren oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni kavitasyon zarfının ilk yarısından itibaren yatay düzlemdeki enerjilerini kaybetmeye başlamalarıdır.



Şekil 2.24: Kavitasyon zarfının kaldırma kuvveti kaynaklı yer değiştirmesi [6].

Şekil 2.24'te 0.1201 kavitasyon sayısında Waid tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda kavitasyon zarfında kaldırma kuvveti kaynaklı oluşan yer değiştirme gösterilmiştir [6]. Ayrıca Şekil 2.24'te, kavitasyon zarfının alt kolunun taşıyıcı mekanizmanın içerisinde geçtiği görülmektedir. Bu durum kavitasyon zarfının kapanma bölgesini etkilemektedir.

Yerçekimi kuvvetinin etkisini ifade etmek için bir birimsiz sayı olan Froude sayısı kullanılmaktadır. Yüksek hızlı su altı araçlarında seyir hızı arttıkça Froude sayısı artmakta ve buna bağlı olarak yerçekimi etkileri azalmaktadır. Sonuç olarak Froude sayısının arttırılması su altı aracı üzerindeki yer çekimi kaynaklı etkileri azaltacaktır. Denklem 2.36'da Froude sayısı ifade edilmiştir.

$$Fr = \frac{U_{\infty}}{\sqrt{gd}} \quad (2.36)$$

Aynı geometrik özelliklere sahip iki tane süperkavite su altı aracından bir tanesinin optimum kavitasyon sayısını yalnızca doğal kavitasyonla diğerinin ise yapay kavitasyonu da kullanarak elde ettiğini varsayalım. Bu durumda doğal kavitasyon etkisinde hareket eden su altı aracının aynı kavitasyon sayısını elde edebilmesi için yapay kavitasyonun etkisinde hareket eden su altı aracına göre daha yüksek hızlarda operasyon yapması gerekecektir. Buna bağlı olarak yapay kavitasyon oluşumunda elde edilen süperkavitasyon rejiminin Froude sayısı doğal kavitasyonla elde edilene kıyasla daha düşük olacaktır. Düşük Froude sayısının bir sonucu olarak da yerçekimi etkileri

süperkavite su altı aracının kavitasyon zarfı üzerinde daha fazla etkiye sahip olacaktır. Bu durum özellikle düşük seyir hızlarında yapay kavitasyon için kavitasyon zarfı üzerindeki bozuntu katsayısını arttıracaktır [30].

2.7. Yapay Kavitasyon Zarfının Oluşturulması ve Sürekliliğinin Sağlanması

Bu bölümde istenen ölçülerdeki kavitasyon zarfının yapay kavitasyonla oluşturulması ve oluşturulan kavitasyon zarfının sürekliliğinin sağlanması amacıyla kavitasyon başlığı tarafından kavitasyon zarfına beslenecek gazın debi karakteristiği hakkında yapılan çalışmalar verilmiştir.

Yapay kavitasyon etkisinde kavitasyon zarfı içerisinde dengeli bir şekilde seyreden süperkavite su altı aracının sahip olduğu kavitasyon zarfını koruyabilmesi için kavitasyon zarfına beslemesi gereken hacimsel debi miktarı, $\dot{Q}_{giren}$, kavitasyon zarfı yüzeyinde veya kapanma bölgesinde oluşacak bozuntular sonucunda zarftan ayrılan hacimsel debiye, $\dot{Q}_{çıkan}$, eşit olmalıdır. Denge koşullarının sağlanabilmesi kapsamında gereken hacimsel debi miktarının belirlenmesi yapay kavitasyonun en temel problemidir.

Bu bölümde ilk olarak yapay kavitasyon elde etme metotları anlatılmış ve kavitasyon zarfının serbest sınır tabakasında oluşabilecek bozuntular verilmiştir. Sonrasında istenen kavitasyon zarfının oluşturulması ve oluşturulan kavitasyon zarfının sürekliliğinin sağlanması için gereken hacimsel debinin hesaplanması üzerine yapılan çalışmalar yapay kavitasyondaki gaz akış rejimleri başlığı altında incelenmiştir. Son olarak da kavitasyon zarfından gaz ayrılması ve kavitasyon zarfında bir süperkavite su altı aracı konumlandırılması durumlarındaki debi yaklaşımı verilmiştir.

2.7.1. Yapay kavitasyon oluşturma metotları

Tez kapsamında yapay kavitasyon oluşturma metotları iki alt başlıkta incelenmiştir. Bunlar kavitatörden gelen akış yönünün tersi yönde gaz basılmasıyla oluşturulan akışa doğru gaz basma metodu ve doğal kavitasyonun oluşması ile birlikte doğal kavitasyonun olduğu bölgelerden kavitasyon zarfına gaz basılması metodudur.

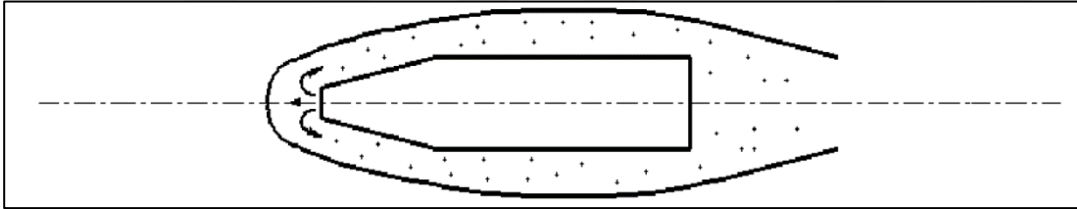
2.7.1.1. Akışa doğru gaz basma metodu

Süperkavite su altı aracının yapay kavitasyon rejimine sahip olması için basılması gereken havanın kavitatörden serbest akım yönüne ters bir şekilde yönlendirilmesi

sonucunda elde edilen metottur. Basılan havanın yönü serbest akıma ters yönde olmasından ötürü yapay kavitasyon ile kavitasyon zarfı oluşturmak veya kavitasyon zarfının sürekliliğini korumak için kavitasyon başlığındaki özelleşmiş yapıdan akışa doğru basılan havanın basıncının serbest akım basıncından yüksek olması gerekmektedir. Bernoulli Denkleminden yararlanarak elde edilen basılması gereken havanın eşitliği ifadesi denklem 2.37'deki gibidir [34].

$$U_g > U_\infty \sqrt{\frac{\rho}{\rho_g} (1 + \sigma)} \approx 28.6 \left(1 + \frac{\sigma}{2}\right) U_\infty \quad (2.37)$$

Bu metotla oluşturulan yapay kavitasyon rejimi düzensizdir ve özellikle kavitasyon zarfının kapanma bölgesinde şiddetli türbülanslara neden olmaktadır. İlavenen seyir hızına bağlı olarak sağlanması gereken gaz hızının çok yüksek olması bu metodun yüksek hızlı su araçları için uygulanabilirliğini devre dışı bırakmaktadır. Serbest akım yönüne ters olarak gaz basılmasına yönelik olan bu yöntem, düşük hızlarda hedeflenen kavitasyon zarfının oluşturulmasında kullanılabilir. Şekil 2.25'te akışa doğru gaz basma metodu kullanılarak elde edilebilecek yapay kavitasyon şekli gösterilmiştir [34].



Şekil 2.25: Akışa doğru gaz basma metodu.

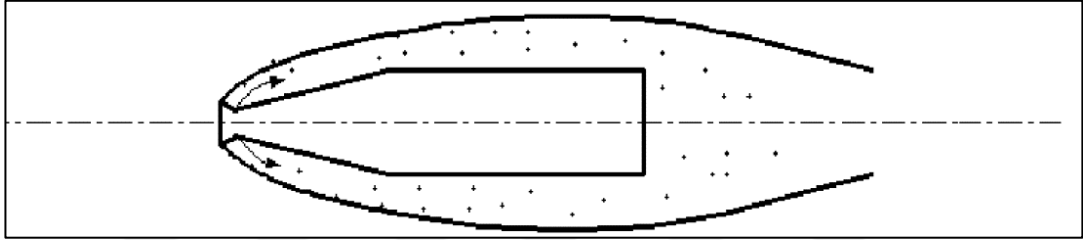
Süperkavite su altı aracının yüksek hızlarda seyir yapmasından dolayı bu metodun süperkavite su altı araçları için kullanılamayacağı değerlendirilmiştir.

2.7.1.2. Kavitasyon zarfının içerisine gaz basma metodu

Süperkavite su altı aracının sahip olduğu roket motorlu itki sistemi sayesinde çok kısa bir süre içerisinde kavitasyon sayısı düşecek ve doğal kavitasyonla kavitasyon zarfının oluşması süreci başlayacaktır. Bu kavitasyon zarfı süperkavite su altı aracının etrafının tamamen sarabilecek kabiliyette olmasa da aracın bir kısmında ıslak alan etkilerini minimize edecektir. Süperkavite su altı aracından aracın belli bölgesinde oluşan bu kavitasyon zarfının içerisine gaz beslemesi yapılarak kavitasyon zarfı iç basıncı artırılabilir ve bu sayede kavitasyon zarfı genişletilebilir. Kavitasyon zarfının

süperkavite su altı aracının etrafını sarmasını ve hedeflenen ölçülerine ulaşılmasını sağlayan bu metot Kavitasyon Zarfının İçerisine Gaz Basma Metodu olarak adlandırılmaktadır [30]. Bu metodun kullanılabilmesi için ilk olarak kavitasyon zarfı doğal kavitasyon yoluyla belirli bir olgunluk seviyesine getirilmelidir.

Kavitasyon zarfı bu metodun etkisiyle tamamen geliştiği durumda ise zarfın içerisine basılan gazın konumu kavitasyon zarfının tüm su altı aracını sarmasından ötürü önemini kaybetmekte ve dağıtılmış gaz beslemesi olarak adlandırılan bu durum sayesinde süperkavite su altı aracının herhangi bir bölgesinden kavitasyon zarfının içerisine gaz basılabilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda dengeli bir kavitasyon zarfının elde edilmesinin ardından gaz kaynağının süperkavite su altı aracı üzerindeki konumunun zarf içerisinde kalan herhangi bir bölge içerisinde olabileceği gözlemlenmiştir.



Şekil 2.26: Kavitasyon zarfının içerisine gaz basılması [34].

Şekil 2.26’da disk tipi bir kavitatör geometrisi kullanılarak kavitasyon zarfının içine gaz basılması metodu gösterilmiştir [34]. Kavitasyon zarfının içine gaz basılması durumunda oluşan kavitasyon zarfı istemli bir yapıya ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olmaktadır. Bu nedenle zarfın içerisine gaz basılması metodu en çok tercih edilen yapay kavitasyon oluşturma metodudur.

2.7.2. Serbest sınır tabaka etrafında oluşabilecek bozuntu

Bir süperkavite su altı aracı süperkavitasyon rejimi etkisinde hareket ederken aracın etrafında oluşan kavitasyon zarfının yüzeyi serbest sınır tabaka olarak adlandırılmaktadır. Kavitasyon zarfının serbest sınır tabakasında daimi akışı engelleyen herhangi bir durum gerçekleştiğinde (örneğin zarfın ikili vorteks şeklinde kapanması) bu tabakada akış ayrılmaları meydana gelir. Serbest sınır tabakada oluşan bu bozuntulardan bazıları kavitasyon sayısının sürekli değiştirilmesi nedeniyle kavitasyon zarfında oluşan titreşimlerden bazıları da Froude sayısının düşük kalmasından ötürü kavitasyon zarfının kapanma bölgesinde ayrılmalara sebep olabilecek yer çekimi kuvveti etkisinden kaynaklanabilmektedir.

Gaz fazı ile seyir ortamı arasındaki serbest sınır tabakada oluşan küçük çaplı bozuntular sonucunda sıvı yüzeyinde meydana gelen kararsızlıklar Taylor ve Helmholtz tarafından ele alınmıştır [47, 48]. Türbülans kaynaklı bu kararsızlığın temelinde kavitasyon zarfına basılan gazın hızı ile seyir hızı arasındaki farkı ifade eden bağıl hız ifadesi yer almaktadır. Denklem 2.38’de kavitasyon zarfı içerisine gaz basılması sonucunda ortaya çıkan bağıl hız ifadesi verilmiştir. Bağıl hız değeri Taylor ve Helmholtz tarafından belirlenen kritik hız değerini aştığı durumlarda, sıvı yüzeyinde oluşan dalgalanmalara ve kavitasyon baloncuklarının sıvı fazına geçmesine bağlı olarak bu kararsızlık ortaya çıkmaktadır.

$$U_{bağıl} = U_g - U_c \quad (2.38)$$

Bağıl hız değeri belirli bir hız değerinin üzerine çıkmasıyla birlikte serbest sınır tabaka yüzeyinde kavitasyon baloncukları damlacıklar haline geçerek ivmelenir ve bunun sonucunda sıvı fazına doğru gaz sıçramaları meydana gelir. Bu durum, kavitasyon zarfının kapanma bölgesine ulaştığında bu bölgede oluşan gaz ayrılması sürekli hale gelir ve kavitasyon zarfının kararlılığı bozulur. Bu gibi istenmeyen durumların engellenebilmesi amacıyla kavitasyon zarfına basılan hız ile kavitasyon zarfının serbest sınır tabaka hızı arasındaki farkın kritik hız değerinin altında tutulması gerekmektedir.

Taylor yaptığı çalışmalar sonucunda gaz hızının 10 m/s’den yüksek olduğu durumlarda bu sıçramaların ortaya çıkacağını belirtmiştir. Çizelge 2.7’de ise Taylor, Helmholtz ve farklı bilim insanları tarafından yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen kritik hız değeri verilmiştir.

Çizelge 2.7: Kritik hız değerleri.

	Taylor	Helmholtz	Deneysel Sonuç [49]
Kritik Hız Değeri, ($U_{g,cr}$)	10 m/s	11 m/s	13.5 m/s

2.7.3. Yapay kavitasyonun fazları

Yapay kavitasyon en genel tanımıyla doğal kavitasyon etkisiyle oluşan kavitasyon zarfının sahip olduğu kavitasyon sayısının düşürülmesi ilkesine dayanan bir kavitasyon rejimidir. Bu rejimin temelinde de kavitasyon başlığından doğal kavitasyonla oluşturulan kavitasyon zarfının içerisine gaz basılması durumu yer almaktadır. Yapay kavitasyon rejimi ile istenen kavitasyon zarfının oluşturulması ve oluşan kavitasyon zarfının sürekliliğinin sağlanması için kavitasyon zarfının içerisine beslenen gazın karakteristiğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu bölümde kavitasyon

zarfının içerisine gaz basma karakteristiği, sırasıyla, kavitasyon zarfı oluşum fazı ve kavitasyon zarfının süreklilik fazı olmak üzere iki farklı başlıkta incelenmiştir.

Denklem 2.39’da süperkavitasyon rejiminin etkisinde seyreden bir süperkavite su altı aracının etrafında oluşması beklenen kavitasyon zarfının hacim denge denklemi verilmiştir.

$$\frac{dW}{dt} = Q_{giren} - Q_{çıkan} \quad (2.39)$$

Yapay kavitasyon rejiminde istenen kavitasyon zarfını oluşturabilmek için düzenli olarak kavitasyon zarfının içerisine gaz beslemesi gerçekleştirilmez. Bu durumda kavitasyon zarfı hacminin sürekli olarak arttırılması ve istenen hacme ulaştırılması hedeflenmektedir. Ayrıca kavitasyon zarfının kapanma bölgesi sürekli olarak daha ileri bir noktaya taşındığı için de bu süreçte zarftan ayrılan gazın debisi ($Q_{çıkan}$) ‘0’ olmalıdır. Bu durumda ortaya çıkacak yeni ifade denklem 2.40’da gösterilmiştir.

$$\frac{dW}{dt} = Q_{giren} \quad (2.40)$$

Doğal kavitasyon etkisiyle oluşan ve gaz basma metodu kullanılarak hacimce artışı sağlanan kavitasyon zarfı istenen ölçülere ulaşmasının ardından, oluşturulan kavitasyon zarfı hacminin korunması gerekmektedir. Kavitasyon zarfının ölçülerini korumak için kavitasyon zarfında oluşan bozuntuların ve kapanma tipine bağlı olarak yaşanan kayıpların hacmi kadar kavitasyon zarfının içerisine ekstra gaz beslemesi yapılmalı ve zarfın sürekliliğinin sağlanması gerekmektedir. Denklem 2.41’de kavitasyon zarfı hacminin korunması için sağlanması gereken koşullar verilmiştir.

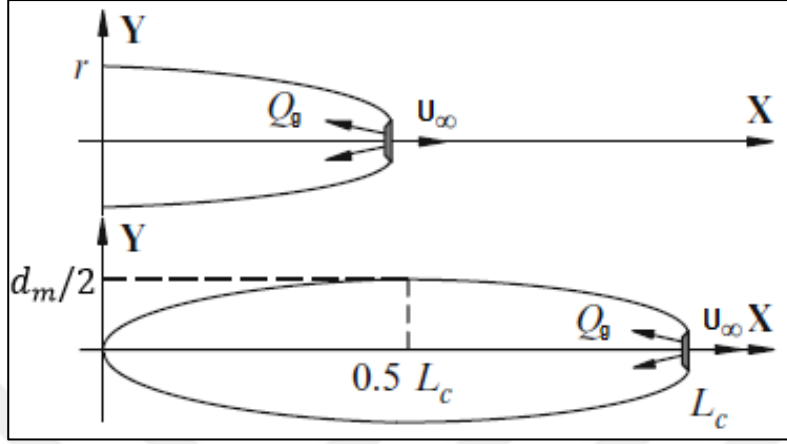
$$\sigma = \sigma_0, \quad \frac{dW}{dt} = 0, \quad Q_{giren} = Q_{çıkan} \quad (2.41)$$

2.7.3.1. Kavitasyon zarfı oluşum fazı

Yapay kavitasyonun etkisiyle hedeflenen kavitasyon zarfını oluşturmak için ilk olarak doğal kavitasyonla oluşan zarfın içerisine gaz basılarak kavitasyon zarfı istenilen ölçülere getirilmelidir. Bu aşamada istenen kavitasyon zarfının oluşması için gereken hacmin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar ele alınmıştır. Kavitasyon zarfının oluşması esnasında kavitasyon zarfının serbest yüzeyindeki kavitasyon hızı ve kavitasyon zarfı içerisindeki zarf basıncı sabittir. İstenen kavitasyon zarfının oluşması için kavitasyon zarfının içerisine basılması gereken gaz miktarı bu faz süresince maksimum değerine ulaşır. Bu nedenle kavitasyon zarfının oluşturulması sürecinde en

önemli ölçüt süperkavite su altı aracının, kavitasyon zarfının oluşum fazının süresini minimize edebilecek yüksek kapasiteli bir gaz kaynağına sahip olmasıdır.

Şekil 2.27’de kavitasyon zarfının içerisine gaz basılarak hedeflenen kavitasyon zarfının oluşum süreci gösterilmiştir.



Şekil 2.27: Gaz kaynağına bağlı olarak kavitasyon zarfının gelişimi.

Kavitasyon zarfının geometrisini belirlerken, hesaplamalarda kolaylık sağlaması adına eliptik denklemlerin kullanılabileceğinden bahsedilmiştir. Bu kapsamda eliptik bir geometriye sahip olan kavitasyon zarfının zarf çapının X eksenine göre birim zamandaki değişimi denklem 2.42’de gösterilmiştir [49].

$$r_x^2 = \frac{x(L_c - x)}{\lambda^2} \quad (2.42)$$

$$\lambda = \frac{L_c}{d_m} \quad (2.43)$$

Eliptik bir kavitasyon zarf geometrisinin hacmi ise Denklem 2.44’te gösterilmiştir.

$$W_c = \frac{2}{3} \pi L_c \left(\frac{d_m}{2} \right)^2 \quad (2.44)$$

Waid’in elde ettiği ampirik ifadeler kullanılarak disk kavitatöre sahip bir süperkavite su altı aracının kavitasyon zarfı yüzey alanının yatay eksenindeki değişimi de denklem 2.45’teki gibidir.

$$S_c = \pi r_x^2 = \frac{\pi x(L_c - x)}{\lambda^2} \quad (2.45)$$

$$d_m = d_c(0.534 \sigma^{-0.568} + 1) \quad (2.46)$$

$$L_c = d_c(1.08 \sigma^{-1.118}) \quad (2.47)$$

Elde edilen eşitlikler kullanılarak yapay kavitasyon etkisiyle elde edilecek kavitasyon zarfı hacminin zamana bağlı değişimini veren ifade ve kavitasyon başlığı içerisindeki özelleşmiş sistemlerden basılması gereken gazın debisi denklem 2.48 ve 2.49'daki gibidir [49].

$$\frac{dW}{dt} = \pi r_x^2 U_\infty = \frac{\pi x(L_c - x)}{\lambda^2} U_\infty \quad (2.48)$$

$$Q_{giren}(x) = \frac{\pi x (0.2852 \sigma^{-1.136} + 1.068 \sigma^{-0.568} + 1)}{1.1664 \sigma^{-2.236}} (1.08 \sigma^{-1.118} - x) U_\infty \quad (2.49)$$

Denklem 2.50 ve 2.51'de kavitasyon başlığından kavitasyon zarfına basılması gereken maksimum ve ortalama hacimsel debi katsayısı verilmiştir.

$$\bar{Q}_{giren,max} = \frac{Q_{giren,max}}{\frac{\pi d_m^2}{4} U_\infty} = (0.534 \sigma^{-0.568} + 1)^2 \quad (2.50)$$

$$\bar{Q}_{giren,ort} = \frac{W_c U_\infty}{L_{c0} \frac{\pi d_m^2}{4} U_\infty} \sim \frac{2}{3} (0.534 \sigma^{-0.568} + 1)^2 \quad (2.51)$$

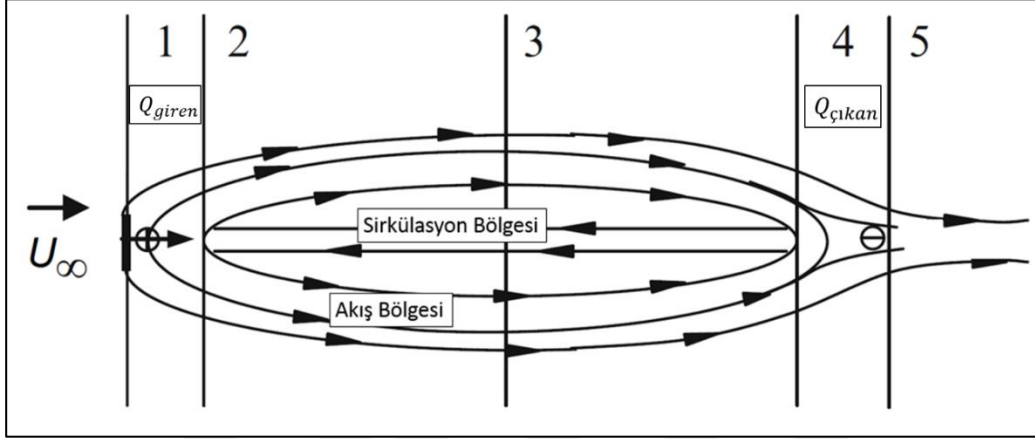
Kavitasyon zarfının oluşumu için tanımlanan minimum süre kavitatör geometrisinin ayrılma bölgesinden buharlaşan bir gaz balonunun kavitasyon zarfı yüzeyinde hareket ederek zarfın kapanma bölgesine kadar olan hareketi sonucunda geçen süre olacak şekilde tanımlanmıştır. Tanımlanan bu alt limiti ifade eden eşitlik denklem 2.52'deki gibidir. Denklem 2.52'de belirlenen uzunluk değeri gaz parçacığının izlediği eliptik yörünge ihmal edilerek kavitasyon zarfının uzunluğu olacak şekilde ele alınmıştır [49].

$$t_{min} = \frac{L_{c0}}{U_\infty} \sim \left[\frac{L_c}{U_\infty} = \frac{d_c (1.08 \sigma^{-1.118})}{U_\infty} \right] \quad (2.52)$$

2.7.3.2. Kavitasyon zarfı süreklilik fazı

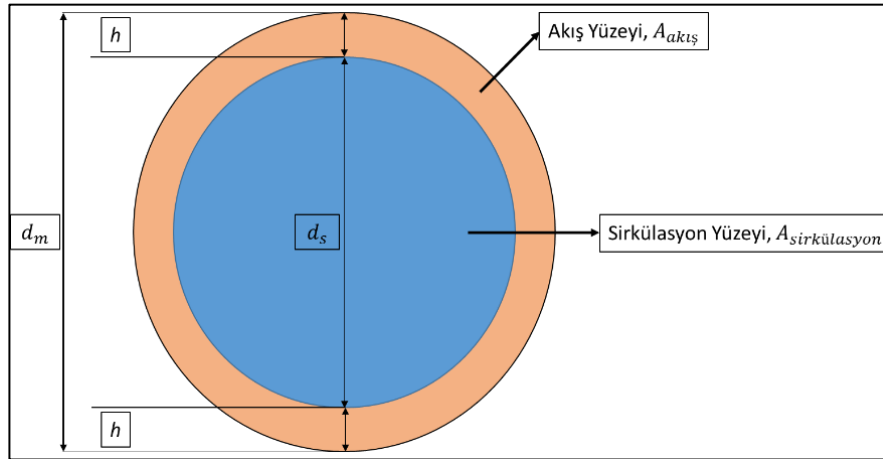
Kavitasyon zarfının oluşum fazında kavitasyon zarfının yapay kavitasyon etkisiyle hedeflendiği geometrik ölçüleri sağlamak adına adeta bir balonu şişirir gibi gaz basılmasından ve bu şekilde istenen kavitasyon zarfının oluşturulmasından bahsedilmiştir. Kavitasyon zarfının istenen ölçülere oluşum fazıyla getirilmesinin ardından süperkavite su altı aracının, seyrinin sonuna kadar elde ettiği kavitasyon zarfının sürekliliğini sağlaması bunun için de sahip olduğu kavitasyon zarfının içerisine düzenli olarak gaz basılması gerekmektedir. Bu nedenle oluşum fazının tamamlanmasının ardından kalan seyir süresince kavitasyon zarfının içindeki hacmin korunması hedeflenir ($\dot{W} = 0$). Kavitasyon zarfı hacmin korunması için de

kavitasyon zarfından bozuntu, titreşim ve kapanma yapısı kaynaklı oluşabilecek gaz sızıntısı kadar kavitasyon başlığından kavitasyon zarfının içerisine gaz beslenmelidir. Literatürdeki deneysel çalışmalar sonucunda disk tipi kavitatörlerde kavitasyon zarfının içerisinde iki farklı akış bölgesi olduğu gözlemlenmiştir. Bunlar Şekil 2.28’de verilen sirkülasyon bölgesi ve akış bölgesidir [49].



Şekil 2.28: Kavitasyon zarfı içindeki gazın hareketi.

Şekil 2.28’de kavitasyon zarfı içinde oluşan kavitasyon yapısı 5 farklı bölge için incelenmiştir. Reichardt tarafından yapılan çalışmalardan yararlanılarak kavitasyon zarfının başlangıç bölgesine kaynak, kapanma bölgesine de kuyu atanabilir [1]. Kavitasyon zarfının içerisinde düşeyde kesitler alındığı durumda Şekil 2.29’da verildiği gibi her kesit içerisinde sirkülasyon bölgesi ve akış bölgesi oluşacaktır. Bu bölgeler kavitasyon zarfının oluşum, gelişim ve kapanma bölgelerine göre farklı dağılım oranlarındadır. Sirkülasyon bölgesi tamamen gaz fazının torpido üzerinde hareket etmesi sonucu oluşan sirkülasyonları, akış bölgesi de gaz formunun su formu ile etkileşimi sonucu oluşan kavitasyon arayüzünü ifade etmektedir.



Şekil 2.29: Kavitasyon zarfı içindeki sirkülasyon ve akış bölgeleri.

Bölge 1 – Gaz Besleme Bölgesi: Bu bölgede kavitasyon zarfının içine Q_1 hacimsel debisiyle gaz beslemesi yapılır. Burada akış bölgesi oluşmakla birlikte sirkülasyon bölgesi henüz oluşmamıştır [49].

$$Q_1 = Q_{giren}, U_{bağlı} = U_{\infty} - Q_{giren}/\pi d_c^2 \quad (2.53)$$

Bölge 2 – Sirkülasyon Başlama Bölgesi: Kavitasyon zarfının maksimum genişliğine ulaştığı bölgedir. Gaz beslemesi bu bölgenin sonuna kadar kavitasyon zarfının genişlemesini sağlar.

Genişleme alanını A_2 ile ifade edersek denklem 2.54'teki ifadeye ulaşabiliriz. Bu bölgede, yatay eksen boyunca kavitasyon zarfının ortalarına gelindikçe sirkülasyon bölgesi genişler ve akışkan bölgesi daralır [49].

$$Q_g = A_2 U_{\infty} = \pi r_2^2 U_{\infty} = \pi U_{\infty} \frac{x(L_c - x)}{\lambda^2} \quad (2.54)$$

Bölge 3 – Sirkülasyon Daralma Bölgesi: Kavitasyon zarfının maksimum çapa sahip olduğu bu bölgede akış bölgesi de minimum genişliğe sahiptir. Aynı zamanda akış bölgesinin daralmasıyla sirkülasyon bölgesi de kavitasyon zarfının orta noktasında maksimum yüzey alanına ulaşmaktadır. Bu bölgenin sonlarına doğru sirkülasyon bölgesi etkinliğini kaybetmekte ve kavitasyon zarfı kapanma bölgesi oluşmaya başlamaktadır.

Şekil 2.29'da kavitasyon zarfının orta noktasındaki akış ve sirkülasyon bölgeleri gösterilmiştir. Denklem 2.55'e ve 2.56'ya bu şekil yardımıyla ulaşılır.

Denklem 2.55'te h sembolüyle kapanma bölgesinin minimum genişliği ifade edilmiştir. Denklem 2.56'da ise sirkülasyon bölgesinin maksimum yüzey alanını veren ifade yer almaktadır [49].

$$h = \frac{Q_{giren}}{\pi d_m U_{\infty}} \quad (2.55)$$

$$A_{akış} = \frac{\pi(d_m - 2h)^2}{4} \quad (2.56)$$

Bölge 4 – Sirkülasyonun Kaybolduğu Bölge: Sadece akış bölgesi yer almaktadır. Kavitasyon zarfının kapanma eğilimine başladığı bölgedir [49].

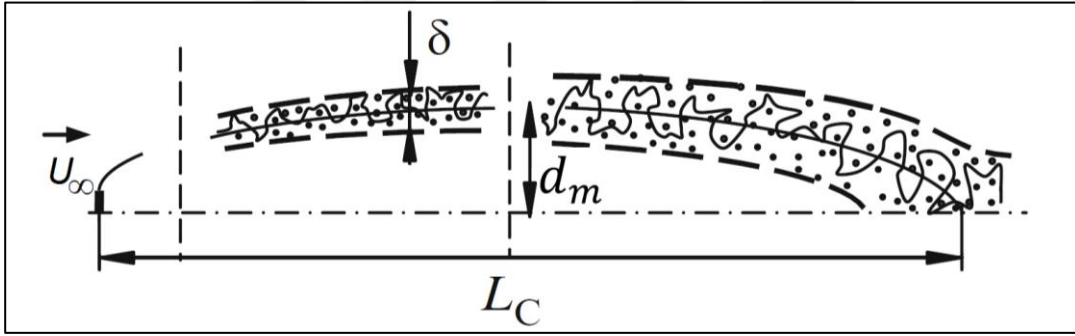
Bölge 5 – Kavitasyon Zarfının Kapanma Bölgesi: Kavitasyon zarfının enerjisinin çok azaldığı ve zarfın kapandığı bölgedir. Bu bölgede yaşanan enerji kaybıyla, bölgeden sonra hidrodinamik iz bölgesi oluşmaya başlar.

Kavitasyon zarfının süreklilik fazında aktarılan durumların geçerli olabilmesi ve değerlendirilebilmesi için seyir hızının, derinliğinin, gaz besleme oranının ve kavitasyon sayısının sabit olması gerekmektedir.

Kavitasyon zarfının süreklilik fazının sağlanması için gerekli olacak gaz basma miktarının hesaplanması için yukarıda belirtilen bölgelerin analiz edilmesi ve yaklaşık bir anlık hacim kaybı hesaplanarak eksilen gaz hacminin besleme yapılarak yerine koyulması gerekmektedir [49].

2.7.4. Kavitasyon zarfı yüzeyindeki gaz sürüklemesi

Kavitasyon zarfının başlangıç bölgesinden kapanma bölgesine kadar gaz fazı ile sıvı fazı arasında sürekli bir etkileşim söz konusudur. Bu bölgelerde gaz molekülleri ile sıvı molekülleri arasındaki daimi etkileşimlere bağlı olarak gaz fazından sıvı fazına geçişler yani bozuntular meydana gelmektedir. Bu yüzden etkileşimin olduğu bölgelerde gaz fazı yüzdesinde azalmalar gözlemlenmektedir.



Şekil 2.30: Faz etkileşiminde olan bir kavitasyon zarfı geometrisi.

Kavitasyon zarfı yapay kavitasyon rejiminin de etkisiyle maksimum kavitasyon çapına ulaştıktan sonra kinetik enerjisinde yaşanan azalmalardan ötürü kavitasyon zarfının yatay ekseninde ikinci yarısında sıvı moleküllerine daha çok maruz kalmakta ve bunun sonucunda faz etkileşim bölgesinde genişlemeler olmaktadır. Şekil 2.30'da da radyal yöndeki bozuntuların kavitasyon zarfının kapanma bölgesine doğru artışı görülmektedir [49]. Şekil üzerinde etkileşimin olduğu bölgenin genişliği δ sembolü ile gösterilmiştir.

Kavitasyon zarfı yüzeyindeki gaz molekülleri serbest sınır tabakanın iç ve dış bölgesinde meydana gelen bozuntuları giderme eğilimindedir. Bu esnada da aynı hacimde sıvı molekülleri su damlacıkları formunda kavitasyon zarfının içerisine doğru hareket etme istemliliklerine sahiptir. Kavitasyon zarfının kapanma bölgesindeki serbest sınır tabakanın dış bölgesinde yer alan gaz molekülleri serbest sınır tabakanın

bozulmasıyla kavitasyon zarfının iz bölgesine geçmekte ve iz bölgesine geçen gaz parçacıkları sıvı molekülleri ile birlikte köpük formunu almaktadır.

Bu aşamadan sonra yapılacak teorik çalışmalarda gaz etkileşim oranı hesaplanırken kavitasyon zarfının orta bölgesindeki gaz yoğunluğu referans alınmıştır [49].

$$Q_{çıkan} = k\pi d_m U_\infty \delta(Re_L; We; Fr; Ri) \quad (2.57)$$

Denklem 2.57’de verilen $\pi d_m \delta$ ifadesi bozuntuların etkin olduğu tabakanın kesit alanıdır. Bu bölgedeki bozuntu genişliği $\delta(Re_L; We; Fr; Ri)$, basılan gazın yoğunluğu sabit kabul edildiğinde Richardson sayısından bağımsız olacaktır. Ayrıca süperkavitasyon rejiminin etkin ve kavitasyon zarfı geometrisinin yatay eksenle simetrik olabilmesi için genel olarak $We > 10^3$ ve $Fr > 10^2$ olması gerektiğinden Weber sayısı ve Froude sayısı da ihmal edilmiştir. Bu durumda bozuntu genişliği sadece Reynolds sayısının bir fonksiyonu olacaktır [34]. Reynold sayısına bağlı olarak bozuntu genişliği denklem 2.58’de gösterilmiştir.

$$\delta = k_1 L_c (Re_L)^n \quad (2.58)$$

k_1 ve n katsayıları kavitasyon zarfının serbest sınır tabakası üzerinde, farklı seyir koşulları için belirlenmelidir. Genel olarak kavitasyon zarfının gaz kaybı denklem 2.59’daki gibi olmaktadır [49].

$$Q_{çıkan} = k k_1 \pi d_m L_c U_\infty (Re_L)^n \quad (2.59)$$

$$\bar{Q}_{çıkan} = \frac{Q_{çıkan}}{\pi (d_c/2)^2 U_\infty} = 4KK_1 (Re_L)^n (0.534 \sigma^{-0.568} + 1)(1.08 \sigma^{-1.118}) \quad (2.60)$$

$$Re_L = \frac{U_{bağlı} L_c}{2\nu} = (U_\infty \sqrt{1 + \sigma} - U_g) \frac{L_c}{2\nu} \quad (2.61)$$

$$U_{bağlı} = U_c - U_g = U_\infty \sqrt{1 + \sigma} - U_g \quad (2.62)$$

Denklem 2.58’deki serbest sınır tabakanın kalınlığı ifadesinin sadece kavitasyon zarfı uzunluğuna bağlı olarak değiştiği kabul edildiğinde ($\delta = \delta(L_c)$), denklem 2.57 yalnızca kavitasyon sayısına bağlı olarak değişecek ve denklemin son hali denklem 2.60’daki gibi olacaktır. $Q_{çıkan}$ değeri deneysel çalışmalarla elde edildikten sonra C sabiti denklem 2.63’de verilen kavitasyon sayısına bağlı verilen ifade üzerinden her test koşulu için hesaplanabilmektedir [49].

$$Q_{çıkan}(\sigma) = C. (0.534 \sigma^{-0.568} + 1)(1.08 \sigma^{-1.118}) \quad (2.63)$$

2.7.5. Kavitasyon zarfı içerisinde süperkavite su altı aracı bulunduğu durum için debi yaklaşımı

Kavitasyon zarfı içerisinde bir süperkavite su altı aracı düşünüldüğünde, kavitasyon zarfı ve kavitasyon zarfının etkileşim bölgesi, kavitasyon zarfının hacminin ve kavitasyon zarfının iç kısmındaki hız dağılımının değişmesinden ötürü farklılaşacaktır. Denklem 2.64'te kavitasyon zarf hacmindeki değişime bağlı olarak gaz denge denklemi verilmiştir [49].

$$r_t = F_t(x), \quad W_t = \pi \int_0^{L_t} F_t^2(x) dx, \quad (2.64)$$

$$\frac{d(W - W_t)}{dt} = Q_{giren} - Q_{çıkan} \quad (2.65)$$

Kavitasyon zarfının içindeki gazın ortalama hız ifadesi denklem 2.66'daki gibidir [49].

$$l(x) = (r_x - r_t) \quad (2.66)$$

$$U_g(x) = \frac{Q_g}{\pi \cdot l \cdot (r_x + r_t)} \quad (2.67)$$

Yapay kavitasyon esnasında gaz kaynağından basılan hız ile kavitasyon zarfı üzerinde oluşan hız arasındaki fark kritik hızın altında kalmak şartıyla pozitif ya da negatif değerli olabilir.

$$U_{bağlı} = U_c - U_g = U_\infty \sqrt{1 + \sigma} - \frac{Q_{giren}}{\pi \cdot l \cdot (r_x + r_t)} \quad (2.68)$$

Kavitasyon zarfının geometrisinde bozuntuya sebep olacak durumlar ihmal edildiğinde bağıl hız ile kritik hız arasındaki ilişki denklem 2.69'daki gibidir.

$$|U_{bağlı}| < U_{g,cr} \quad (2.69)$$

$$|\pi \cdot (r_x + r_t) (U_\infty \sqrt{1 + \sigma} - U_{g,cr})| < \frac{Q_{giren}}{l} \quad (2.70)$$

Şekil 2.31'de kavitasyon zarfının içinde bir süperkavite su altı aracı bulunması durumunda oluşması beklenen zarf-geometri etkileşimli model gösterilmiştir.

yeterlidir. Süperkavitasyon rejiminin elde edilmesiyle de oluşan pürüzlülük etkisi azalmaktadır. Kavitasyon sayısının belirlenen kritik kavitasyon sayısına ulaşması ile pürüzlülük etkisi tamamen kaybolmaktadır.

2.8.2. Kavitasyon zarfının kapanma bölgesindeki akışın zarfa etkisi

Kavitasyon zarfının ilk yarısından sonraki bölümlerde akışkanın kinetik enerjisi azalır ve kavitasyon zarfı üzerinde baloncuk şeklinde çökmeler oluşmaya başlar. Bu çökmeler kaynaklı kavitasyon duvarında hasarlar oluşur ve kavitasyon zarfı üzerindeki bozuntulardan ötürü pürüzlü bir yapıya ulaşır. Enerji düşüşü nedeniyle kavitasyon zarfı üzerinde oluşan bozuntular torpidonun suyun ıslak alan etkisine maruz kalmasına ve yüksek hızlı su altı aracının üzerindeki sürüklenme kuvvetinin artmasına sebep olur. Böylece süperkavite su altı aracının seyir hızı düşer ve araç ideal akış rejiminden uzaklaşır.

Kavitasyon zarfı uzadıkça kavitasyon zarfının kapanma bölgesinde oluşabilecek bozuntular su altı aracının gerisinde kalacaktır ve su altı aracı belli bir mesafeden sonra bu bozuntulardan etkilenmeyecektir. Genel olarak bu gibi durumlarla karşılaşmamak için kavitasyon zarfı uzunluğunun su altı aracı boyunun en az 1.5 katı olması önerilmektedir [33].

2.8.3. Düzensiz akım ayrılması

Kavitatörlerin üzerinden düzensiz akım ayrılması oluşması kavitatörün üretimden kaynaklı oluşabilecek bir bozuntu şeklidir. Kavitatörlerin akım ayrılma bölgelerinde yüzeylerin çapaksız ve olabildiğince eşit keskinlikte olması, simetrik ve dengeli bir kavitasyon zarfı elde etmek adına önemli bir ölçüttür.

2.8.4. Sınır tabaka türbülansı

Akım ayrılması karakteristiği, farklı kavitatör tipleri için farklı özellikler göstermektedir. Ancak her biri için akım ayrılma bölgesinde oluşan akış rejimi önemli bir ölçüttür. Laminer bir akış değerlendirildiğinde, kavitatörde oluşması planlanan akım ayrılması yüzey pürüzlülüğüne neden olmamaktadır. Ancak türbülanslı akışlarda akım ayrılması süperkavitasyon rejimini olumsuz etkilemekte ve zarf yüzeyinde pürüzsüzlüğe neden olmaktadır. Bu durum kavitasyon zarfı üzerinde dengesizliğe ve bozulmalara yol açmaktadır. Bu yüzden ilk zarf oluşumu süresince kavitatörün

türbülanslı bir akışa maruz kalmaması kavitasyon zarfının planlandığı gibi oluşması için önemlidir.

2.8.5. Kavitasyon üretici sistemin titreşimi

Yapay kavitasyon yoluyla kavitasyon başlığının istenen kavitasyon zarfını oluşturması süresince kavitatörün herhangi bir titreşime maruz kalmaması gerekmektedir. Aksi halde kavitasyon başlığında oluşabilecek titreşimler kavitasyon zarfında salınımlara neden olabilir. Ancak bu durumların genel olarak su üstünden su altına doğru gerçekleştirilen dikey atış durumlarında görüldüğü gözlemlenmiştir.





3. SÜPERKAVİTE SU ALTI ARACI TASARIMI VE ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde geleneksel su altı araçlarına göre farklılaşmış alt sistemleri bulunan süperkavite su altı araçları anlatılmış, tez kapsamında kullanılacak süperkavite su altı aracının geometrisi fiziksel ve performans özellikleriyle birlikte verilmiştir.

3.1. Süperkavite Su Altı Aracının Tanımı

Süperkavite su altı araçları özelleşmiş roket motorlu itki sistemleri ile kavitasyon üreten ve besleyen kavitasyon başlıkları sayesinde geleneksel su altı araçlarına göre 4-5 kat daha yüksek seyir hızlarına ulaşabilmektedirler. Süperkavite su altı araçlarının süperkavitasyon rejimine sahip olabilmeleri için burun bölgelerinde kavitatör adı verilen kavitasyon oluşumunu kolaylaştıran geometriler yer alır. Disk, koni, ogiv, küre vb. birçok farklı geometrilere sahip olabilen kavitatörler, istenen kavitasyon zarfının oluşturulmasında önemli bir konumdadır. Süperkavite su altı araçlarının istenen kavitasyon zarflarını oluşturabilmeleri için kavitatör geometrilerine ihtiyaç duymalarının dışında istenen kavitasyon sayısına da ulaşabilmeleri gerekmektedir. Bu aşamada süperkavite su altı aracına istenen ilk hızı sağlayacak ve sonrasında aracı kavitasyon zarfı içerisinde ıslak alan etkilerini minimize edecek şekilde seyir ettirecek alt sistem roket motorlu itki sistemleridir. Süperkavite su altı aracının kavitasyon sayısını istenilen mertebelere düşürebilmesi için sisteme ilk hızı sağlayan roket motorlu itki sistemleri tek başlarına yeterli olmamaktadır. Roket motorlu itki sistemleri yalnızca doğal kavitasyonun etkisinde istenen itkiyi üretebilecek kabiliyete sahip değildirler. Roket motorlarından beklenen performansın sağlanabilmesi için kavitasyon başlığı adı verilen özelleşmiş sistem tarafından, oluşturulan doğal kavitasyonun yapay kavitasyon oluşturma metotlarından birini kullanarak genişletilmesi ve kavitasyon sayısının süperkavite su altı aracının etrafını sarabilecek kavitasyon zarfını oluşturabilecek mertebeye çekmesi gerekmektedir.

Süperkavite su altı araçlarının seyri boyunca kavitasyon zarfını koruması gerekliliği bu araçların manevra kabiliyetlerini sınırlamaktadır. Bu sınırlama süperkavite su altı araçlarının manevralarını kavitasyon zarfını bozmayacak ve zarfın dışına çıkmayacak

şekilde gerçekleştirebilmeleri içindir. Bu nedenle süperkavite su altı aracının statik ve dinamik denge limitleri belirlenirken aracın kavitasyon zarfı içerisindeki konumuna dikkat edilmelidir. Belirlenen bu limitleri çerçevesinde kontrol yüzeyi tasarımları yapılmalıdır.

Süperkavite su altı araçlarını tasarlarken dikkat edilmesi gereken bir diğer konu ise seyir derinliğidir. Seyir derinliği artmasına bağlı olarak artan ortam basıncı kavitasyon oluşumu için olumsuz bir etkidir. Bu nedenle süperkavite su altı aracı tasarlanırken seyrini gerçekleştirebileceği derinlik limiti, beklenen kavitasyon zarfını oluşturabilecek maksimum derinlik prensibine göre belirlenmelidir.

Kavitasyon zarfı süperkavite su altı aracının ihtiyaç duyduğu en önemli bileşendir. Bu nedenle Bölüm 2’de anlatılan süperkavitasyon rejiminin etkisiyle yüksek hızlara ulaşabilen süperkavite su altı araçları tasarımında belirlenmesi gereken geometrik, fiziksel ve performans özelliklerine kavitasyon zarfı özellikleri de dahil edilmelidir. Bu nedenle süperkavite su altı aracı tasarlanırken kavitasyon zarfı ile birlikte ele alınmalıdır. Sonuç olarak yüzey üzerindeki ıslak alan etkilerini minimize eden kavitasyon zarfının aracın etrafını sarabilecek kabiliyette olması süperkavite su altı aracının planlanan seyrini gerçekleştirebilmesi için önemlidir.

3.2. Geometrik Özellikleri

Süperkavite su altı aracının hidrodinamik form tipinin belirlenmesi ve süperkavitasyon rejimi içerisinde seyrini gerçekleştirebilmesi için kavitatör ve kontrol yüzeyi formlarının belirlenmesi gerekmektedir.

Süperkavite rejiminde su altı aracı üzerinde oluşacak toplam sürüklenme kuvvetinin büyük bir kısmının (~%8) kavitatör üzerinde oluşmasından dolayı kavitatör tipinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Diğer taraftan su altı aracının kavitasyon başlığı bölümünde, yeterli büyüklükte kavitasyon zarfı oluşturabilecek bir kavitatör olmalıdır. Kavitasyon zarfının süperkavite su altı aracını yeterli ölçülerde sarabilecek kabiliyette olmaması durumunda ıslak alan etkisi ve viskoz kuvvetler artacak, sürüklenme kuvveti çok yüksek değerlere ulaşacaktır. Bu durum süperkavite su altı aracının hedeflenen hız ve menzil değerlerine ulaşmasını imkansız hale getirecektir.

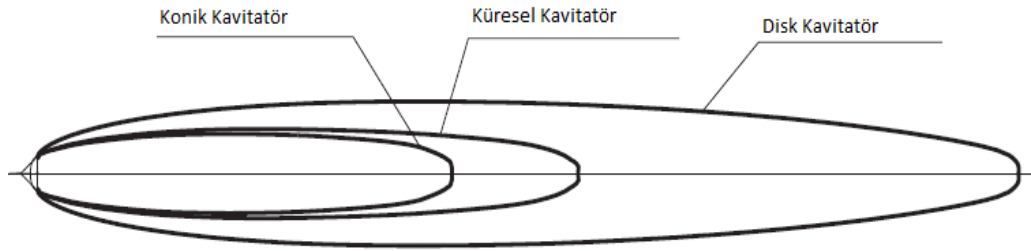
Literatürde disk, küre, konik ve ogiv gibi farklı kavitatör geometrilerine ait deneysel verilerin mevcut olması nedeniyle süperkavite su altı aracı tasarımında bu kavitatör

tipleri değerlendirilmiştir. Ayrıca su altı aracının yüksek hızlı seyri süresince kavitatör üzerinde oluşacak olan sürüklenme kuvvetinin doğru belirlenmesi amacıyla kavitatör tipinin akım ayrılma karakteristiğinin bilinmesi gerekmektedir. Akım ayrılmasının başladığı bölgenin belirlenememesinin veya yanlış belirlenmesinin sürüklenme kuvvetinin yanlış hesaplanmasına ve aktif kavitasyon çapını (kavitasyonun başladığı çap değeri) değiştirmesinden ötürü de istenen kavitasyon şeklinin elde edilememesine neden olmaktadır. Bu sebeplerden ötürü su altı aracının kavitatör geometrisi belirlenirken akım ayrılma karakteristiği bilinen kavitatör geometrileri üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Aşağıda sıralan maddelerden ötürü tasarlanan süperkavite su altı aracında disk kavitatör geometrisi kullanılmıştır.

- Deneysel veri havuzunun geniş olması,
- Kavitasyon zarfı parametrelerinin belirlenmesine olanak sağlayan ampirik ifadelerinin bulunması,
- Akım ayrılma karakteristiği en iyi bilinen kavitatör tipi olması,
- Süperkavite su altı aracını tamamen sarabilecek bir kavitasyon zarfı oluşturma kabiliyetinin diğer kavitatörlere kıyasla daha kolay olması.

Aynı çapa sahip farklı tipteki kavitatör geometrileri incelendiğinde Şekil 3.1’de görüldüğü gibi disk tipi kavitatörlerin oluşturduğu kavitasyon zarfının geometrik ölçüleri diğer kavitatörlere göre daha geniş ve dolayısıyla kavitasyon zarf hacimleri daha fazladır.

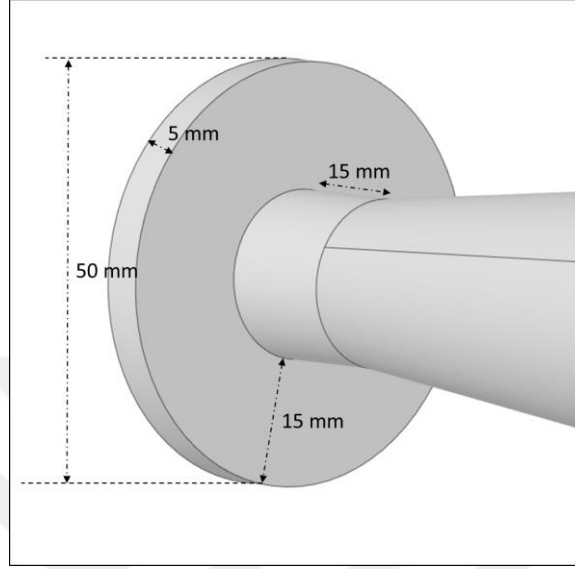


Şekil 3.1: Aynı kavitatör çapına sahip farklı kavitatör geometrileri için zarf profilleri.

Süperkavite su altı aracına yönelik yapılan çalışmalarda ilk olarak literatürdeki deneysel çalışmalara bağlı olarak elde edilen ampirik eşitliklerden yararlanılmıştır. İkinci aşamada belirlenen geometriler kullanılarak kavitasyon sayısı, sürüklenme kuvveti ve kavitasyon zarfının geometrik parametreleri gibi ifadelerin hesaplanması ile su altı aracının hidrodinamik katsayılarının belirlenmesi, statik stabilitesinin

incelenmesi ve performans özelliklerinin gözlemlenmesi için HAD analiz yöntemleri geliştirilmiş ve hesaplamalar yapılmıştır.

Şekil 3.2’de tez kapsamında oluşturulan süperkavite su altı aracının kavitatör geometrisi verilmiştir. Kavitatör geometrisinin çapı 50, genişliği 5 mm’dir.



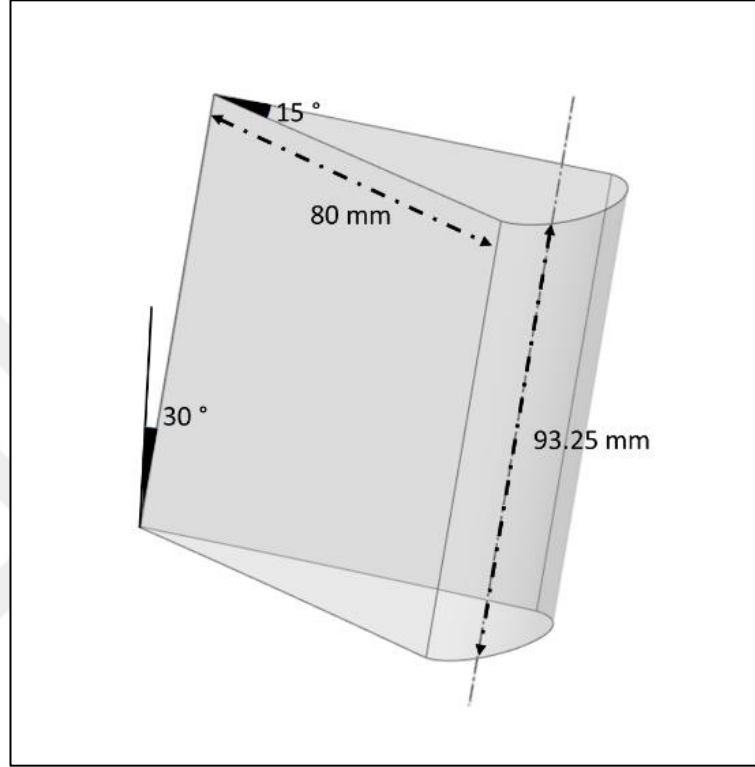
Şekil 3.2: Süperkavite su altı aracının kavitatör geometrisi.

Süperkavite su altı aracının kuyruk bölümünde aracın itki ihtiyacını karşılayacak roket motorları ve kontrol etkinliğini sağlayarak aracı kavitasyon zarfı içerisinde tutacak kontrol yüzeyleri bulunmaktadır.

Kontrol yüzeyleri su altı aracının seyri boyunca istenilen yönelim açılarında tutulmasını sağlayan geometrilerdir. Torpidonun yunuslama ve sapma düzleminde kontrolünün daha etkin sağlanması için de süperkavite su altı aracında “+” konfigürasyonda kontrol yüzeyi tasarımı kullanılmıştır. Süperkavite su altı araçlarının kontrol yüzeyleri etkinliği geleneksel torpidolardan farklılık göstermektedir. Gelişmiş bir kavitasyon zarfı değerlendirildiğinde, süperkavite su altı araçlarının kontrol yüzeylerinin bir kısmı kavitasyon zarfının içerisinde bir kısmı da zarfın dışarısında kaldığı görülmektedir. Kavitasyon zarfının iç kısmında su buharı, dış kısmında ise deniz suyu bulunmaktadır. Ek olarak zarfın iç bölgesindeki hız değeri dış bölgesindekinden düşük ve dağılımı düzensizdir. Bu iki nedenden ötürü kontrol yüzeylerinin zarf dışarısında kalan kısımlarını hidrodinamik yükler oluşturup su altı aracına kontrol etkinliği sağlarken, zarf içerisinde kalan kısmında herhangi bir hidrodinamik yük oluşmadığı için kontrol etkinliği sağlayamamaktadır. Süperkavite su altı araçları geleneksel su altı araçlarına göre çok yüksek hızlara ulaşabilmesi

nedeniyle istedikleri hidrodinamik kuvvet ve momentleri zarf dışında kalan kontrol yüzeylerinin ıslak alanlarından elde edebilirler.

Süperkavite su altı aracında kullanılacak kontrol yüzeyi geometrisi Şekil 3.3'te, süperkavite su altı aracı için tanımlanan geometrik özellikler ise Çizelge 3.1'de verilmiştir.

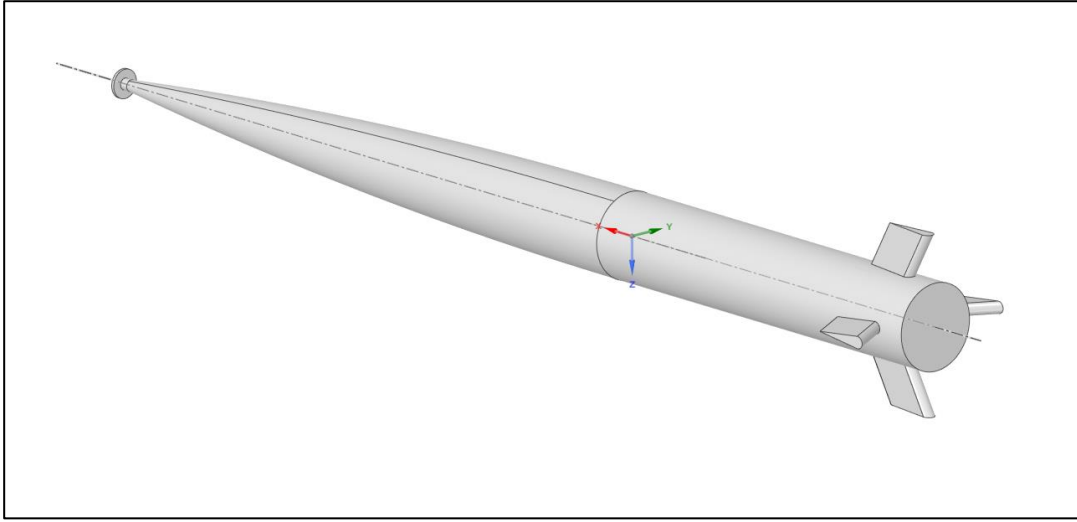


Şekil 3.3: Süperkavite su altı aracının kontrol yüzeyi geometrisi.

Çizelge 3.1: Süperkavite su altı aracı geometrik özellikleri.

Uzunluk (m)	2
Çap (m)	0.15
Kavitatör Çapı (m)	0.05
Hacim Merkezi (m)	-1.253
Eğiklik(Ok) Açısı (°)	30
Kontrol Yüzeyi Açısı (°)	15
Kontrol Yüzeyi Veter Uzunluğu (m)	0.09
Kontrol Yüzeyi Yüksekliği (m)	0.08
Kontrol Yüzeyi Kalınlığı (m)	0.04

Bu bölümde tanımlanan kavitatör bölümü, gövde bölümü ve kuyruk bölümünden oluşan 2 metre uzunluğundaki süperkavite su altı aracı Şekil 3.4'teki gibidir.

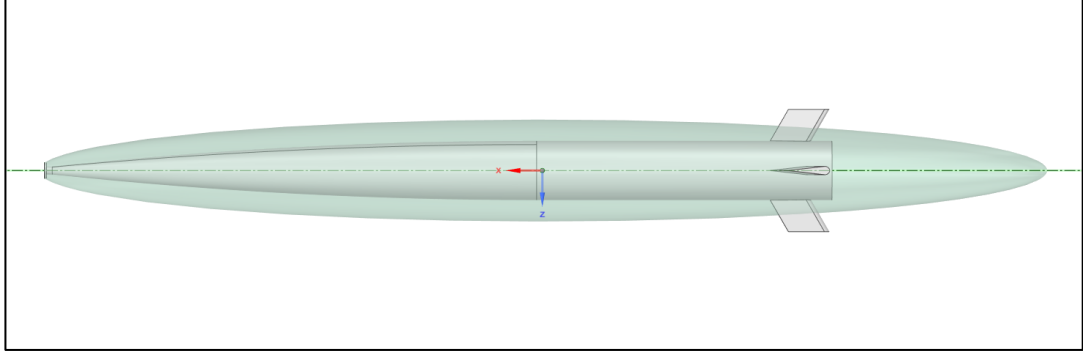


Şekil 3.4: Süperkavite su altı aracı geometrisi.

3.3. Performans Özellikleri

Süperkavite su altı aracının geometrisi tanımlandıktan sonra disk kavitatörler için elde edilen ampirik eşitliklerden yararlanılarak süperkavite su altı aracını sarabilecek bir kavitasyon zarfı tanımlanmalıdır. Kavitasyon zarfının üzerinde meydana gelen kinetik enerji dağılımı incelendiğinde, kavitasyon zarfının maksimum çapına ulaşmasının ardından kavitasyon baloncuklarının sahip olduğu kinetik enerjinin azalmaya başladığı ve bu enerji düşüşünün kavitasyon zarfında kapanmalara neden olarak akış rejimini değiştirdiği gözlemlenmiştir. Literatürdeki veriler incelendiğinde, süperkavite su altı aracının bahsedilen kinetik enerji düşüşünden kaynaklı bozuntular yaşamaması ve aracın kavitasyon baloncuklarının çökmeye neden olduğu bölgenin dışında kalması amacıyla kavitasyon zarfı boyunun aracın boyuna oranının minimum 1.25 katı olması gerekliliği öngörülmüştür. Aynı şekilde 150 mm çapa sahip süperkavite su altı aracını saracak ve aracın kontrol yüzeylerinin bir kısmını örtüp bir kısmını dışarıda bırakacak bir kavitasyon zarfı çapı belirlenmelidir. Literatürdeki deneysel çalışmalar ve ampirik eşitlikler dikkate alındığında maksimum kavitasyon zarfı çapının ~250 mm olması uygun görülmüştür [33]. Bu kapsamda 1 metre derinlikte 160 knot hızında seyir yapan bir süperkavite su altı aracı değerlendirildiğinde aracın sahip olacağı kavitasyon sayısı 0.0318 olarak belirlenmiştir. Garabedian tarafından ortaya çıkarılan birimsiz kavitasyon zarfı uzunluğu ve birimsiz kavitasyon zarfı çapı ifadeleri kullanılarak da kavitasyon zarfının uzunluğu ve çapı sırasıyla 2.55 ve 0.257 metre olarak elde edilmiştir [40]. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde süperkavite su altı aracını

sarabilecek kabiliyette bir kavitasyon zarfı oluşacağı görülmüştür. Şekil 3.5'te tez çalışması kapsamında kullanılacak olan süperkavite su altı aracı ve aracın etrafında oluşması beklenen kavitasyon zarfı gösterilmiştir.

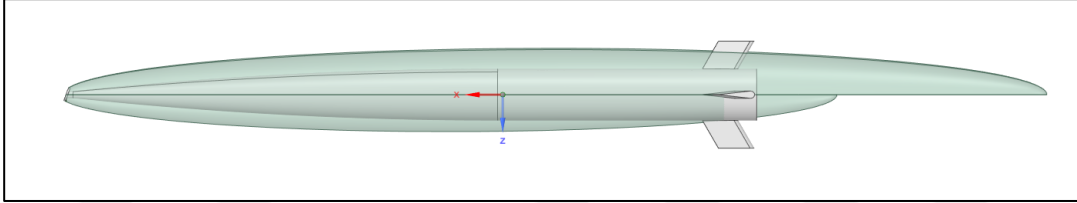


Şekil 3.5: Kullanılacak süperkavite su altı aracı etrafında oluşması beklenen, deneysel çalışmalardan elde edilmiş kavitasyon zarfı geometrisi [33].

Kavitasyon zarfı maksimum çapının ve uzunluğunun süperkavite su altı aracını tamamen saracak şekilde belirlenmemesinin nedeni aracın maruz kalacağı aracın dümenler üzerindeki kontrol etkinliğini kaybetmemektir. Kavitasyon zarfı uzunluğunu veya çapını arttırmak için ya kavitasyon sayısı düşürülmeli ya da kavitatör çapı arttırılmalıdır. Kavitasyon sayısının doğal yollarla düşürülmesi için operasyon hızının arttırılması dolayısıyla sürüklenme kuvvetinin artması ve dolayısıyla roket motorlu itki sistemlerinin kapasitelerinin arttırılması gerekmektedir. Yapay yollarla kavitasyon sayısının düşürülmesi içinse kavitasyon başlığı içerisinde yer alan özelleşmiş sistemin kabiliyetinin geliştirilmesi gerekmektedir. Ek olarak, kavitatör çapının arttırılması ise doğrudan sürüklenme kuvvetini ve aynı zamanda kavitasyon zarfı uzunluğunu arttırmaktadır. Bu nedenle kavitasyon zarfını olabildiğince minimum seviyelerde tutmak süperkavite su altı aracı tasarımında önemlidir. Optimum kavitasyon zarfı ölçüleri belirlenirken de yukarıda belirtilen ölçütler dikkate alınmalıdır.

Waid tarafından elde edilen ampirik eşitliklerden yararlanılarak katı cisim geometrisi ve kavitasyon zarfı ölçüleri belirlenen süperkavite su altı aracı için kullanılan disk kavitatörün sapma açısı limitleri belirlenmelidir[6]. Disk kavitatörün sapma açısı limitlerini belirlemek, süperkavite su altı aracının farklı seyir koşullarında üzerinde oluşacak ıslak alan etkilerinin minimize edilmesi ve aracın istenen rotada manevra yapabilmesi açısından önemlidir. Kavitatör geometrilerinin de süperkavite su altı aracı üzerinde bir kontrol etkinliğinin olması bu araçları geleneksel torpidolardan farklılaştırmaktadır. Gövde eksen takımı referans alınarak +Y eksenindeki döndürme düzlemi pozitif yön kabul edildiğinde Şekil 3.6'da +20 derece sapma açısına sahip bir

kavitatörün sahip olacağı kavitasyon zarfı gösterilmiştir. Ampirik denklemler kullanılarak yapılan ilk çalışma kapsamında +20 derece sapma açısında süperkavite su altı aracının bir kısmının kavitasyon zarfı dışarısında kaldığı ve bu alanın ekstra sürüklemeye kuvvetine neden olacağı görülmektedir. İlk tasarım aşamasında olabildiğince kavitasyon zarfı içerisinde bırakılmak istenen süperkavite su altı aracı için kavitatör sapma açısı limitleri ± 20 derece olacak şekilde belirlenmiştir. Bu limitin süperkavite su altı aracı üzerine etkisi ilerleyen başlıklarda incelenecektir.



Şekil 3.6: Pozitif kavitatör yunuslama açısına sahip süperkavite su altı aracının oluşması beklenen kavitasyon zarfı geometrisi [6].

Süperkavite su altı aracı geometrisinin, aracı saracak kavitasyon zarfı özelliklerinin ve kavitatör geometrisi sapma açısı limitlerinin belirlenmesinin ardından 1 metre derinlikte 160 knot hızında süperkavite su altı aracı için oluşması beklenen sürüklemeye kuvveti dolayısıyla roket motorlu itki sistemlerinin üretmesi gereken itki kuvveti belirlenmelidir. Literatürde yer alan ampirik denklemler kavitasyon zarfının su altı aracını tamamen sardığı durumlarda kavitatör tarafından oluşacak sürüklemeye kuvvetinin belirlenmesinde geçerlidir. Bu nedenle ampirik denklemler kullanılarak hesaplanacak sürüklemeye kuvveti, süperkavite su altı aracının kavitatör dışındaki ıslak alanlar kaynaklı ortaya çıkması beklenen sürüklemeye kuvvetini tam yansıtamayacaktır. Bu nedenle sürüklemeye kuvvetinin doğru hesaplanabilmesi için kontrol yüzeylerinin maruz kalacağı ıslak alanların da dikkate alınması gerekmektedir. Bu bölümde roket motorlarının üretmesi gereken itki kuvvetinin belirlenmesi kapsamında bir başlangıç değeri belirlemek amacıyla kontrol yüzeyleri kaynaklı oluşan sürüklemeye kuvvetinin kavitatör kaynaklı oluşan sürüklemeye kuvvetine oranı 0.2 olarak belirlenmiştir. Su yoğunluğu 1000 kg/m^3 için Oversmith tarafından belirlenen ampirik eşitlik kullanılarak kontrol yüzeylerinin de dahil edildiği durumda oluşması beklenen sürüklemeye kuvveti 6710 N çıkmaktadır [35]. Sonuç olarak roket motorlu itki sistemlerinin operasyon boyunca anlık minimum 6710 N itki sağlaması gerekmektedir.

Tez kapsamında roket motorlu itki sistemlerinin operasyon koşullarına bağlı üretmeleri gereken itki miktarları HAD analizleri yapılarak incelenmiştir. Ek olarak yapılan bu çalışmada roket motorlu itki sistemlerinin ihtiyaç duyulacak bütün itki kuvvetlerini karşılayabildiği varsayılmış, bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalarda yapay kavitasyon rejimine yer verilmemiştir. Bu sayede ihtiyaç duyulan kavitasyon zarfı ölçüleri doğal kavitasyon etkisinde elde edilmiştir. Böyle bir yöntem izlenmesinin nedeni yapılacak olan HAD analizi çalışmalarında istenilen süperkavitasyon rejimini daha hızlı bir şekilde çözümlemek ve bu sayede zamandan kazanç sağlamaktır. Tez çalışması kapsamında yapay kavitasyonun yer almaması yalnızca roket motorlu itki sistemini etkilemektedir. Çünkü normal şartlarda doğal kavitasyon kullanılarak istenilen zarfın elde edilememesinin nedeni roket motorlu itki sistemlerinin yetersiz kalmasıdır. Buna bağlı olarak kavitasyon başlığından kavitasyon zarfına beslenecek gaz itki sistemini destekleyecek ve yalnızca sistem üzerindeki toplam itki kuvvetinin azaltılmasında etkili olacaktır. Ancak, süperkavitasyon etkisinde hareket edecek süperkavite su altı aracının hidrodinamik karakteristiğini değiştirmeyecektir.

3.4. Fiziksel Özellikleri

Temelde süperkavite su altı aracının seyri sırasında sephiye kaynaklı yönelim durumlarının ve sephiye dengelemek amaçlı kontrol yüzeyi sapması etkilerinin aracın manevra kabiliyetlerini sınırlamaması adına olabildiğince az olması gerekliliği öngörülmüştür. Ancak, kavitasyon zarfının ölçülerine bağlı olarak uygulanacak hidrostatik kaldırma kuvvetinin sürekli olarak değişmesinden, aynı zamanda kavitasyon zarfı hacminin süperkavite su altı aracı hacminden oldukça yüksek olmasından ve roket motorunun yanmasıyla birlikte aracın ağırlığında meydana gelecek azalmalardan ötürü nötr sephiye yaklaşımı her durumda geçerli olmayacaktır.

Süperkavite su altı araçları için suyun oluşturacağı hidrostatik kaldırma kuvveti, süperkavitasyon rejiminin etkisiyle belirli bir olgunluğa gelmiş kavitasyon zarfı hacmi referans alınarak hesaplanmalıdır. Bu kapsamda ampirik ifadeler kullanılarak tasarlanan süperkavite su altı aracının 0.0318 kavitasyon sayısında sahip olduğu 2.55 metre uzunluğundaki ve 0.257 metre çapındaki kavitasyon zarfının hacmi yaklaşık 90 L çıkmaktadır. Bu hesaplamalar yapılırken kontrol yüzeyi kaynaklı oluşacak olan hacimsel etkilenmeler hesaba katılmamıştır. Kontrol yüzeylerinin etkileri sonucu

oluşacak yeni kavitasyon zarfı ve bu kavitasyon zarfının hacmi ile ilgili literatürde yeterli verinin bulunmamasından ötürü bu isterler ileriki bölümlerde HAD analizleri kullanılarak güncellenecektir. Literatür verileri kullanılarak yapılan ilk tasarım çalışması kapsamında süperkavite su altı aracının kavitasyon zarfının üretebileceği maksimum hidrostatik kaldırma kuvveti 882.9 N olarak belirlenmiştir.

Süperkavite su altı aracı için ağırlık yapılandırması gerçekleştirildiğinde aracın yakıt ağırlığı ve diğer alt sistemlerinin ağırlığı toplamda 63 kg olacak şekilde belirlenmiştir. Süperkavite su altı aracının etrafında herhangi bir kavitasyon zarfı oluşmadığı durumda sahip olacağı hidrostatik kaldırma kuvveti aracın kendi hacmine (26 L) uygulanacak ve üzerindeki kaldırma kütlesi 26 kg ($0.026 \text{ m}^3 \times 1000 \text{ kg/m}^3$) olacaktır. Buna göre süperkavite su altı aracı etrafında kavitasyon zarfı oluştuğu durumda 27 kg'lık (pozitif sephiye), oluşmadığı durumda ise 37 kg'lık (negatif sephiye) bir sephiye farklı oluşacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken kısım süperkavite su altı aracının kavitasyon zarfı oluşturamadığı durumda 37 kg'lık bir sephiye farkının ortaya çıkmasıdır. Süperkavite su altı aracının seyri esnasında herhangi bir bozuntuya maruz kalması anında etrafındaki kavitasyon zarfı kaybolacak ve maksimum 37 kg'lık bir sephiye farklı ortaya çıkacaktır. Bu süreçte kontrol yüzeylerinin aracı yörüngesinden sapmasını engelleyebilecek bir kontrol etkinliğine sahip olması gerekmektedir. Ayrıca, hesaplamalar yapılırken roket motorların yanması sonucu oluşacak kütle kaybının da dikkate alınması gerekmektedir. Çizelge 3.2'de Süperkavite su altı aracının fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2: Süperkavite su altı aracı fiziksel özellikleri.

Kavitasyon zarfı hacmi	78 L
Süperkavite su altı aracının hacmi	26 L
Kavitasyon zarfı ağırlığı	0.04 kg
Süperkavite su altı aracının ağırlığı	63 kg
Kavitasyon zarfı etkinken oluşan sephiye farkı	16.5 kg (yukarı yönlü)
Kavitasyon zarfı yokken oluşan sephiye farkı	37 kg (aşağı yönlü)
Kavitasyon zarfı hacim merkezi (burundan)	1289.6 mm
Süperkavite su altı aracı ağırlık merkezi (burundan)	1078.8 mm
Süperkavite su altı aracı hacim merkezi (burundan)	1278 mm

Normal şartlarda süperkavite su altı aracının seyri esnasında roket motorunun oluşturacağı kütle yanmaya bağlı olarak azalacaktır. Ayrıca, kütle değişimine bağlı olarak da ağırlık merkezi aracın burun bölümüne doğru ilerleyecektir. Tez çalışması kapsamında aracın roket motorlarının yanması sonucunda oluşacak ağırlık azalması ve buna bağlı olarak ağırlık merkezindeki yer değiştirme yok sayılmıştır.





4. TEMEL HAREKET DENKLEMLERİNİN VE ELEMANLARININ TANITILMASI

Süperkavite su altı araçlarının süperkavitasyon rejimi etkisindeki hareketlerini incelemek için ilk olarak geleneksel su altı araçlarında olduğu gibi temel hareket denklemlerinin ve elemanlarının tanımlanması gerekmektedir. Bu kapsamda süperkavite su altı araçları için gövde ve dünya eksen takımı olmak üzere hidrodinamik eksen takımları tanımlanmıştır. Sonrasında bu eksen takımları üzerinde yer alan herhangi bir vektörün eksenler arasındaki geçişleri dönüşüm matrisleri kullanılarak tanımlanmıştır. Eksen takımları ve eksen takımları arasındaki dönüşümlerin tanımlanmasının ardından, aracın kinematik denklemlerinden yararlanılarak süperkavite bir su altı aracının katı cisim dinamiği incelenmiştir. Son olarak tez kapsamında kabul edilen varsayımlara değinilmiştir.

4.1. Hidrodinamik Eksen Takımları

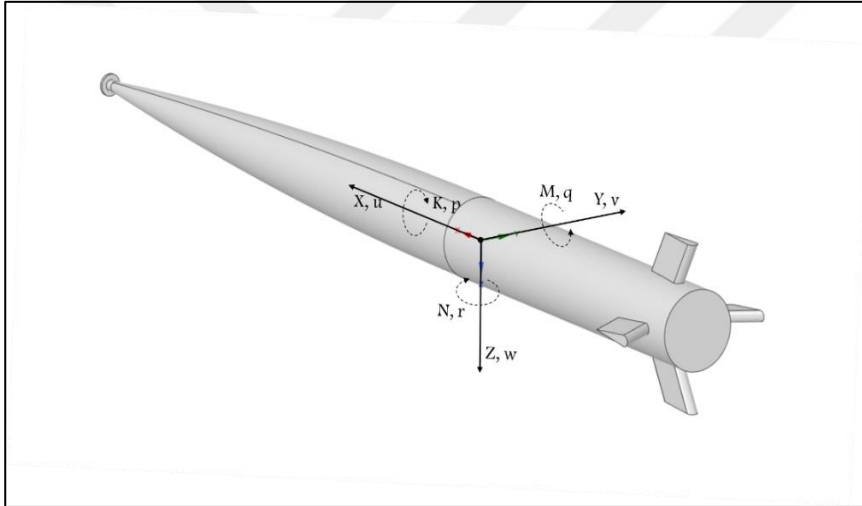
Su altında koordinat eksenini tanımlanması yapılırken kullanılan yöntem aerodinamik eksen takımlarını oluştururken kullanılan yöntem ile benzerdir. Su üstü veya su altı fark etmeksizin iki eksen takımında da 6 serbestlik derecesinde bir sistem değerlendirilmektedir. Hidrodinamik eksen takımları su altındaki seyir dinamiği denklemlerinin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Süperkavite su altı araçlarının seyir dinamiğinin incelenmesi kapsamında tanımlanacak hidrodinamik eksen takımları geleneksel su altı araçları için tanımlanan eksen takımlarına benzetmekle birlikte süperkavitasyon rejiminin etkisiyle ortaya çıkan kavitasyon zarfının etkisinden ötürü gövde ve dünya eksen takımına ek olarak kavitasyon zarfı eksen takımını da içermektedir.

4.1.1. Gövde eksen takımı

Süperkavite su altı aracının ağırlık merkezi gövde eksen takımının koordinat merkezi olacak şekilde referans alınarak oluşturulan, kartezyen koordinat sisteminde de alan bir eksen takımındır. Tez kapsamında yapılacak hesaplamaların bütününde bu eksen

takımı referans alınmıştır. Gövde eksen takımı X, Y ve Z olmak üzere üç eksenlidir. Gövde eksen, X eksen koordinat merkezinden aracın burnuna doğru, Y eksen koordinat merkezinden aracın sağına doğru ve Z eksen de aracın altına doğru (yerçekimi yönünde) olacak şekilde tanımlanmıştır [50].

Gövde eksen takımı süperkavite su altı aracının istenilen bir koordinatına sabitlenebilmektedir. Bu kapsamda genel olarak hacim merkezi veya ağırlık merkezi referans noktası olarak tercih edilmektedir. Gövde eksen takımının sabitlendiği noktanın ağırlık merkezi dışında bir nokta olması durumunda elde edilen sonuçların ağırlık merkezi referans alınacak şekilde güncellenmesi gerekmektedir. Bunun nedeni atalet momentlerinin ağırlık merkezinde hesaplanmasıdır. Tez çalışması kapsamında gövde eksen takımının sabitlendiği nokta ağırlık merkezi olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 4.1’de süperkavite su altı aracının hidrodinamik denklem takımı verilmiştir.



Şekil 4.1: Süperkavite su altı aracının hidrodinamik denklem takımı.

4.1.2. Dünya eksen takımı

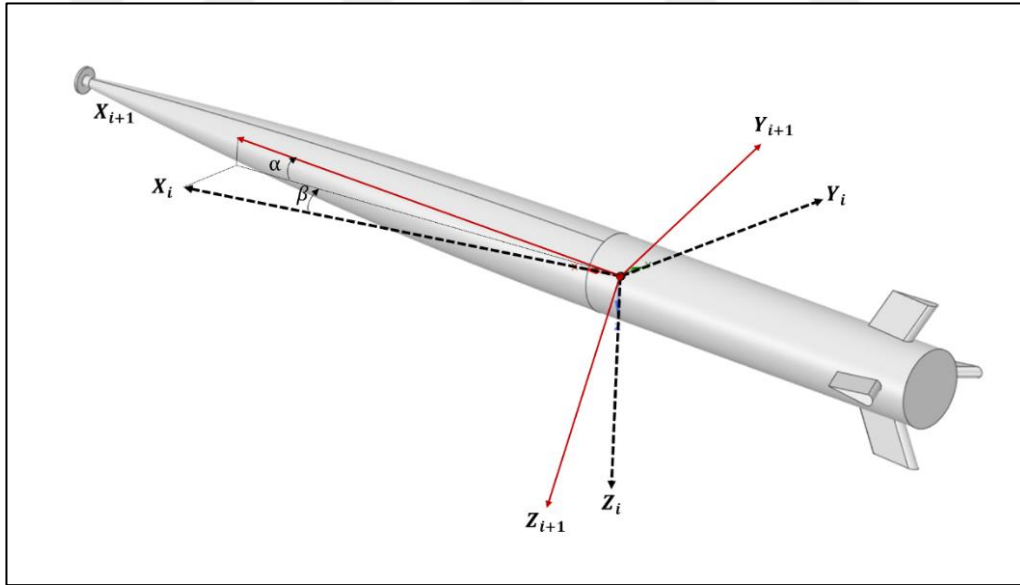
Dünyanın merkezi referans alınacak şekilde oluşturulmuş sabit bir eksen takımıdır. Dünya eksen takımı ifade edilirken kartezyen koordinatlar kullanılmaktadır. Dünyanın merkezini Z eksenini ifade etmektedir. İlerleme yönüne göre de X ve Y eksenleri gövdenin ağırlık merkezinden geçecek ve birbirlerine ortogonal olacak şekilde ifade edilmektedir.

4.2. Süperkavite Su Altı Aracının Gövde Eksen Takımındaki Yerleşimi

Su altı aracının gövde eksen takımı üzerindeki eksenler arasında yer değişimi hareketlerini ifade etmek için hücum açısı, kayma açısı ve yuvarlanma açısı olmak

üzere Euler açıları kullanılmaktadır. Bölüm 4.7.2'deki varsayımlar referans alınacak şekilde süperkavite su altı araçları incelendiğinde, araç üzerinde herhangi bir yuvarlanma hareketi etkin olmamasından ötürü tez kapsamında yuvarlanma açısının gövde eksen takımı içerisindeki dönüşümü ele alınmamıştır. Yalnızca hücum ve kayma açılara bağlı olarak su altı aracının gövde eksen takımı üzerindeki konumlandırılması incelenmiştir. Bu kapsamda üzerinde hücum açısı ve sapma açısı olan bir su altı aracının gövde eksen takımındaki dönüşüm Şekil 4.2'de ve bu dönüşümü ifade eden dönüşüm matrisi de denklem 4.1'de ifade edilmiştir. Dönüşüm yapılırken süperkavite su altı aracının önce Z eksen etrafında β° kadarlık bir kayma açısı yaptığı sonrasında ise Y eksen etrafında α° kadarlık bir hücum açısı yaptığı varsayılmıştır.

Dönüşüm gerçekleştirilirken üzerinde herhangi bir hücum veya kayma açısı bulunmayan gövde eksen "i" alt indisi kullanılarak, üzerinde hücum ve sapma açısı bulunan yeni gövde eksen ise "i+1" alt indisi kullanılarak ifade edilmiştir. Şekil 4.2'de süperkavite su altı aracının hücum ve kayma açısına bağlı olarak eksen dönüşümü verilmiştir.



Şekil 4.2: Süperkavite su altı aracının α - β eksen dönüşümü.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{i+1} &= \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i \\
 &= \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta & -\sin\alpha \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ \sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

4.3. Dünya Eksen Takımından Gövde Eksen Takımına Geçiş

Dünya eksen takımında ifade edilen herhangi bir vektör Euler açıları kullanılarak gövde eksen takımı üzerinde ifade edilebilir. Bir vektörün gövde eksen takımı üzerinde ifade edilebilmesi için vektörün dünya eksenindeki sapma düzlemi ile yaptığı açı ψ , yunuslama düzlemi ile yaptığı açı θ ve yuvarlanma düzlemi ile yaptığı açı ϕ bilinmelidir. Euler açıları (ϕ, θ, ψ) olarak nitelendirilen bu açılar sayesinde vektör gövde eksen takımında ifade edilebilir. Dünya eksen takımından gövde eksen takımına dönüşüm yapılırken ifade edilecek vektör ilk olarak XY düzleminde ψ açısı kadar, sonrasında XZ düzleminde θ açısı kadar ve son olarak da YZ düzleminde ϕ açısı kadar döndürülür [51].

Şekil 4.3'teki gibi Dünya eksen takımı üzerinde $X_E i_E + Y_E j_E + Z_E k_E$ şeklinde ifade edilen bir P vektörünün sapma düzlemindeki dönüşümünü ifade eden matris denklem 4.2'deki gibi olmalıdır.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_E \quad (4.2)$$

Sapma düzleminde ψ açısı kadar döndürülmüş P vektörünün yunuslama düzlemindeki dönüşümünü ifade eden matris denklem 4.3'te verilmiştir.

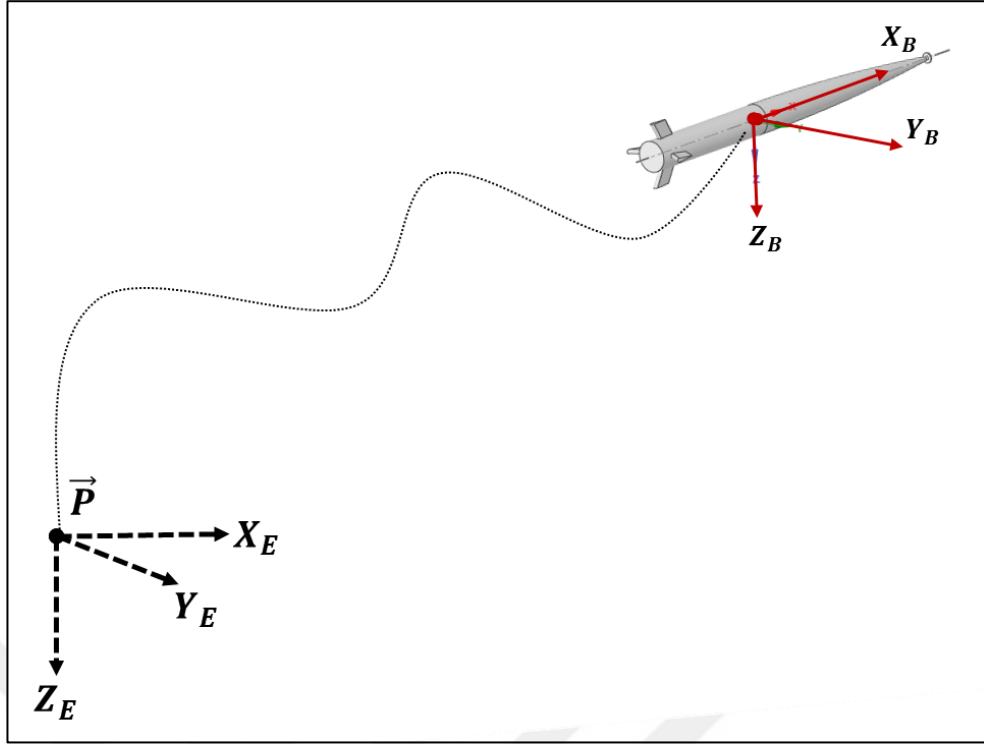
$$\begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

θ açısı kadar yunuslama düzleminde döndürülen aynı vektörün yuvarlanma düzlemindeki dönüşümünü ifade eden matris de denklem 4.4'te verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} X''' \\ Y''' \\ Z''' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Sırasıyla ψ, θ, ϕ dönüşümleri yapılarak elde edilen Dünya eksen takımından gövde eksen takımına geçişi ifade eden dönüşüm matrisi denklem 4.5'teki gibidir [51].

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \cos\psi\sin\theta\sin\phi - \cos\phi\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\psi\cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \cos\psi\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_E \quad (4.5)$$

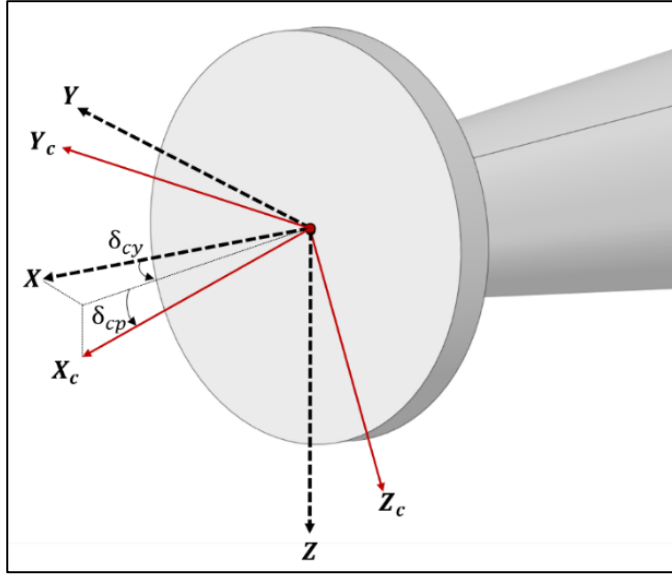


Şekil 4.3: Gövde ve dünya eksen takımlarının tanıtılması.

4.4. Kavitatör Dönüşümü

Süperkavite su altı araçları geleneksel su altı araçlarından farklı olarak kavitatör adı verilen kavitasyon üretici geometriye sahiptirler. Bu tez kapsamında kavitatör üzerinde oluşan hidrodinamik parametrelerin anlaşılması bakımından kavitatörün gövde üzerindeki konumlandırılmasını ve dönüşümünü ifade eden gövde eksen takımından kavitatör eksenine dönüşüm ele alınmıştır. Bu amaçla yunuslama ve sapma düzlemlerinde hareket edebilen iki eksenli bir kavitatör değerlendirilmiştir. Şekil 4.4'te de görüldüğü üzere kavitatörün yunuslama düzleminde yaptığı açı δ_{cp} , sapma düzleminde yaptığı açı ise δ_{cy} olacak şekilde ifade edilmiştir.

İki eksenli bir kavitatörün, gövde ekseninden kavitatör eksenine dönüşümünü ifade eden dönüşüm matrisi denklem 4.6'daki gibidir. Gövde ekseninden sırasıyla sapma düzleminde δ_{cy} açısı kadar ve yunuslama düzlemlerinde δ_{cp} açısı kadar dönüşüm yapılarak kavitatör eksenine geçilmiştir. Kavitatör ekseninden gövde eksen takımına geçilmek istenirse dönüşüm matrislerinin ortogonal olmasından ötürü matrisin tersine almak yerine transpozese alınabilir.



Şekil 4.4: Kavitatör eksen dönüşümü.

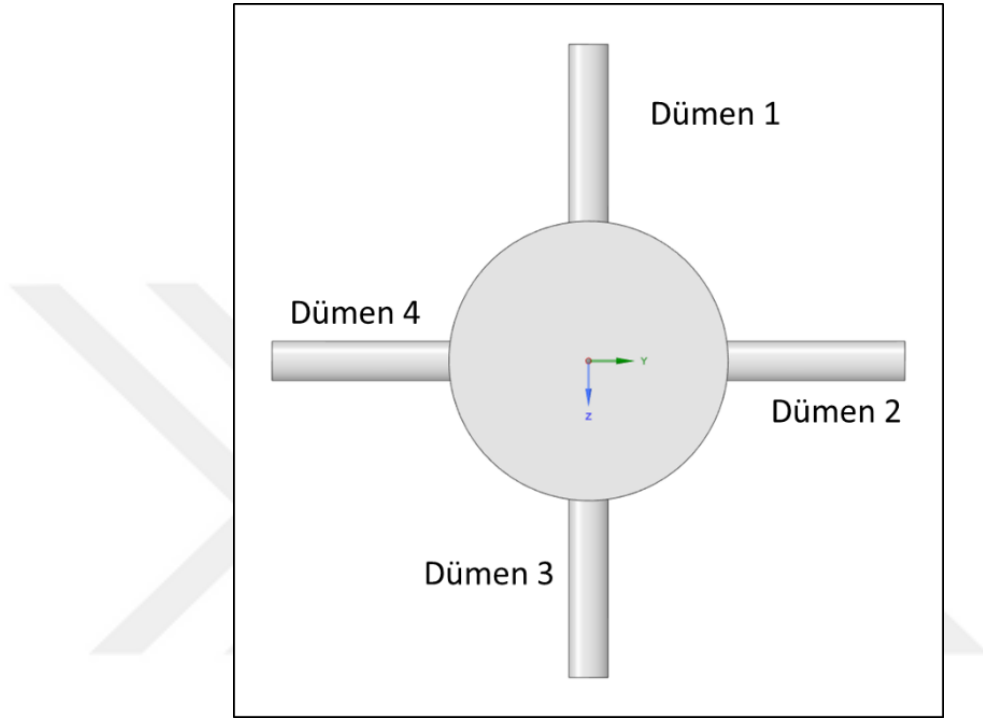
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_c = \begin{bmatrix} \cos\delta_{cp}\cos\delta_{cy} & \cos\delta_{cp}\sin\delta_{cy} & -\sin\delta_{cp} \\ -\sin\delta_{cy} & \cos\delta_{cy} & 0 \\ \sin\delta_{cp}\cos\delta_{cy} & \sin\delta_{cp}\sin\delta_{cy} & \cos\delta_{cp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B \quad (4.6)$$

4.5. Dümen Dönüşümü

Süperkavite su altı araçlarında aracı seyri boyunca 3 ekseninde de kontrol edebilecek kontrol yüzeyleri bulunmaktadır. Kavitatörden ve dümenlerden oluşan bu kontrol yüzeyleri üzerinde meydana gelen hidrodinamik kuvvetlerin etkisiyle süperkavite su altı aracı, seyrini kavitasyon zarfı içerisinde sürdürebilecek kabiliyete sahip olur.

Tez kapsamında kullanılacak olan süperkavite su altı aracında kavitasyon zarfının dışarısında kalacak ıslak alan hacmini azaltmak amacıyla sabit kanat ve kanatçık geometrileri kullanılmamıştır. Sistemin dinamik dengesi yalnızca kavitatör ve dümenler aracılığıyla sağlanmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda süperkavite su aracında 5 cm çapında bir disk kavitatör ve “+” konfigürasyonda 4 adet dümen kullanılmıştır. Bu dümenler aracın kış bölümlünde yer almakla birlikte gövde eksenine ile arasında belli bir ok açısına sahiptir. Dümenler üzerinde bir ok açısının bulunmasının nedeni yüksek hızlı akışın dümenler üzerinde oluşturacağı basınç kuvvetini ve kavitasyon etkilerini minimuma indirmektir. Bu nedenle dümenlerin serbest akışa ilk maruz kalacağı durma noktaları sivri bir yapıya sahip olmakla birlikte kış kısmına gidildikçe dümen geometrisi genişlemektedir. Sahip oldukları kuyruk bölümü tasarımı ile süperkavite su altı araçları geleneksel su altı araçlarından farklılaşmaktadır.

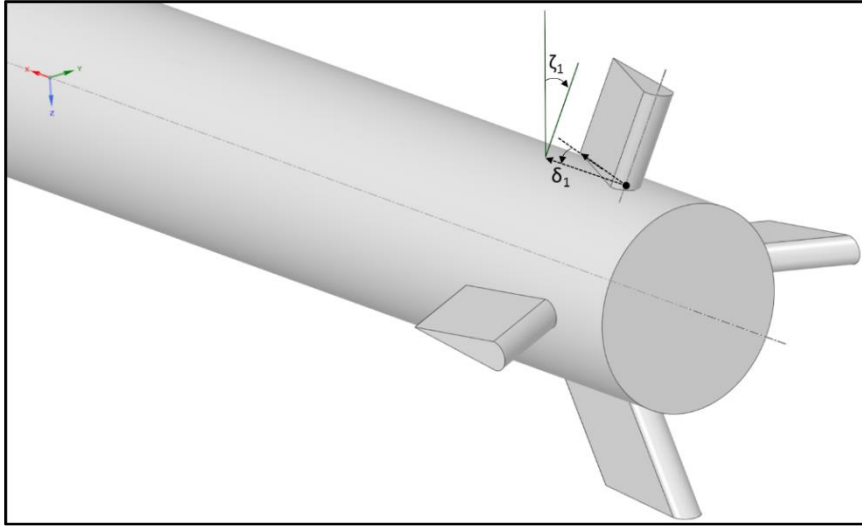
Şekil 4.5'te süperkavite su altı aracında kullanılan “+” dümen konfigürasyonu verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere aracın dümenleri -Z yönündeki dümenden başlayacak ve saat yönünde devam edecek şekilde dümen 1, dümen 2, dümen 3 ve dümen 4 olarak isimlendirilmiştir. Ek olarak dümen 1 ve dümen 3 süperkavite su altı aracının amudi dümenlerini, dümen 2 ve dümen 4 ise ufki dümenlerini oluşturmaktadır.



Şekil 4.5: + dümen konfigürasyonuna sahip süperkavite su altı aracının arkadan gösterimi.

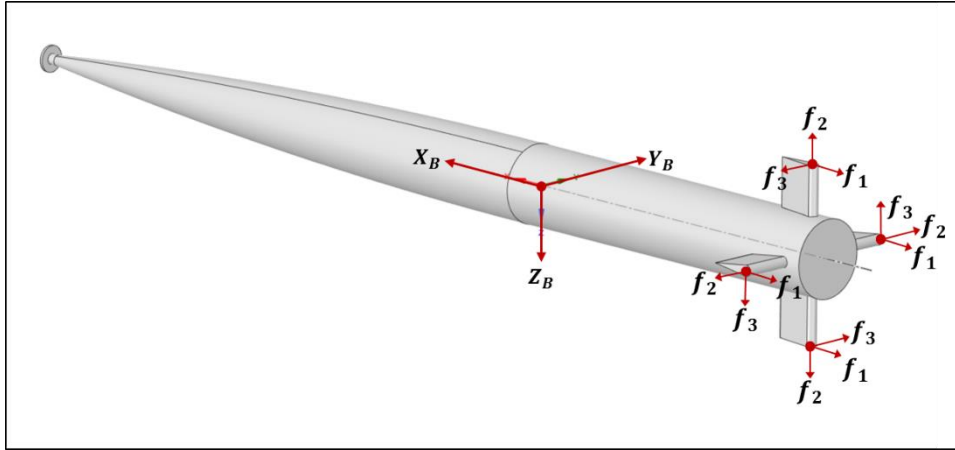
Tez kapsamında kullanılacak olan dümen geometrilerinin ok açısı sabit ve 30 derece olacak şekilde belirlenmiştir (Bknz. Bölüm 3). Sapma açıları ise sistemin sahip olduğu kontrol tahrik sistemi sayesinde kontrol edilebilir kabiliyettedir. Süperkavite su altı aracının kontrol yüzeylerinin sapma açısı limitleri HAD analizleri yapılarak veri havuzunun oluşturulması çalışması kapsamında incelenecektir. Şekil 4.6’da Dümen 1 geometrisi üzerinde sistemin sahip olabileceği ok açısı (ζ) ve sapma açısı (δ) gösterilmiştir. Gövde eksen takımından dümen eksen takımına geçişte bu gösterimden yararlanılacaktır.

Bu çalışmada herhangi bir eksenden gövde eksenine geçilirken Euler dönüşümünde ele alınan prensip kullanılmıştır. Dümen dönüşümü kapsamında oluşturulan dönüşüm matrisleri gövde eksen takımından dümen eksenine olacak şekilde yazılmıştır. Bu nedenle gövde eksen takımından dümen eksenine geçiş yapılırken önce ζ yönünde, sonrasında δ yönünde dönüşüm yapılmıştır.



Şekil 4.6: Dümen ok açısı ve sapma açısının tanıtılması.

Şekil 4.7’de süperkavite su altı aracı üzerinde gövde eksen takımı ve dümen eksenleri gösterilmiştir. Dümen eksenlerinin merkezi dümenlerin döndürme eksenleri merkezi olacak şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 4.7’de eksenlerin iç içe geçmemesi adına eksen merkezleri döndürme eksenlerinin merkezinde gösterilmemiştir. Dümen eksenleri oluşturulurken her dümen ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Dümen eksenleri, f_1 eksenini koordinat merkezinden aracın kış kısmına doğru, f_2 eksenini dümenlerin dışına doğru ve f_3 eksenini de f_1 ve f_2 eksenine ortogonal olacak şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 4.7: Süperkavite su altı aracının dümen dönüşümleri.

Şekil 4.7’deki gibi gövde eksen takımı üzerinde $X_B i_B + Y_B j_B + Z_B k_B$ şeklinde ifade edilen bir vektörün ζ_1 yönündeki dönüşümünü ifade eden matris denklem 4.7’deki gibidir.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\zeta_1 & 0 & \sin\zeta_1 \\ -\sin\zeta_1 & 0 & -\cos\zeta_1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B \quad (4.7)$$

δ_1 açısı kadar dümen 1 sapma düzleminde döndürülen aynı vektörün dümen sapma düzlemindeki dönüşümünü ifade eden matris de denklem 4.8’de verilmiştir.

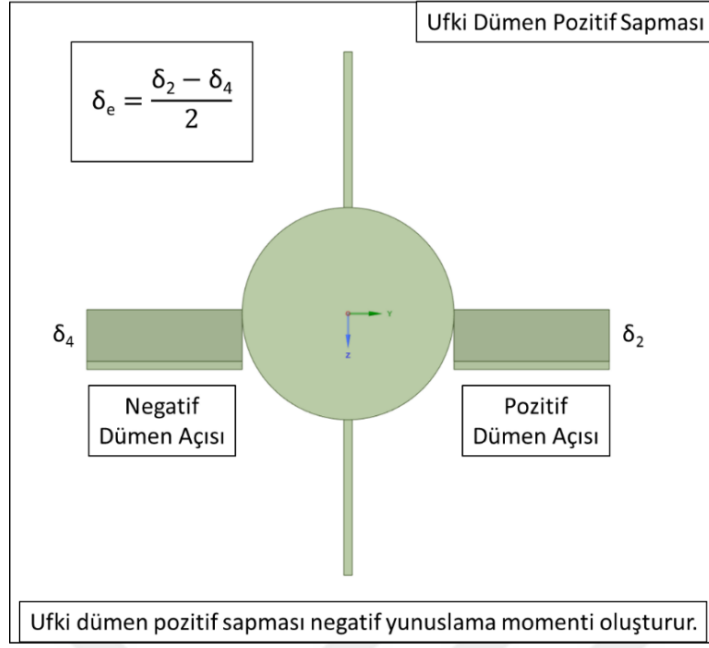
$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}_{d1} = \begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_1 & 0 & -\sin\delta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\delta_1 & 0 & \cos\delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Sırasıyla ζ_1 ve δ_1 açılara sahip Dümen 1, ζ_2 ve δ_2 açılara sahip Dümen 2, ζ_3 ve δ_3 açılara sahip Dümen 3 ve ζ_4 ve δ_4 açılara sahip Dümen 4 geometrileri için elde edilen gövde eksen takımından dümen eksen takımlarına geçişi ifade eden dönüşüm matrisleri denklem 4.9’daki gibidir.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}_{d1} &= \begin{bmatrix} -\cos\delta_1\cos\zeta_1 & \sin\delta_1 & \cos\delta_1\sin\zeta_1 \\ -\sin\zeta_1 & 0 & -\cos\zeta_1 \\ -\sin\delta_1\cos\zeta_1 & -\cos\delta_1 & \sin\delta_1\sin\zeta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B \\ \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}_{d2} &= \begin{bmatrix} -\cos\delta_2\cos\zeta_2 & -\cos\delta_2\sin\zeta_2 & \sin\delta_2 \\ -\sin\zeta_2 & \cos\zeta_2 & 0 \\ -\sin\delta_2\cos\zeta_2 & -\sin\delta_2\sin\zeta_2 & -\cos\delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B \\ \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}_{d3} &= \begin{bmatrix} -\cos\delta_3\cos\zeta_3 & -\sin\delta_3 & -\cos\delta_3\sin\zeta_3 \\ -\sin\zeta_3 & 0 & \cos\zeta_3 \\ -\sin\delta_3\cos\zeta_3 & \cos\delta_3 & -\sin\delta_3\sin\zeta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B \\ \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}_{d4} &= \begin{bmatrix} -\cos\delta_4\cos\zeta_4 & \cos\delta_4\sin\zeta_4 & -\sin\delta_4 \\ -\sin\zeta_4 & \cos\zeta_4 & 0 \\ -\sin\delta_4\cos\zeta_4 & \sin\delta_4\sin\zeta_4 & \cos\delta_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B \end{aligned} \quad (4.9)$$

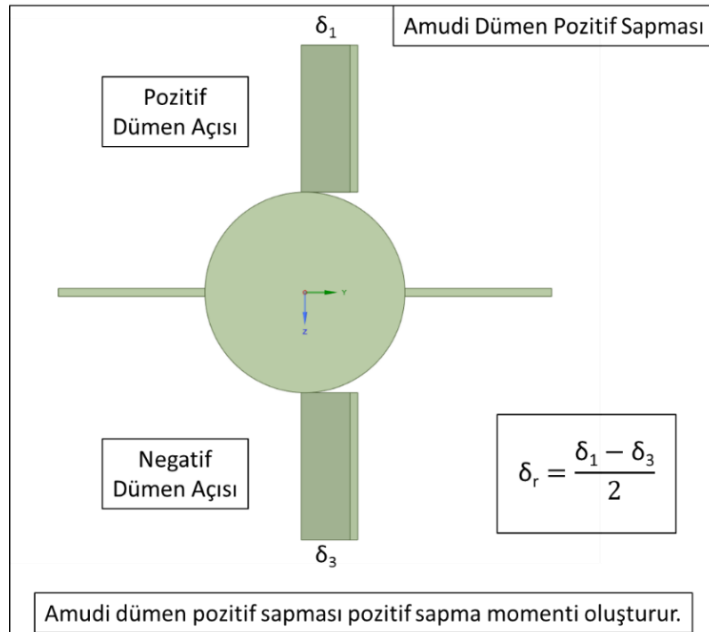
Süperkavite su altı aracının dümen isimlendirmesi, kabiliyetleri ve eksen dönüşümleriyle ilgili bilgilendirmenin tamamlanmasıyla birlikte dümenlerin yunuslama düzlemindeki, sapma düzlemindeki ve yuvarlanma düzlemindeki sapmaları ile buna bağlı olarak oluşturdukları momentler ve bu momentlerin yönleri verilmiştir.

İlk olarak aracın yunuslama düzlemindeki manevrasına ait dümen konumlandırılması Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.8’de Dümen 2 pozitif, Dümen 4 ise negatif dümen sapma açısına sahip olacak şekilde konumlandırılmıştır. Dümenlerin işareti belirlenirken de her dümen için Şekil 4.7’deki o dümen eksenine ait $+f_2$ yönü referans alınmıştır. Buna bağlı olarak şekildeki sistemin üzerindeki dümen sapması ufki dümen pozitif sapması olarak nitelendirilmiş ve sistemin üzerindeki toplam sapma açısı da δ_e olarak ifade edilmiştir. Bu sayede dümenler üzerinde oluşturulan ufki dümen pozitif sapması negatif yunuslama momenti oluşturmaktadır.



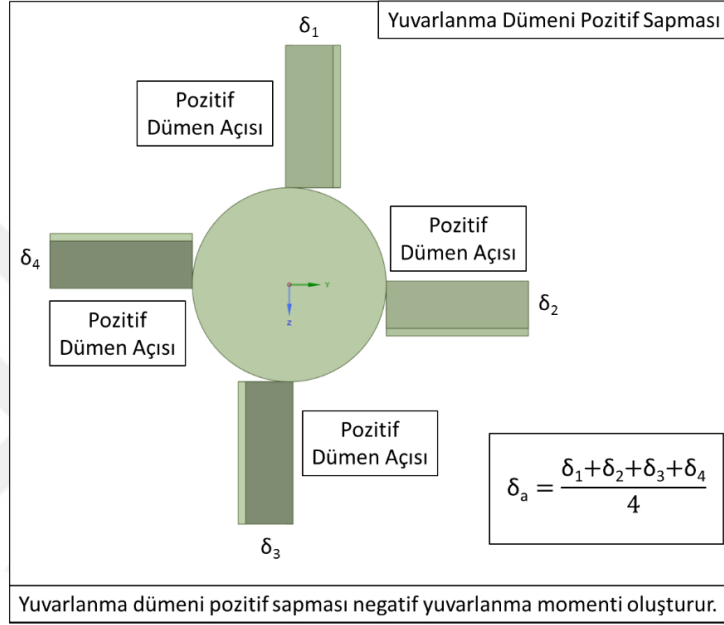
Şekil 4.8: Süperkavite su altı aracı ufki dümen sapması.

Süperkavite su altı aracının sapma düzlemindeki manevrasına ait dümen konumlandırılması da Şekil 4.9’da verilmiştir. Şekil 4.9’da dümen 1 pozitif, dümen 3 ise negatif dümen sapma açısına sahip olacak şekilde konumlandırılmıştır. Buna bağlı olarak şekildeki sistemin üzerindeki dümen sapması amudi dümen pozitif sapması olarak nitelendirilmiş ve toplam sapma açısı da δ_r olarak ifade edilmiştir. Bu sayede dümenler üzerinde oluşturulan amudi dümen pozitif sapması pozitif sapma momenti oluşturmaktadır.



Şekil 4.9: Süperkavite su altı aracı amudi dümen sapması.

Son olarak aracın yuvarlanma düzlemindeki manevrasına ait dümen konumlandırılması Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.10'da bütün dümenler pozitif dümen sapma açısına sahip olacak şekilde konumlandırılmıştır. Buna bağlı olarak şekildeki sistemin üzerindeki dümen sapması yuvarlanma dümeni pozitif sapması olarak nitelendirilmiş ve toplam sapma açısı da δ_a olarak ifade edilmiştir. Bu sayede dümenler üzerinde oluşturulan yuvarlanma dümeni pozitif sapması negatif yuvarlanma momenti oluşturmaktadır.



Şekil 4.10: Süperkavite su altı aracı amudi yuvarlanma dümeni sapması.

4.6. Araç Kinematığının İncelenmesi

Süperkavite su altı araçlarının araç kinematığının incelenmesi kapsamında ilk olarak Dünya eksen takımı ve gövde eksen takımına göre aracın pozisyonunun, oryantasyonunun, hızının ve üzerindeki kuvvet ile momentlerin ifade edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda 6 serbestlik derecesinde seyir eden bir süperkavite su altı aracı için kullanılan vektörler ve bileşenleri aşağıdaki gibidir.

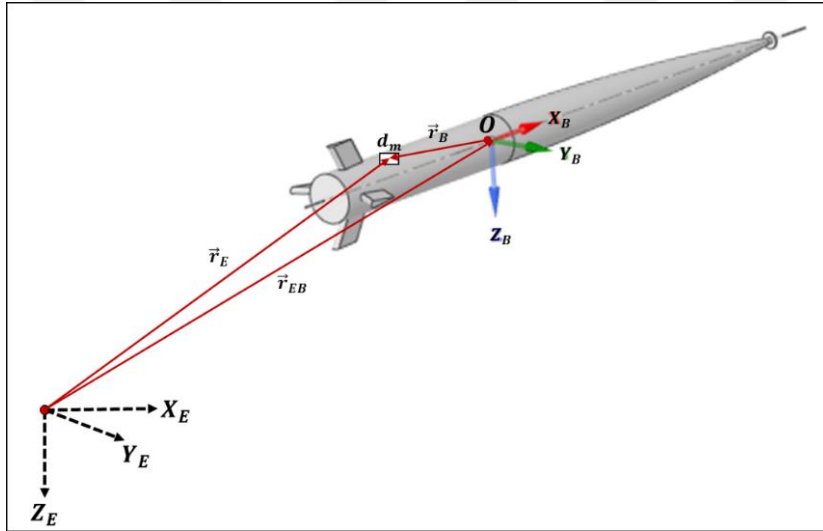
$$\eta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \gamma = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}, \xi = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \varsigma = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Burada ifade edilen η ve γ vektörleri sırasıyla aracın Dünya eksen takımına göre pozisyonunu ve oryantasyonunu ifade etmek için kullanılmaktadır. ξ, v, τ ve ς

Şekil 4.11’de verilen süperkavite su altı aracının üzerinde oluşacak toplam kuvvetler ve momentler Newton’un ikinci yasası kullanılarak ifade edilebilmektedir. Bu yasa lineer ve açısal momentumun zamana göre türevlerinin sırasıyla araç üzerindeki toplam kuvvetlere ve momentlere eşit olacağını söylemektedir. Newton’nun ikinci yasasından yararlanılarak ve Dünya eksen takımı referans alınarak elde edilen vektör-integral formundaki hareket denklemleri denklem 4.11 ve denklem 4.12’deki gibidir.

$$\frac{d}{dt} \iiint \rho_T \frac{d\vec{r}_E}{dt} dv = \iiint \rho_T \vec{g} dv + \iint \vec{F} ds \quad (4.11)$$

$$\frac{d}{dt} \iiint \vec{r}_E \times \rho_T \frac{d\vec{r}_E}{dt} dv = \iiint \vec{r}_E \times \rho_T \vec{g} dv + \iint \vec{r}_E \times \vec{F} ds \quad (4.12)$$



Şekil 4.11: Eksen takımı geçiş vektörlerinin ifade edilmesi.

Şekil 4.11’de verilen “O” noktası su altı aracının ağırlık merkezini, d_m ifadesi ise aracın üzerindeki herhangi bir noktadaki birim kütleli ifade etmektedir.

Denklem 4.11 ve denklem 4.12’de verilen lineer ve açısal momentum denklemleri yalnızca süperkavite su altı aracının geometrik özelliklerinin bilinmesi durumunda çözümlenebilir. Ayrıca süperkavite su altı aracının esnemeyen bir yapıya sahip olduğu ve toplam kütlesi ile kütle dağılımının zamana bağlı olarak değişmediği kabul edilmiştir. Su altı aracının esnemeyen bir yapıya sahip olmasından ötürü denge denklemine elastik denklemler eklenmemiştir. Ayrıca aracın kütlelerinin ve kütle dağılımının sabit olmasından dolayı aracın kütle merkezi koordinatı operasyon boyunca değişmeyecektir. Bu varsayımlardan ve Şekil 4.11’deki pozisyon

vektörlerinden yararlanılarak denklem 4.11 ve denklem 4.12'deki denklemler sırasıyla denklem 4.13 ve denklem 4.14 olacak şekilde güncellenebilir.

$$m \frac{d\vec{V}_O}{dt} = \vec{\tau} \quad (4.13)$$

$$\frac{d}{dt} \iiint \vec{r}_B \times \frac{d\vec{r}_B}{dt} \rho_T dv = \vec{r}_B \times \iint \vec{F} ds = \vec{\zeta} \quad (4.14)$$

Denklem 4.14'de yer alan integralli ifadenin zamana bağımlı olması ve zamana bağımlı integrallerle çalışmanın zor olması nedeniyle yazılan kuvvet ve moment eşitlikleri zamandan bağımsız hale dönüştürülmüştür. Bu dönüşümün uygulanabilmesi için Dünya eksen takımına göre oluşturulan hareket denklemleri gövde eksen takımı referans olacak şekilde yeniden yazılmalıdır. Buradaki problem, gövde eksen takımının hareket eden (döner) bir koordinat sistemine sahip olmasından ötürü Newton'un yasalarının ve buna bağlı olarak hareket denklemlerinin yeni sistemde Dünya eksen takımı referans alınarak oluşturulduğu sistemdeki gibi kullanılamayacak olmasıdır. Yeni sistemde Newton yasalarının kullanılabilmesi için vektör dönüşümlerinden yararlanılmıştır.

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} + \vec{\omega} \times \vec{P} = \vec{\dot{P}} + \vec{\omega} \times \vec{P} \quad (4.15)$$

Denklemden kullanılan $\vec{P}$ vektörü vektör dönüşümünün uygulanacağı herhangi bir vektörü ifade etmektedir.

Gövde eksen takımı referans alınarak ve vektör dönüşümlerinden yararlanılarak oluşturulan yeni lineer ve açısal momentum ifadeleri denklem 4.16 ve denklem 4.17'deki gibidir.

$$m (\vec{V}_O + \vec{\omega} \times \vec{V}_O) = \vec{\tau} \quad (4.16)$$

$$\iiint \vec{r}_B \times \{ \vec{\omega} \times \vec{r}_B + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_B) \} \rho_T dv = \vec{\zeta} \quad (4.17)$$

Denklem 4.16 ifadesi çözüldüğünde süperkavite su altı aracının üç ekseninde sahip olacağı kuvvet denklemlerine ulaşırız. Bu denklemler denklem 4.18'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} m(\dot{u} + qw - rv) &= X \\ m(\dot{v} + ru - pw) &= Y \\ m(\dot{w} + pv - qu) &= Z \end{aligned} \quad (4.18)$$

Denklem 4.17’de verilen integral ifadesi genişletildiğinde denklem 4.19 elde edilecektir.

$$\begin{aligned}
& \iiint \vec{r}_B \times \{\vec{\omega} \times \vec{r}_B + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_B)\} \rho_T dv \\
& = \iiint \vec{\omega} (\vec{r}_B \cdot \vec{r}_B) \rho_T dv - \iiint \vec{r}_B (\vec{r}_B \cdot \vec{\omega}) \rho_T dv \\
& + \iiint \vec{r}_B \times \vec{\omega} (\vec{\omega} \cdot \vec{r}_B) \rho_T dv - \left[\iiint \vec{r}_B \times \vec{r}_B (\vec{\omega} \cdot \vec{\omega}) \rho_T dv = 0 \right]
\end{aligned} \quad (4.19)$$

Eylemsizlik momenti ifadelerinden de yararlanılarak denklem 4.19’da verilen ifadeler çözüldüğünde su altı aracının moment denklemlerine ulaşırız. Bu ifadeler denklem 4.20’deki gibidir.

$$\begin{aligned}
\dot{p}I_{xx} + qr(I_{zz} - I_{yy}) - (\dot{r} + pq)I_{xz} &= K \\
\dot{q}I_{yy} - pr(I_{zz} - I_{xx}) + (p^2 - r^2)I_{xz} &= M \\
\dot{r}I_{zz} + pq(I_{yy} - I_{xx}) + (qr - \dot{p})I_{xz} &= N
\end{aligned} \quad (4.20)$$

Tez kapsamında incelenen süperkavite su altı aracı yatay ve düşey düzlemde eksenel simetriktir. Bu nedenle aracın üzerindeki I_{xy} , I_{yx} , I_{xz} ve I_{zx} eylemsizlik momentleri sıfır olacaktır. Sonuç olarak süperkavite su altı aracının eylemsizlik matrisi bir köşegen matris olacaktır.

$$I_0 = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Süperkavite su altı aracı XY ve XZ düzlemlerinde simetrik olmasına rağmen YZ düzleminde simetrik değildir. Bu durum dikkate alınarak 6 serbestlik derecesindeki kuvvet ve moment denklemleri denklem 4.22’deki yazılabilir.

$$\begin{aligned}
X &= m[\dot{u} + qw - rv - x_G(q^2 + r^2)] \\
Y &= m[\dot{v} + ru - pw + x_G(qp + \dot{r})] \\
Z &= m[\dot{w} + pv - qu + x_G(rp - \dot{q})] \\
K &= \dot{p}I_{xx} + qr(I_{zz} - I_{yy}) \\
M &= \dot{q}I_{yy} - pr(I_{zz} - I_{xx}) - m[x_G(\dot{w} - uq + vp)] \\
N &= \dot{r}I_{zz} + pq(I_{yy} - I_{xx}) + m[x_G(\dot{v} - wp + ur)]
\end{aligned} \quad (4.22)$$

Burada ifade edilen ilk üç denklem süperkavite su altı aracına etkiyen toplam kuvvetleri, son üç denklem ise araca etkiyen toplam momentleri ifade etmektedir.

4.7. Kabul Edilen Varsayımlar

Tez kapsamında süperkavite su altı aracının bilgisayar ortamında hidrodinamik karakteristiğinin çözümlenebilmesi, stabilitesinin ve performansının incelenebilmesi için birtakım varsayımların yapılması gerekmektedir. Bu varsayımların yapılmadığı durumda süperkavite su altı aracının hidrodinamik karakteristiğinin çözümlenmesinde ve performans hesaplarının yapılmasında birtakım bilinmezlikler oluşmakta ve bu bilinmezliklerden ötürü sistemin modellenmesine ve incelenmesine yönelik istenilen verim elde edilememektedir [46]. Süperkavite su altı araçlarının hidrodinamik denklem setinin oluşturulabilmesi, hidrodinamik karakteristiğinin çözümlenebilmesi, stabilite ve performans hesaplarının yapılabilmesine yönelik geliştirilen bu çalışmada yapılan varsayımlar çevresel ve sistem üzerindeki varsayımlar olmak üzere iki alt başlıkta incelenmiştir [50].

4.7.1. Çevresel varsayımlar

Bu bölümde yapılan varsayımlar süperkavite su altı araçları üzerindeki çevresel bilinmezlikleri önlemek amacıyla yapılmıştır. Bu varsayımlardan yararlanılarak aracın hidrodinamik modellemesi yapılmıştır.

- Süperkavite su altı aracının yüzey etkilerinden, blokaj etkilerinden, dalga etkilerinden ve zemin etkilerinden etkilenmediği varsayılmıştır. Bu sebeple su altı aracının zeminden ve yüzeyden olabildiğince uzakta sonsuz bir su hacmi içerisinde seyrettiği kabulü yapılmıştır.
- Aracı seyri boyunca kendi hareketlerinden kaynaklı bir etkiye maruz kalmadığı yani seyri boyunca yaptığı bütün manevralardan kendisini etkilemediği kabulü yapılmıştır.
- Süperkavite su altı aracının akıntı kaynaklı bozuntulardan etkilenmediği kabulü yapılmıştır.
- Su altı aracının seyri boyunca su yoğunluğunun zamana ve konuma bağlı olarak değişmediği, sabit kaldığı kabulü yapılmıştır.
- Süperkavite su altı aracının seyri esnasında oluşturacağı kavitasyon zarfının herhangi bir bozuntuya maruz kalmayacağı, sahip olduğu eliptik şeklini seyir boyunca koruyacağı kabulü yapılmıştır.
- Su altı aracının yüzeyden uzaklığının seyir boyunca sabit kaldığı, bu sayede kavitasyon zarfının ortam basıncına bağlı olarak değişmediği kabul edilmiştir.

4.7.2. Araç, sistem ve kavitasyon zarfı için kabul edilen varsayımlar

Aracın modellemesinin yapılması, sistem dinamiğinin çözümlenmesi, stabilitesinin ve performansının incelenmesi süresince bir takım bilinmezliklerden etkilenmemesi sistem üzerinde aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.

- Bölüm 4.6’da da ifade edildiği gibi aracın esnemeyen bir yapıya sahip olduğu, toplam kütesinin ve kütle dağılımının zamana bağlı olarak değişmediği dolayısıyla aracın kütle merkezi koordinatının seyir boyunca sabit kalacağı kabul edilmiştir. Ek olarak, aracın roket motorlarının yanması sonucunda herhangi bir kütle kaybı yaşamadığı da kabul edilmiştir.
- Süperkavite su altı aracının XZ ve XY eksenlerinde simetrik olduğu yani üzerinde herhangi bir asimetriklik olmadığı kabul edilmiştir.
- Yapılan HAD analizlerinde süperkavite su altı aracının istenen kavitasyon sayısını yalnızca doğal kavitasyon karakteristiğinin etkisinde elde ettiği kabul edilmiş, analizlerde yapay kavitasyon çözümü yapılmamıştır.
- Sistemin istenen kavitasyon zarfını yalnızca doğal kavitasyon yoluyla elde ettiği varsayıldığı için ihtiyaç duyulacak itki kuvveti olması gerektiğinden yüksek çıkacaktır. Bu nedenle süperkavite su altı aracının roket motorunun istenen itki mertebesinde operasyon yaptığı kabul edilmiştir.
- Süperkavite su altı aracının roket motorlu itki sisteminin üreteceği itki kuvvetinin itkinin oluşacağı yüzeye eşit dağıldığı ve bu yüzeyden tekdüze bir kuvvet oluştuğu kabul edilmiştir.
- Aracın yatay ve düşey düzlemlerde simetrik olması ile itki dağılımının düzenli ve tekdüze olmasından ötürü araç üzerinde herhangi bir yuvarlanma etkisinin oluşmayacağı kabul edilmiştir.
- Denek taşı doğrulama çalışması ve hidrodinamik katsayıların elde edilmesi amacıyla yapılan veri havuzu oluşturma çalışması kapsamında gerçekleştirilen HAD analizlerinde süperkavite su altı aracı için belirlenen seyir hızının analiz boyunca sabit kaldığı ve sistemin sürekli koşullarda hareket ettiği kabul edilmiştir.
- Su altı aracının oluşturacağı serbest sınır tabakasında bozuntuya yol açmayacak bir kavitatör geometrisine ve kavitasyon başlığı performansına sahip olduğu kabulü yapılmıştır.

5. HİDRODİNAMİK MATEMATİK MODELİN KURULMASI VE BİLEŞENLERİN TANITILMASI

Bir süperkavite su altı aracının farklı operasyon koşullarında hidrodinamik denklem setinin kurulabilmesi için, öncelikle geleneksel su altı araçlarının hidrodinamik denklem setinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu amaçla ilk olarak geleneksel su altı araçlarına ait Gertler M. ve Hagen G. R. tarafından üretilen ve geliştirilen standart denizaltı hareket denklemleri incelenmiştir. Ardından oluşturulan modelin bileşenleri hidrostatik ve hidrodinamik bileşenler başlıkları altında verilmiştir. Sonrasında süperkavite su altı araçlarına özgü süperkavitasyon rejiminin hareket denklemleri üzerine etkisi incelenmiş. Bu etkiler göz önünde bulundurularak süperkavite su altı araçlarına özgü bileşenler tespit edilmiş ve buna bağlı olarak hidrodinamik hareket denklem seti güncellenmiştir [52, 53].

5.1 Standart Denizaltı Hareket Denklemlerinin Tarihçesi ve Oluşturulması

İlk olarak Amerikan donanmasında yapılacak simülasyon çalışmalarında kullanılması amacıyla 6 SD için denizaltı hareket denklemleri Gertler M. ve Hagen G. R. tarafından oluşturulmuştur. Ortaya çıkarılan hareket denklemleri denizaltıların genel seyir zarfını ve manevraları esnasındaki davranışlarını simüle edebilmektedir [53].

Hareket denklemleri oluşturulurken ve simülasyon çalışmaları gerçekleştirilirken 1956 yılında Genel Hidromekanik Araştırma Programı kapsamında NSRDC (Naval Ship Research and Development Center) tarafından gerçekleştirilen su altı testleri sonucunda elde edilen tecrübe ve teknik bilgiden yararlanılmıştır. Yapılan çalışmalarda denizaltılar için eğitim simülatörlerinin ve otomatik kontrol sistemlerinin oluşturulmasına katkı sağlanması hedeflenmiştir [53].

Yapılan çalışmada hareket denklemlerini ifade etmek amacıyla hidrodinamik katsayılar hesaplanırken deneysel ve analitik hesaplama tekniklerinden yararlanılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen test çalışmalarında düzlemsel hareket mekanizması ve döner kol mekanizması gibi düzenekler kullanılmıştır. Gerçekleştirilen döner kol mekanizması testleri ile denizaltının dönüşü

sırasında ortaya çıkan döner (rotasyonel) ve akuple etkilerin hareket denklemine dahil edilmesi amaçlanmıştır. Gertler M. ve Hagen G. R. başlangıç çalışması olarak linnerleştirilmiş denklem setlerini kullanmış, bu şekilde yunuslama veya sapma gibi tek düzlemde yapılan manevraların ifade edilmesi hedeflenmiştir. 1960 yılına kadar elde edilen deneysel ve analitik çalışmalar sonucunda hareket denklemlerin standartlaştırılması amaçlanmış, bu kapsamda denizaltılar için standart hareket denklemleri ifade edilmiştir [52, 53].

Standart denizaltı hareket denklemleri olarak adlandırdıkları modelde denizaltı üzerinde oluşan kuvvet ve momentleri 3 farklı alt başlıkta incelenebileceği değerlendirilmiştir. Bu alt başlıklar statik, döner ve ivme katsayılarıdır. Statik katsayılar sistemin üzerindeki bağıl çizgisel hızlar kaynaklı oluşan kuvvet ve momentleri ifade etmek için kullanılan katsayılardır. Döner katsayılar ise sistemin üzerindeki bağıl açısal hızlar kaynaklı oluşan kuvvet ve momentleri ifade etmek için kullanılan katsayılardır. İvme katsayıları ise sistemin üzerindeki çizgisel ve açısal ivme kaynaklı oluşan kuvvet ve momentleri ifade etmek için kullanılan katsayılardır. Bu üç alt başlık için Taylor Serisi kullanılarak sistem üzerindeki bir kuvveti veya momenti ifade etmek için kullanılan Taylor Serisinin derecesine bağlı olarak sonsuz sayıda katsayı yazılabilir. Bu komplekslikten kaçınmak maksadıyla sistemi yeterli sadakitle ifade edebilecek katsayılar kullanılmıştır. Bu kapsamda Taylor Serisi ikinci dereceden açılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda oluşturulan hidrodinamik modelin yeterli sayıda girdi verisine sahip olması durumunda standart denizaltı hareket denklemlerinin kullanılabileceği ifade edilmiştir [52, 53].

5.2 6 Serbestlik Derecesinde Gertler M. ve Hagen G. R. Hidrodinamik Denklem Setinin İncelenmesi

Standart denizaltı hareket denklemleri değerlendirildiğinde sistemin statik, dinamik, lineer, lineer olmayan ve akuple etkiler gibi bir çok farklı etkiye maruz kaldığı bilinmektedir. Bu etkiler hava ortamında modellenen sistemlere göre farklı olabilmektedir. Temelinde iki denklem setinde de bir sistemin 6 serbestlik derecesindeki hareketi modellenirse de yoğunluk ve viskozite farklı gibi sebeplerden ötürü sistem dinamiğindeki bir takım katsayılar değişiklik gösterebilmektedir. Bu kapsamda Gertler M. ve Hagen G. R. tarafından Taylor Serisi açılımından da faydalanarak su altı dünyası için yeni hareket denklemleri türetilmiştir. Taylor Serisi

açılımının 2 derecede kullanılmasının nedeni su altı aracı üzerindeki linner olmayan ve akuple etkiler gibi doğrusal olmayan etkileri de denklem takımına dahil etmektir. Bu kapsamda su altı aracı üzerindeki kuvvet ve momentler ile bu değerleri doğrudan etkileyen zaman bağlı hız terimleri, doğrusal ve açısal hızlar kullanılmıştır.

Taylor Serisi bir fonksiyonun tek bir noktadaki seri açılımıdır. $x = a$ noktasında $f(x)$ gerçek fonksiyonu için Taylor serisi açılımı denklem 5.1'deki gibidir [54].

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x - a) + \frac{f''(a)}{2!}(x - a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x - a)^n + \dots \quad (5.1)$$

Eğer $a = 0$ ise bu açılım Maclaurin serisi olarak da bilinmektedir. Tek bir noktadaki türevlerin toplamını içeren bu açılımdan yola çıkılarak su altı aracının hareket denklemleri yazılabilmektedir. Taylor Serisi açılımının yapılabilmesi için öncelikli olarak hareket denklemlerinde yer alan kuvvet-moment, doğrusal ve çizgisel hız ifadelerinin boyutsuzlaştırma parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Boyutsuzlaştırma işlemi yapılırken referans alan ifadesi için standart deniz altı denklemlerinde torpido uzunluğunun karesi, süperkavite su altı araçları için yazılan denklemlerde de kavitatör çapının karesi kullanılmıştır. Bu tez kapsamında standart deniz altı denklemlerinde kullanılacak olan boyutsuzlaştırılmış terimler aşağıdaki gibidir [55].

- Boyutsuzlaştırılmış kuvvetler:

$$[X', Y', Z'] = \left[\frac{X}{\frac{1}{2}\rho l^2 U^2}, \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho l^2 U^2}, \frac{Z}{\frac{1}{2}\rho l^2 U^2} \right]$$

- Boyutsuzlaştırılmış momentler:

$$[K', M', N'] = \left[\frac{K}{\frac{1}{2}\rho l^3 U^2}, \frac{M}{\frac{1}{2}\rho l^3 U^2}, \frac{N}{\frac{1}{2}\rho l^3 U^2} \right]$$

- Boyutsuzlaştırılmış çizgisel hızlar:

$$[u', v', w'] = \left[\frac{u}{U}, \frac{v}{U}, \frac{w}{U} \right]$$

- Boyutsuzlaştırılmış açısal hızlar:

$$[p', q', r'] = \left[\frac{pl}{U}, \frac{ql}{U}, \frac{rl}{U} \right]$$

Yukarıda verilen U_0 serbest akım hızını, l ise su altı aracının boyunu ifade etmektedir. Denklem 5.2'de yazılan ilişki kullanılarak U_0 serbest akım hızı aracın üç eksenindeki doğrusal hızını ifade etmek için kullanılabilir [56].

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta & -\sin\alpha \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ \sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i \quad (5.2)$$

$$U_0 = U_0 x_i = \underbrace{U_0 \cos\alpha\cos\beta}_u x_{i+1} - \underbrace{U_0 \sin\beta}_v y_{i+1} + \underbrace{U_0 \sin\alpha\cos\beta}_w z_{i+1}$$

Buradaki eşitlikten yararlanılarak $U_0 = u^2 + v^2 + w^2$ ve $1 = u'^2 + v'^2 + w'^2$ eşitlikleri elde edilir.

Tez kapsamında süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan kuvvet ve momentler için Taylor Serisi açılımı yalnızca Z kuvveti özelinde değerlendirilmiştir. Diğer kuvvet ve momentleri değerlendirmek için de Z kuvvetinin değerlendirilmesinde izlenen adımlar takip edilebilir. Bu kapsamda ilk olarak Z kuvveti bağlı olduğu açısall ve doğrusal hızların fonksiyonu olacak şekilde ifade edilmelidir.

$$Z = Z(u, v, w, p, q, r) = \frac{1}{2} \rho l^2 U^2 Z'(u', v', w', p', q', r') \quad (5.3)$$

Birimsizleştirilmiş Z fonksiyonu için referans alınan bir noktada Taylor Serisi açılırsa denklem 5.4'te elde edilecektir.

$$Z'(u', v', w', p', q', r') = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left[\left(u' \frac{\partial}{\partial u} + v' \frac{\partial}{\partial v} + w' \frac{\partial}{\partial w} + p' \frac{\partial}{\partial p} + q' \frac{\partial}{\partial q} + r' \frac{\partial}{\partial r} \right) \right]^k \quad (5.4)$$

$$* (Z'(u', v', w', p', q', r'))$$

Sadece sıfırıncı ve birinci terimler için yukarıda verilen Taylor Serisi açılımı incelendiğinde denklem 5.5 ortaya çıkmaktadır.

$$Z' = Z'_0 + \left[\left(u' \frac{\partial}{\partial u} + v' \frac{\partial}{\partial v} + w' \frac{\partial}{\partial w} + p' \frac{\partial}{\partial p} + q' \frac{\partial}{\partial q} + r' \frac{\partial}{\partial r} \right) \right] Z'(u, v, w, p, q, r) \quad (5.5)$$

$$Z' = Z'_0 + [Z'_u u' + Z'_v v' + Z'_w w' + Z'_p p' + Z'_q q' + Z'_r r']$$

$$, w', p', q', r')$$

Tez çalışmasında standart deniz altı hareket denklemlerinin ve süperkavite su altı aracı için indirgenmiş hareket denklemlerinin yazılması kapsamında Taylor serisi açılımı en fazla ikinci dereceden türevleri içerecek şekilde yazılmıştır. Bu durumun nedenleri su

altı sistemlerinin hareketlerini Taylor serisinin ikinci dereceden açılımıyla ifade edilebilmesi ve yüksek derecelerde oluşacak terim karmaşasından kaçınılmaktır.

Z kuvveti için ikinci dereceden Taylor Serisi açılımı uygulandığında denklem 5.6 elde edilecektir.

$$\begin{aligned}
 Z' = Z'_0 + \frac{1}{2} [& Z'_{uu}u'^2 + 2Z'_{uv}u'v' + 2Z'_{uw}u'w + 2Z'_{up}u'p' + 2Z'_{uq}u'q' \\
 & + 2Z'_{ur}u'r' + Z'_{vv}v'^2 + 2Z'_{vw}v'w + 2Z'_{vp}v'p' + 2Z'_{vq}v'q' \\
 & + 2Z'_{vr}v'r' + Z'_{ww}w'^2 + 2Z'_{wp}w'p' + 2Z'_{wq}w'q' + 2Z'_{wr}w'r' \\
 & + Z'_{pp}p'^2 + 2Z'_{pq}p'q' + 2Z'_{pr}p'r' + Z'_{qq}q'^2 + 2Z'_{qr}q'r' \\
 & + Z'_{rr}r'^2]
 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Gertler M. ve Hagen G. R. bu bölümde anlatılan Taylor Serisi açılımından yararlanarak 6 serbestlik derecesinde standart deniz altı hareket denklemlerini oluşturmuşlardır. Bu denklem setinde X, Y ve Z kuvvetleri ile K, M ve N momentleri Taylor Serisinin ikinci dereceden açılımından gelen terimlerle ifade edilmeye çalışılmıştır. Denklem 5.6'da Z kuvveti için verilen Taylor Serisi açılımı incelendiğinde, açılımın bir çok değişkene bağlı kompleks ve uzun bir denklem olduğu görülmektedir. Öncelikli olarak bir sistemin hareket denklemleri oluşturulurken, hareketin denklemi tanımlayan değişkenlere bağlı duyarlılık analizleri yapılmalıdır. Duyarlılık analizlerinin tamamlanmasının ardından sistem için duyarsız olan katsayılar hareket denklemlerinde çıkarılabilir. Ek olarak ihtiyaç görülmesi durumunda da yeni katsayılar türetilir ve hareket denklemlerine eklenebilir. Bu aşamanın tamamlanmasının ardından hareket denkleminde yer alan bütün katsayıların belirlenmesi gerekmektedir. Katsayıların belirlenmesi sürecinde test çalışmalarından ve HAD analizlerinden yararlanılmaktadır.

Aşağıdaki denklemlerde Gertler M. ve Hagen G. R. tarafından elde edilen 6 serbestlik derecesindeki standart deniz altı denklemleri verilmiştir. Denklemler oluşturulurken NSRDC tarafından elde edilen test verilerinden de yararlanılmıştır [53].

Eksenel kuvvet denkleminde ifade edilen a_i , b_i , c_i katsayılarına sahip terimler pervane itki kuvvetini temsil etmektedir. Denklem sisteminde kullanılan yıldızlı terimler ise su altı aracında pervane veya geometri kaynaklı asimetrikliği temsil etmek için kullanılmıştır. Çizelge 5.1'de, 5.2'de ve 5.3'te geleneksel su altı araçlarının hareket denklemleri verilmiştir.

Çizelge 5.1: Geleneksel su altı araçları için eksenel hareket denklemleri.

Eksenel Hareket Denklemleri	
Eksenel Kuvvet Denklemi (X)	Yuvarlanma Momenti Denklemi (K)
$ \begin{aligned} & m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = \\ & + \frac{\rho}{2} l^4 [X_{qq}' q^2 + X_{rr}' r^2 + X_{rp}' rp] \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 [X_{\dot{u}}' \dot{u} + X_{vr}' vr + X_{wq}' wq] \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 [X_{uu}' u^2 + X_{vv}' v^2 + X_{ww}' w^2] \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 u^2 [X_{\delta e \delta e}' \delta e^2 + X_{\delta r \delta r}' \delta r^2 + X_{\delta a \delta a}' \delta a^2] \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 [a_i u^2 + b_i u u_c + c_i u_c^2] \\ & -(W - B) \sin \theta \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 [X'_{vv\eta} v^2 + X'_{ww\eta} w^2 + X'_{\delta r \delta r \eta} \delta r^2 u^2 + X'_{\delta e \delta e \eta} \delta e^2 u^2] (\eta - 1) \\ & \{ \eta = \frac{u_c}{u} \} \end{aligned} $	$ \begin{aligned} & I_x \dot{p} + (I_z - I_y) qr - (\dot{r} + pq) I_{xz} + (r^2 - q^2) I_{yz} + (pr - \dot{q}) I_{xy} \\ & + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = \\ & + \frac{\rho}{2} l^5 [K_{\dot{p}}' \dot{p} + K_{\dot{r}}' \dot{r} + K_{qr}' qr + K_{pq}' pq + K_{p p }' p p] \\ & + \frac{\rho}{2} l^4 [K_p' up + K_r' ur + K_{\dot{v}}' \dot{v}] \\ & + \frac{\rho}{2} l^4 [K_{vq}' vq + K_{wp}' wp + K_{wr}' wr] \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 \left[K_* u^2 + K_v' uv + K_{v v }' v \left (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right \right] \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 [K_{vw}' vw + K_{\delta r}' u^2 \delta r] \\ & + (y_G W - y_B B) \cos \theta \cos \phi - (z_G W - z_B B) \cos \theta \sin \phi \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 K_*' u^2 (\eta - 1) \end{aligned} $

Çizelge 5.2: Geleneksel su altı araçları için sapma hareketi denklemleri.

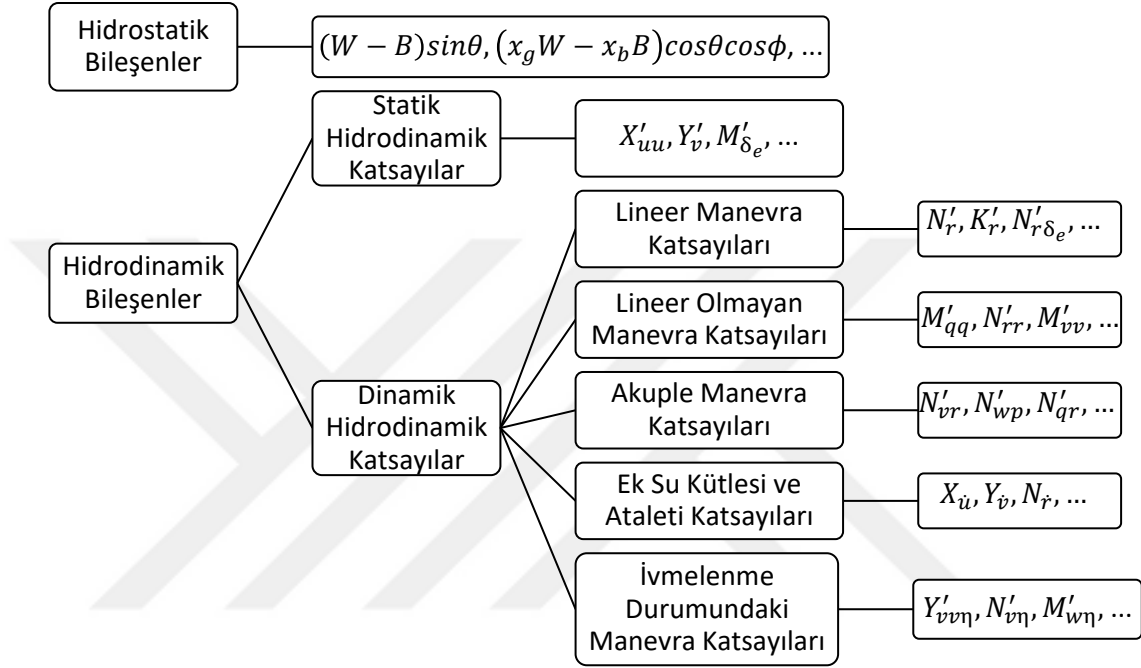
Sapma Hareketi Denklemleri	
Sapma Kuvveti Denklemi (Y)	Sapma Momenti Denklemi (N)
$ \begin{aligned} & m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] = \\ & + \frac{\rho}{2} l^4 [Y_{\dot{r}}' \dot{r} + Y_{\dot{p}}' \dot{p} + Y_{p p }' p p + Y_{pq}' pq + Y_{qr}' qr] \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 [Y_{\dot{v}}' \dot{v} + Y_{vq}' vq + Y_{wp}' wp + Y_{wr}' wr] \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 \left[Y_{\dot{r}}' ur + Y_{\dot{p}}' up + Y_{ r \delta r}' u r \delta r + Y_{v r }' \text{sign}(v)(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} r \right] \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 \left[Y_{*}' u^2 + Y_{\dot{v}}' uv + Y_{v v }' v(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right] \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 [Y_{vw}' vw + Y_{\delta r}' u^2 \delta r] \\ & + (W - B) \cos\theta \sin\phi \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 Y_{r\eta}' ur(\eta - 1) \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 [Y_{v\eta}' uv + Y_{v v \eta}' v(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} + Y_{\delta r\eta}' \delta r u^2](\eta - 1) \end{aligned} $	$ \begin{aligned} & I_x \dot{r} + (I_y - I_x) pq - (\dot{q} + rp) I_{yz} + (q^2 - p^2) I_{zx} + (rq - \dot{p}) I_{zx} \\ & + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = \\ & + \frac{\rho}{2} l^5 [N_{\dot{r}}' \dot{r} + N_{\dot{p}}' \dot{p} + N_{pq}' pq + N_{qr}' qr + N_{r r }' r r] \\ & + \frac{\rho}{2} l^4 [N_{\dot{v}}' \dot{v} + N_{wr}' wr + N_{wp}' wp + N_{vq}' vq] \\ & + \frac{\rho}{2} l^4 \left[N_{\dot{p}}' up + N_{\dot{r}}' ur + N_{ r \delta r}' u r \delta r + N_{v r }' \left (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right r \right] \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 \left[N_{*}' u^2 + N_{\dot{v}}' uv + N_{v v }' v \left (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right \right] \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 [N_{vw}' uw + N_{\delta r}' u^2 \delta r] \\ & + (x_G W - x_B B) \cos\theta \sin\phi - (y_G W - y_B B) \sin\theta \\ & + \frac{\rho}{2} l^4 N_{r\eta}' ur(\eta - 1) \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 [N_{v\eta}' uv + N_{v v \eta}' v(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} + N_{\delta r\eta}' \delta r u^2](\eta - 1) \end{aligned} $

Çizelge 5.3: Geleneksel su altı araçları için yunuslama hareketi denklemleri.

Yunuslama Hareketi Denklemleri	
Yunuslama Kuvveti Denklemi (Z)	Yunuslama Momenti Denklemi (M)
$ \begin{aligned} & m[\dot{w} - uq + vp - z_G(q^2 + p^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] = \\ & + \frac{\rho}{2} l^4 [Z_{\dot{q}}' \dot{q} + Z_{pp}' p^2 + Z_{rr}' r^2 + Z_{rp}' rp] \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 [Z_{\dot{w}}' \dot{w} + Z_{vr}' vr + Z_{vp}' vp] \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 \left[Z_q' uq + Z_{ q \delta e}' u q \delta e + Z_{w q }' \frac{w}{ w } (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} q \right] \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 \left[Z_*' u^2 + Z_w' uw + Z_{w w }' w \left (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right \right] \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 \left[Z_{ w }' u w + Z_{ww}' w (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right] \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 [Z_{vv}' v^2 + Z_{\delta e}' u^2 \delta e + Z_{\delta r}' u^2 \delta r] \\ & + (W - B) \cos \theta \cos \phi \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 Z_{q\eta}' uq (\eta - 1) \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 [Z_{w\eta}' uw + Z_{w w \eta}' w (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} + Z_{\delta e\eta}' \delta e u^2] (\eta - 1) \end{aligned} $	$ \begin{aligned} & I_y \dot{q} + (I_x - I_z) rp - (\dot{p} + qr) I_{xy} + (p^2 - r^2) I_{zx} + (qp - \dot{r}) I_{yz} \\ & + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = \\ & + \frac{\rho}{2} l^5 [M_{\dot{q}}' \dot{q} + M_{pp}' p^2 + M_{rr}' r^2 + M_{rp}' rp + M_{q q }' q q] \\ & + \frac{\rho}{2} l^4 [M_{\dot{w}}' \dot{w} + M_{vr}' vr + M_{vp}' vp] \\ & + \frac{\rho}{2} l^4 \left[M_q' uq + M_{ q \delta e}' u q \delta e + M_{ w q }' \left (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right q \right] \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 \left[M_*' u^2 + M_w' uw + M_{w w }' w \left (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right \right] \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 \left[M_{ w }' u w + M_{ww}' w (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right] \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 [M_{vv}' vv + M_{\delta e}' u^2 \delta e + M_{\delta a}' u^2 \delta a] \\ & - (x_G W - x_B B) \cos \theta \cos \phi - (z_G W - z_B B) \sin \theta \\ & + \frac{\rho}{2} l^4 M_{q\eta}' uq (\eta - 1) \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 [M_{w\eta}' uw + M_{w w \eta}' w (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} + M_{\delta e\eta}' \delta e u^2] (\eta - 1) \end{aligned} $

5.3 Hidrodinamik Hareket Denklemlerinin Bileşenlerinin Tanıtılması

Gertler M. ve Hagen G. R. hidrodinamik denklem setinin oluşturulmasının ardından bu bölümde denlem setinde verilen bileşenler tanıtılmıştır. Genel olarak bu bileşenler hidrodinamik ve hidrostatik bileşenler olmak üzere iki alt başlıkta incelenmiştir. Şekil 5.1’de hidrodinamik denklem setinin bileşenlerinin genel şeması verilmiştir.



Şekil 5.1: Hidrodinamik denklem setinin bileşenlerinin genel şeması.

5.3.1 Hidrostatik bileşenler

Hidrostatik bileşenler aracın hareketinden bağımsız bir şekilde, araca etkiyen yerçekimi ve suyun kaldırma kuvveti kaynaklı oluşan bileşenlerdir. Bu bileşenlerden ilki aracın kütlesi kaynaklı oluşan ağırlık bileşenidir ve ağırlık bileşeninin yönü aracın ağırlık merkezinden Dünyanın merkezine doğrudur. Diğer bileşen ise suyun kaldırma kuvvetidir. Su altında hava ortamından farklı olarak, suyun yoğunluğu kaynaklı cisme etkiyen bir kaldırma kuvveti yer almaktadır. Bu nedenle hidrodinamik bileşenler belirlenirken aracın ağırlığına ek olarak araca uygulanan kaldırma kuvveti de dikkate alınmaktadır. Bu kuvvetin yönü aracın hacim merkezinden sıvı yüzeyine doğrudur ve araca uygulanan kaldırma kuvveti aracın seyir yaptığı sıvı ortamın yoğunluğuna ve aracın batan hacmine bağlı değişmektedir. Denklem 5.7’de ağırlık ve kaldırma kuvveti

bileşenleri incelendiğinde bu bileşenlerin birbirlerine ters yönlerde etki ettiği görülmektedir.

$$F_W = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix}, F_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -B \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Bir su altı aracının sudaki konumlanmasına bağlı olarak araç üzerindeki ağırlık ve kaldırma kuvveti bileşenlerinin etkileri değişmektedir. Ek olarak ağırlık merkezinin ve kaldırma kuvveti merkezinin hidrodinamik moment merkezine olan uzaklığına bağlı olarak hidrostatik bileşenler araç üzerinde hidrostatik momentler oluşturmaktadır. Bilhassa bu momentlerden yunuslama ve yuvarlanma momentleri su altı aracının hareketine, performansına ve stabilitesine etki etmektedir [50]. Dünya eksen takımı referans alınarak bu statik bileşenlerin oluşturacakları kuvvet ve momentler Denklem 5.8’de ifade edilmiştir [57].

$$\begin{bmatrix} X_{Hidrostatik} \\ Y_{Hidrostatik} \\ Z_{Hidrostatik} \\ K_{Hidrostatik} \\ M_{Hidrostatik} \\ N_{Hidrostatik} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(W - B)\sin\theta \\ (W - B)\cos\theta\sin\phi \\ (W - B)\cos\theta\cos\phi \\ -(y_g W - y_b B)\cos\theta\cos\phi - (z_g W - z_b B)\cos\theta\sin\phi \\ -(z_g W - z_b B)\sin\theta - (x_g W - x_b B)\cos\theta\cos\phi \\ -(x_g W - x_b B)\cos\theta\sin\phi - (y_g W - y_b B)\sin\theta \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

5.3.2 Hidrodinamik bileşenler

Geleneksel su altı araçları için tanımlanabilecek hidrostatik ve hidrodinamik bileşenler deniz ortamının hava ortamına göre viskozitesinin daha yüksek ve ~800 kat daha yoğun olmasından kaynaklı hava araçlarına göre farklılıklar gösterebilmektedir. Bu kapsamda deniz ortamında hareket eden bir su altı aracı için farklı dinamikler söz konusudur. İlk olarak su altı aracının hareketinden bağımsız olan hidrostatik bileşenler incelendiğinde deniz ortamında kaldırma kuvveti etkisi kaynaklı ortaya çıkan sephiye kuvveti bileşenlerinin hava ortamındaki statik bileşenlerden farklılık gösterdiği görülmektedir. Hidrodinamik bileşenler ise aracın su altındaki seyri sırasında oluşan bileşenlerdir. Burada da aracın su altındaki manevrası sırasında farklı eksenlerdeki hareketlerinin birbirlerini etkilemesi (akuple etkiler) sonucunda ortaya çıkan çapraz

akış etkileri ile ek su kütlesi ve ataleti gibi bileşenler hava ortamındaki dinamik bileşenlere göre farklılık göstermektedir.

Şekil 5.1’de de görüldüğü üzere geleneksel su altı araçları için oluşturulan hidrostatik bileşenler statik ve dinamik hidrodinamik katsayılar olmak üzere iki alt gruba ayrılmıştır. Burada yer alan hidrodinamik bileşenler de lineer manevra katsayıları, lineer olmayan manevra katsayıları, akuple manevra katsayıları, ek su kütlesi ve ataleti katsayıları ve ivmelenme durumundaki manevra katsayıları olmak üzere 5 alt başlıkta incelenebilmektedir [53].

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında süperkavite su altı araçlarının hareket denklemlerinin çıkarılması ve hidrodinamik denklem setinin kurulması amacıyla ilk olarak literatürde var olan temeli Gertler M. ve Hagen G. R. tarafından atılan geleneksel su altı araçları hidrodinamik modeli incelenmiş, akabinde bu denklemde değişiklikler yapılarak süperkavite su altı araçları için bir hidrodinamik model oluşturulmuştur [53]. Bu bölümde de geleneksel su altı araçlarının hidrodinamik denklem setinin oluşturulması kapsamında oluşturulan hidrodinamik bileşenler incelenmiştir.

5.3.2.1 Statik hidrodinamik katsayılar

Su altı aracının seyri sırasında herhangi bir manevra hareketi yapmadığı durumda üzerindeki doğrusal hız, hücum açısı ve kontrol yüzeyi sapma açısı kaynaklı oluşan katsayılar statik hidrodinamik katsayılar olarak adlandırılmaktadır. Bu katsayılar kuvvet ve momentlerin doğrusal hıza, hücum açılara ve kontrol yüzeyi sapma açlarına türevlerinin boyutsuz halde yazılmasıyla oluşan katsayılardır [50]. Burada alınan türevin derecesi aracın seyri esnasındaki davranışlarından yararlanılarak birinci ya da ikinci dereceden olabilir. Örnek olarak geleneksel bir su altı aracı için sapma açısına bağlı eksenel yükler incelendiğinde eksenel kuvvetin aracın seyir hızına ve sapma açısına bağlı olarak ikinci dereceden değiştiği görülecektir. Buna bağlı olarak denklem setine eklenmesi gereken katsayılar denklem 5.9’daki gibi olacaktır.

Denklem 5.9’da görüldüğü üzere sistemin üzerinde sapma açısı bulunduğu durumda bu sapma kaynaklı X'_{vv} katsayısı oluşmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, aracın üzerindeki sapma açısının doğrusal hızın bileşenleri şeklinde ifade edildiğidir.

$$X'_{uu} = \frac{(\partial^2 X / \partial u^2)}{\frac{1}{2} \rho l^2} \text{ ya da } X'_{uu} = \frac{X}{\frac{1}{2} \rho u^2 l^2} \quad (5.9)$$

$$X'_{vv} = \frac{(\partial^2 X / \partial v^2)}{\frac{1}{2} \rho l^2} \text{ ya da } X'_{vv} = \frac{X}{\frac{1}{2} \rho v^2 l^2}$$

$$u = U_0 \cos \beta, \quad v = U_0 \sin \beta \quad (5.10)$$

Su altı aracını sapma açısına bağlı incelemeye devam ettiğimizde, aracın üzerindeki sapma açısı değişiminin sapma momenti üzerine etkisinin birinci dereeden değiştiği görülecektir. Bu durumda oluşacak statik hidrodinamik katsayı denklem 5.11'deki gibi olacaktır.

$$N'_v = \frac{N}{\frac{1}{2} \rho u w l^3} \quad (5.11)$$

Geleneksel su altı aracı üzerinde amudi dümen sapmasının var olduğu bir durum değerlendirildiğinde de ortaya çıkacak katsayı denklem 5.12'deki gibi olacaktır.

$$N'_{\delta_r} = \frac{N}{\frac{1}{2} \rho u^2 l^3} \quad (5.12)$$

Buraya kadar su altı aracı üzerinde sapma açısı ve amudi dümen sapma açısı olduğu durumda ortaya çıkabilecek statik hidrodinamik katsayılar incelenmiştir. Aynı şekilde geleneksel su altı aracı üzerinde belli bir hücum açısı ve ufki dümen sapma açısı olduğu durum incelendiğinde bu katsayılara benzer şekilde eksenel kuvvet, düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti katsayıları elde edilecektir.

5.3.2.2 Dinamik hidrodinamik katsayılar

Tez çalışması kapsamında dinamik hidrodinamik katsayılar lineer manevra katsayıları, linner olmayan manevra katsayıları, akuple manevra katsayıları, ek su kütlesi ve ataleti katsayıları ve ivmelenme durumundaki manevra katsayıları olmak üzere 5 alt başlıkta

incelenmiştir. Bu bölümde belirtilen katsayılar aracın manevralı veya ivmelenmeli hareketi sonucunda oluşan katsayılardır [53].

Su altı aracının hidrodinamik denklem setinin doğru bir şekilde oluşturulabilmesi için hareket denklemlerinin su altı aracının hareketine bağlı olarak doğru şekilde ifade edilmesi ve hareket denkleminde yer alan dinamik hidrodinamik katsayıların su altı aracının hareketinden ayrıklaştırılması gerekmektedir [50].

Lineer manevra katsayıları:

Su altı aracının manevralı hareketi esnasında aracın üzerinde oluşan kuvvetlerin ve momentlerin, aynı manevra esnasında oluşan doğrusal ve açısal hızlara göre değişimiyle ortaya çıkan katsayılar lineer manevra katsayılarını oluşturmaktadır [50]. Bu katsayıları incelemek maksadıyla su altı aracının sapma açısal hızıyla (r) sapma hareketi yaptığını varsayalım. Burada araç üzerinde oluşacak hidrodinamik etkiler sapma kuvveti ve momentidir. Sapma manevrası esnasında araç üzerinde oluşacak lineer manevra katsayıları denklem 5.13'teki gibi olacaktır.

$$Y'_r = \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho ur l^3} \quad (5.13)$$

$$N'_r = \frac{N}{\frac{1}{2}\rho ur l^4}$$

Aracın r açısal hızıyla sapma manevrası esnasında üzerinde bir amudi dümen sapması olduğu varsayıldığında, amudi dümen etkilerinden ötürü sapma manevrası yönünde lineer manevra katsayıları oluşacaktır. Bu kontrol yüzeyi sapması sonucu amudi dümen açısının kısmi türevine göre oluşacak katsayı denklem 5.14'te verilmiştir.

$$N'_{r\delta_r} = \frac{N}{\frac{1}{2}\rho ur \delta_e l^4} \quad (5.14)$$

Bu bölümde su altı aracının sapma manevrası yaptığı durumda üzerinde oluşacak lineer manevra katsayıları incelenmiştir. Aynı şekilde bu katsayıların benzerleri su altı aracının yunuslama veya yuvarlanma manevrası yaptığı durumlar için hesaplanabilir.

Lineer olmayan manevra katsayıları:

Lineer manevra katsayılarının iki ya da daha üst dereceden türevlerinden oluşan katsayılar lineer olmayan manevra katsayıları olarak adlandırılmaktadır [53]. Geleneksel su altı araçları incelendiğinde her lineer manevra katsayısının ikinci dereceden türevlerine duyarlı olmadığı ve lineer olmayan manevra katsayılarının maksimum ikinci dereceden türevlenebilir katsayılarla sınırlandırıldığı görülmektedir. Daha üst derecede bir katsayı kullanılmamasının nedeni de bu katsayıların ikinci dereden itibaren duyarsız olmaları ve diğer katsayılar ile olan korelasyonlarından ötürü baskın katsayıların doğruluğunu azaltmalarıdır. Diğer taraftan süperkavite su altı araçları için oluşturulan veritabanı incelendiğinde sistemde yer alan Z_{www} gibi bazı lineer olmayan manevra katsayılarının üçüncü dereden türevlerine duyarlı olduğu gözlemlenmiştir. Denklem 5.15'te sapma kuvveti ve sapma momenti etkisiyle oluşan bir takım lineer olmayan manevra katsayıları verilmiştir.

$$\begin{aligned} Y'_{vv} &= \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho v^2 l^3} \\ Y'_{pp} &= \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho p^2 l^4} \\ N'_{vv} &= \frac{N}{\frac{1}{2}\rho v^2 l^4} \\ N'_{rr} &= \frac{N}{\frac{1}{2}\rho r^2 l^5} \end{aligned} \tag{5.15}$$

Aynı şekilde denklem 5.15'te verilen katsayıların benzerlerini diğer hidrodinamik kuvvet ve momentler için de yazmak mümkündür.

Akuple manevra katsayıları:

Su altı ortamı hava ortamına göre çok daha yoğun ve yüksek viskozitelidir. Bu nedenle su altındaki bir aracın manevrası esnasında ters akış etkileri oluşmakta ve bu etkiler kaynaklı su altı aracı üzerinde doğrusal olmayan terimler barındırmaktadır.

Su altı aracının manevrası esnasında oluşan ters akış etkilerinden kaynaklı birbirinden farklı doğrusal hızların, açısal hızların veya bir doğrusal ve bir açısal hızın aynı anda araca beraber etki etmesi sonucunda ortaya çıkan katsayılar akuple manevra katsayıları olarak adlandırılmaktadır [46]. Örnek olarak su altı aracı sapma açılı bir sapma manevrası yaptığıında, aracın hem sapma açısı kaynaklı bir sapma hızına (v), hem de sapma açısal hızına (r) sahip olacağı için sapma momentine N_{vr} akuple manevra katsatısı eklenecektir. Görüldüğü üzere N_{vr} katsayısı araca hem bir doğrusal hızın hem de bir açısal hızın etki etmesi sonucu ortaya çıkmıştır.

Hava araçları manevraları esnasında yuvarlanma hareketi yaparlar. Su altı araçları ise yuvarlanma hareketi yapmadan adeta bir araba gibi manevralarını yaparlar. Su altı araçlarının manevraları süresince yuvarlanma etkisine sahip olmasının sebebi de pervaneleridir.

Akuple manevra katsayıları da genel olarak aracın yunuslama veya sapma manevrası esnasında oluşabilirler. Aynı düzlemde N_{vr} ve $Y_{r\delta r}$ gibi hidrodinamik katsayılar aracın sapma hareketi kaynaklı oluşan akuple manevra katsayılarıdır. Su altı ortamının yüksek vizkoziteye sahip olması akuple manevra katsayılarını önemli kılmaktadır.

Bir su altı aracına sapma manevrası yaparken başka düzlemdeki bir hareketin etki ettiğini varsayalım. Bu etkinin yunuslama açısal hızı olması durumunda ortaya çıkabilecek akuple manevra katsayıları Denklem 5.16'daki gibi olacaktır.

$$\begin{aligned} N'_{wr} &= \frac{N}{\frac{1}{2}\rho wql^4} \\ M'_{rp} &= \frac{M}{\frac{1}{2}\rho rpl^5} \\ K'_{qr} &= \frac{K}{\frac{1}{2}\rho qrl^5} \end{aligned} \quad (5.16)$$

Simülasyon ortamında yapılan aerodinamik modellemelerde akuple etkiler gibi dinamik ve doğrusal olmayan koşullar oluşmaktadır. Ancak, yoğunluğun ve viskozitenin düşük olmasından kaynakları etkileri azdır. Diğer taraftan hidrodinamik modelleme için buradaki gibi birçok tümleşik katsayıya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum hidrodinamik modellemenin zorlayıcı etkisini göstermektedir.

Ek su kütlesi ve ataleti katsayıları:

Bir hava aracının 6 serbestlik derecesindeki hidrodinamik denklem seti incelendiğinde ek su kütlesi ve ataleti katsayılarına rastlanmamaktadır. Bunun nedeni hava ortamında yoğunluğun düşük olmasıdır.

Ek su kütlesi su altı aracının ivmelenme durumlarında su ortamının sahip olduğu yoğunluk etkilerinden ötürü aracın üzerinde oluşan ek kütleyi ve ataleti ifade etmektedir. Başka bir şekilde ifade etmek gerekirse, su altı aracının yerini değiştirdiği sıvı kaynaklı oluşan dinamik etkidir. Su altı aracının ivmeli hareketi esnasında etrafındaki su kütlesine kuvvet uygulamaktadır. Bu kuvvet aracın etrafındaki su parçacıklarının salınımlı bir hareket yapmasına neden olmaktadır. Aracın harmonik hareketi esnasında bu kuvvetler farklı genliklerde salınım yapmaktadır. Su altı aracından uzaklaştıkça da bu genlikle ihmal edilebilir seviyelere gelmektedir. Ek su kütlesi, su altı aracının harmonik hareket yapmaya zorlanması sonucunda indüklenmiş basınç kuvveti ve momenti kaynaklı ortaya çıkmaktadır. Bu harmonik harekete zorlanma durumu aracın ivmelenmesi ile birlikte doğru orantılı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle ek su kütlesi ve ataleti katsayıları su altı aracının ivmelenme durumunda ortaya çıkmaktadır [58].

Yüzeye yakın seyir eden su altı araçları üzerinde oluşacak yüzey dalgalanmalarından ötürü aracın sahip olacağı ek su kütlesi ve ataleti katsayıları bu durumdan etkilenecektir. Denklem 5.17’de verilen ek su kütlesi matrisinde su altı aracının yeterli derinlikte seyir yaptığı ve bu dalgalanmalardan etkilenmediği varsayılmıştır.

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & X_{\ddot{v}} & X_{\ddot{w}} & X_{\ddot{p}} & X_{\ddot{q}} & X_{\ddot{r}} \\ Y_{\ddot{u}} & Y_{\ddot{v}} & Y_{\ddot{w}} & Y_{\ddot{p}} & Y_{\ddot{q}} & Y_{\ddot{r}} \\ Z_{\ddot{u}} & Z_{\ddot{v}} & Z_{\ddot{w}} & Z_{\ddot{p}} & Z_{\ddot{q}} & Z_{\ddot{r}} \\ K_{\ddot{u}} & K_{\ddot{v}} & K_{\ddot{w}} & K_{\ddot{p}} & K_{\ddot{q}} & K_{\ddot{r}} \\ M_{\ddot{u}} & M_{\ddot{v}} & M_{\ddot{w}} & M_{\ddot{p}} & M_{\ddot{q}} & M_{\ddot{r}} \\ N_{\ddot{u}} & N_{\ddot{v}} & N_{\ddot{w}} & N_{\ddot{p}} & N_{\ddot{q}} & N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Ek su kütlesi matrisi incelendiğinde bir su altı aracı için bu matrisin her zaman pozitif olduğu bilinmektedir. Ayrıca aracın yatay ve düşey düzlemde simetrik olduğu varsayıldığında diagonal terimler dışındaki terimlerin diagonal terimlere kıyasla küçük kaldığı bu nedenle de diagonal olmayan terimlerin ihmal edilebilir olduğu

gözelemlenmiştir [50]. Bu kapsamda oluşacak yeni ek su kütlesi matrisi denklem 5.18'deki gibi olacaktır.

$$M_A = diag[X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}] \quad (5.18)$$

Geleneksel su altı araçlarında ek su kütlesi ve ataleti katsayıları deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen ampirik ifadeler kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında süperkavite su altı aracının etrafında oluşan daimi kavitasyon zarfının iç basınç – dış basınç dengesini kurabilecek şekilde kaldığı ve bu süreçte kavitasyon zarfının süperkavite su altı aracı üzerinde oluşacak ek su kütlesi için bir bariyer görevi görerek süperkavite su altı aracını bu etkilere maruz bırakmayacağı varsayılmıştır. Ek olarak süperkavite su altı araçlarının çok hızlı bir şekilde ivmelenmesi ve bunun sonucunda çok kısa bir sürede istenen kavitasyon zarfına ulaşması ek su kütlesi katsayılarının etkisini minimuma indireyeceği düşünülmektedir. Bu nedenle tez kapsamında ek su kütlesi ve ataleti katsayıları hesaplanmamıştır.

İvmelenme durumundaki manevra katsayıları:

Geleneksel su altı araçları iter-terk (push-out) ve yüzey-terk (swim-out) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İter-terk sistemlerde su altı araçları yüksek basınçlı bir ortamın sahip olduğu basınç kuvveti etkisiyle ilk hareketini kazanır. Sonrasında ise herhangi bir itki sistemi olmadan yalnızca sahip olduğu ivmelenmenin ve sephiye kuvvetinin etkisiyle seyrini sürdürür. Geleneksel yüzey-terk sistemlerde ise su altı aracının belirlediği rotada seyir yapmasına yardımcı olan pervaneler bulunur. Bu pervanelerin sağladığı torkun etkisiyle su altı aracı ihtiyaç duyduğu itki kuvvetine sahip olur. Gertler M. ve Hagen G. R. tarafından geliştirilen hidrodinamik denklem setinde yer alan η terimleri de sistemin iter veya yüzer-terk olmasından bağımsız bir şekilde aracın sahip olduğu hız ile itki sisteminin sağladığı hızın uyumsuz olduğu durumlarda oluşmaktadır. Emredilen hız ile gerçek hızın farklı olması durumunda ortaya çıkan bu ivmelenme durumundaki manevra katsayıları hidrodinamik denklem setine eklenmelidir[52].

Denklemlerde yer alan η ifadeleri su altı araçlarında araca emredilen hızın, aracın sahip olduğu gerçek hıza oranını temsil etmektedir. Bu ifade itki terimlerinin denklem setinde doğru bir şekilde temsil edilmesi için önemlidir.

Örnek olarak pervaneli bir su altı aracının belirli bir sapma açısında manevra yaptığını varsayalım. Bu durumda manevra boyunca pervane kaynaklı oluşacak sapma kuvvetini ve sapma momentini ifade edecek hidrodinamik katsayılar denklem 5.19 ve denklem 5.20'deki gibi olacaktır.

$$Y'_{v\eta} = \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho v^2 l^2 (\eta - 1)} \quad (5.19)$$

$$N'_{v\eta} = \frac{N}{\frac{1}{2}\rho v l^3 (\eta - 1)} \quad (5.20)$$

5.4 Süperkavitasyon Rejiminin Etkisindeki Su Altı Araçları İçin Hidrodinamik Denklem Setinin Güncellenmesi

Bu bölümde Gertler M. ve Hagen G. R. tarafından geleneksel su altı araçlarının hidrodinamik modellenmesinde kullanılan katsayılardan ve süperkavite su altı aracının dinamiği dikkate alınarak yapılan varsayımlardan yararlanılarak süperkavite su altı araçları için yeni bir denklem seti oluşturulmuştur.

Tez kapsamında yuvarlanma momenti kaynaklı oluşacak etkiler tez kapsamı dışında tutulmuştur bu sebeple süperkavite su altı araçları 5 serbestlik derecesinde incelenmiştir. Süperkavite su altı araçları için 5 serbestlik derecesindeki denklem seti oluşturulurken Gertler M. ve Hagen G. R. tarafından geliştirilen hidrodinamik modelde olduğu gibi hidrostatik ve hidrodinamik katsayılardan yararlanılmıştır. Ek olarak, süperkavitasyon rejimine özgü seyir dinamikleri kaynaklı hidrodinamik katsayıların duyarlılıkları incelenmiş, buna bağlı olarak da denklem sisteminde bir takım güncellemeler yapılmıştır. Süperkavite su altı araçları için sadeleştirilmiş 5 serbestlik derecesindeki hidrodinamik denklem seti aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} X \rightarrow & m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) - y_G\dot{r} + z_G\dot{q}] \\ & = \frac{\rho}{2}l^2[X'_{uu}u^2 + X'_{vv}v^2 + X'_{ww}w^2] + \frac{\rho}{2}l^4[X'_{qq}q^2 + X'_{rr}r^2] \\ & + \frac{\rho}{2}l^2u^2[X'_{\delta_{cp}\delta_{cp}}\delta_{cp}^2 + X'_{\delta_{cy}\delta_{cy}}\delta_{cy}^2] + \frac{\rho}{2}l^2u^2[X'_{\delta_e\delta_e}\delta_e^2 + X'_{\delta_r\delta_r}\delta_r^2] \\ & - (W - B) \sin\theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Y &\rightarrow m[\dot{v} + ur - y_G r^2 + z_G qr + x_G \dot{r}] = \\
&= +\frac{\rho}{2} l^2 [Y'_v uv + Y'_{v|v|} v|v| + Y'_{vvv} v^3/u] + \frac{\rho}{2} l^2 u^2 [Y'_{\delta_{cy}} \delta_{cy} + Y'_{\delta_r} \delta_r] \\
&+ \frac{\rho}{2} l^2 u^2 [Y'_{\delta_{cy}|\delta_{cy}|} \delta_{cy} |\delta_{cy}| + Y'_{\delta_r|\delta_r|} \delta_r |\delta_r|] + \frac{\rho}{2} l^3 [Y'_r ur] \\
&+ \frac{\rho}{2} l^4 [Y'_{r|r|} r|r|] + \frac{\rho}{2} l^5 \left[\frac{Y'_r r^3}{u} \right] + (W - B) \cos\theta \sin\phi
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N &\rightarrow I_x \dot{r} - \dot{q} I_{yz} + q^2 I_{zx} + r q I_{zx} + m[x_G(\dot{v} + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \\
&= +\frac{\rho}{2} l^6 [N'_{rrr} r^3/u] + \frac{\rho}{2} l^5 [N'_{r|r|} r|r|] + \frac{\rho}{2} l^4 [N'_r ur] \\
&+ \frac{\rho}{2} l^3 [N'_v uv + N'_{v|v|} v|v| + N'_{vvv} v^3/u] + \frac{\rho}{2} l^3 u^2 [N'_{\delta_{cy}} \delta_{cy} + N'_{\delta_r} \delta_r] \\
&+ \frac{\rho}{2} l^3 u^2 [N'_{\delta_{cy}|\delta_{cy}|} \delta_{cy} |\delta_{cy}| + N'_{\delta_r|\delta_r|} \delta_r |\delta_r|] \\
&+ (x_G W - x_B B) \cos\theta \sin\phi - (y_G W - y_B B) \sin\theta
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z &\rightarrow m[\dot{w} - uq - z_G q^2 + x_G \dot{q} + y_G r q] \\
&= +\frac{\rho}{2} l^2 [Z'_w uw + Z'_{w|w|} w|v| + Z'_{www} w^3/u] \\
&+ \frac{\rho}{2} l^2 u^2 [Z'_{\delta_{cp}} \delta_{cp} + Z'_{\delta_e} \delta_e] \\
&+ \frac{\rho}{2} l^2 u^2 [Z'_{\delta_{cp}|\delta_{cp}|} \delta_{cp} |\delta_{cp}| + Z'_{\delta_e|\delta_e|} \delta_e |\delta_e|] + \frac{\rho}{2} l^3 [Z'_q uq] \\
&+ \frac{\rho}{2} l^4 [Z'_{q|q|} q|q|] + \frac{\rho}{2} l^5 [Z'_q q^3/u] + (W - B) \cos\theta \cos\phi
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M &\rightarrow I_y \dot{q} - q r I_{xy} + r^2 I_{zx} - \dot{r} I_{yz} + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq)] \\
&= +\frac{\rho}{2} l^6 [M'_{qqq} q^3/u] + \frac{\rho}{2} l^5 [M'_{q|q|} q|q|] + \frac{\rho}{2} l^4 [M'_q uq] \\
&+ \frac{\rho}{2} l^3 [M'_w uw + M'_{w|w|} w|v| + M'_{www} w^3/u] \\
&+ \frac{\rho}{2} l^3 u^2 [M'_{\delta_{cp}} \delta_{cp} + M'_{\delta_e} \delta_e] + \frac{\rho}{2} l^3 u^2 [M'_{\delta_{cp}|\delta_{cp}|} \delta_{cp} |\delta_{cp}|] \\
&+ M'_{\delta_e|\delta_e|} \delta_e |\delta_e| - (x_G W - x_B B) \cos\theta \cos\phi - (z_G W - z_B B) \sin\theta
\end{aligned}$$

Süperkavite su altı araçları için oluşturulan 5 serbestlik derecesindeki hidrodinamik denklem seti incelendiğinde, hidrodinamik model oluşturulurken η terimlerinin

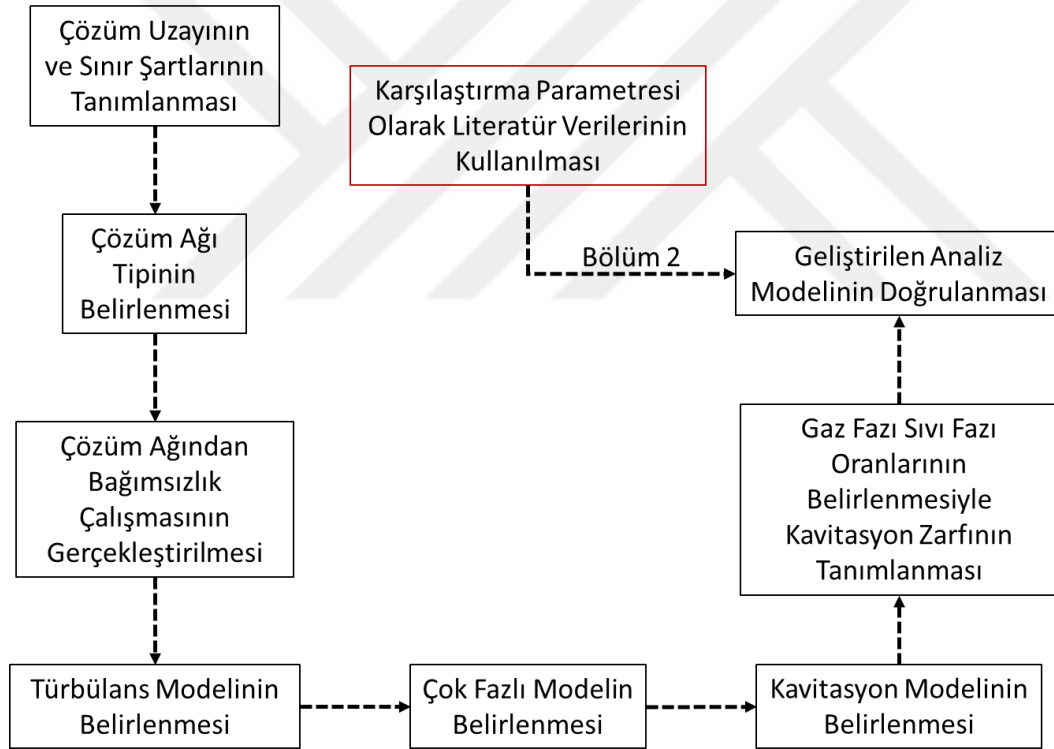
kullanılmadığı görülmektedir. η terimlerinin ihmal edilmesinin nedeni, süperkavite su altı aracının seyrine başladığı anda çok kısa bir sürede maksimum hızına ulaşması ve bu nedenle emredilen hızın gerçek hızı yakalama süresinin çok kısa olmasıdır. Denklem setinde görüldüğü üzere kuvvet ve momentler ifade edilirken bir takım üçüncü derece terimlerden yararlanılmıştır. Üçüncü derece terimlerin de sisteme dahil edilmesinin nedeni süperkavite su altı aracının seyri esnasında oluşan kuvvet ve momentlerin yüksek derecede lineer olmayan etkilere sahip olması ve hareketin 3. dereceden türevler kullanılarak daha iyi ifade edilebilmesidir. Geleneksel su altı araçlarında akupler etkiler çoğunlukla pervane kaynaklı oluşmaktadır. Süperkavite su altı araçların pervanelere sahip olmadıkları için farklı düzlemlerden gelen akupler etkilerinin oluşmayacaktır. Bu nedenle tez kapsamında akupler etkiler ihmal edilmiştir. Ek olarak, kavitasyon zarfının süperkavite su altı aracının etrafını sarması sonucunda gövde kaynaklı oluşan akupler etkiler ile aracın roket motorlu itki sistemine sahip olması nedeniyle pervane kaynaklı etkiler denklem setine dahil edilmemiştir. Hareket denklem setinde yer alan katsayılara ilişkin detaylı açıklamalar Bölüm 7’de vermiştir.

6. SÜPERKAVİTE SU ALTI ARAÇLARINDA DOĞAL KAVİTASYON ÇÖZÜMÜ İÇİN HİDRODİNAMİK ANALİZ MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

Analiz modeli geliştirilmesi amacıyla ilk olarak süperkavitasyon rejimini incelemek için Bölüm 2’de veri havuzu oluşturma çalışması yapılmış ve bu kapsamda literatürde yer alan teorik eşitlikler, deneysel veriler ve deneye dayalı denklemlerden yararlanılmıştır. Denek taşı araştırması süresince birimsiz kavitasyon zarfı uzunluğu, çapı ve sürüklenme kat sayısı gibi süperkavitasyon rejimini ifade edebilecek ve birer karşılaştırma ölçütü olarak kullanılabilecek parametrelerden yararlanılmıştır. Bilim insanları tarafından bu parametrelerin incelenmesine yönelik yapılan çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmalar karşılaştırma ölçütlerine göre kategorize edilerek bir veri havuzu oluşturulmuştur. Oluşturulan veri havuzu süperkavitasyon rejimini ifade eden parametrelerin eğilimlerinin incelenmesi ve HAD analiz modeli geliştirmesi kapsamında elde edilen verileri değerlendirmek için kullanılmıştır.

Denek taşı araştırmasının tamamlanmasının ardından HAD analiz modeli geliştirilmesi kapsamında ilk olarak süperkavitasyon rejimini çözümleyebilecek çözüm uzayı ve sınır şartları tanımlanmış, Model Etkin Bölgesi’ni (BOI) ifade eden gerekli geometrilendirme yapılmıştır. Sonrasında çözüm ağı tipi belirleme çalışması gerçekleştirilmiş ve bu rejimin incelenmesinde kullanılabilecek uygun çözüm ağları değerlendirilmiştir. Çözüm ağının belirlenmesinin ardından çözüm ağından bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiş ve yapılacak HAD çözümünde kullanılması gereken uygun değer çözüm ağı yoğunluğu belirlenmeye çalışılmıştır. Süperkavitasyon rejiminin çözümlenmesine yönelik geometrilendirme ve çözüm ağı oluşturulması işlemleri tamamlandıktan sonra doğal kavitasyon karakteristiğini çözümlmek amacıyla türbülans modeli ve çok fazlı model belirlenmiştir. Çok fazlı modelin belirlenmesi kapsamında kavitasyon dinamiğini çözümleyebilecek kavitasyon modeli de belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra süperkavitasyon rejiminin etkin olduğu bir durum için doğal kavitasyonlu HAD analizleri yapılabilecek kabiliyete gelinmiştir. Ancak bu aşamaya kadar oluşacak kavitasyon zarfının geometrilendirilmesi ve geliştirilen analiz modelinin doğrulanması yapılmamıştır. Bu

kapsamda ilk olarak süperkavitasyon analizleri sonucunda elde edilen kavitasyon zarfı geometrileri incelenmiş ve kavitasyon zarfını literatür verileri ile uyumlu bir şekilde ifade edebilen en iyi gaz yüzdesi belirlenmiştir. Gaz yüzdesinin belirlenmesinin ardından disk kavitatör modeli, 45 derece yarım açılı konik kavitatör modeli ve literatürde yer alan disk kavitatöre sahip bir torpido modeli üzerinde geliştirilen analiz modelinin doğrulanmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve süperkavitasyon rejiminin etkisinde doğal kavitasyon karakteristiğinin çözümlenmesi kapsamında geliştirilen HAD analiz modeli yüksek sadakatle doğrulanmıştır. Son olarak da gerçekleştirilen adımlar ve elde edilen sonuçlar bu bölüm kapsamında değerlendirilmiştir. Şekil 6.1’de doğal kavitasyon çözümü için hidrodinamik analiz modeli geliştirilmesi kapsamında izlenen yöntemi ifade eden akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 6.1: Hidrodinamik analiz modeli geliştirilmesinin genel şeması.

6.1. Çözüm Uzaı ve Sınır Şartlarının Tanıtılması

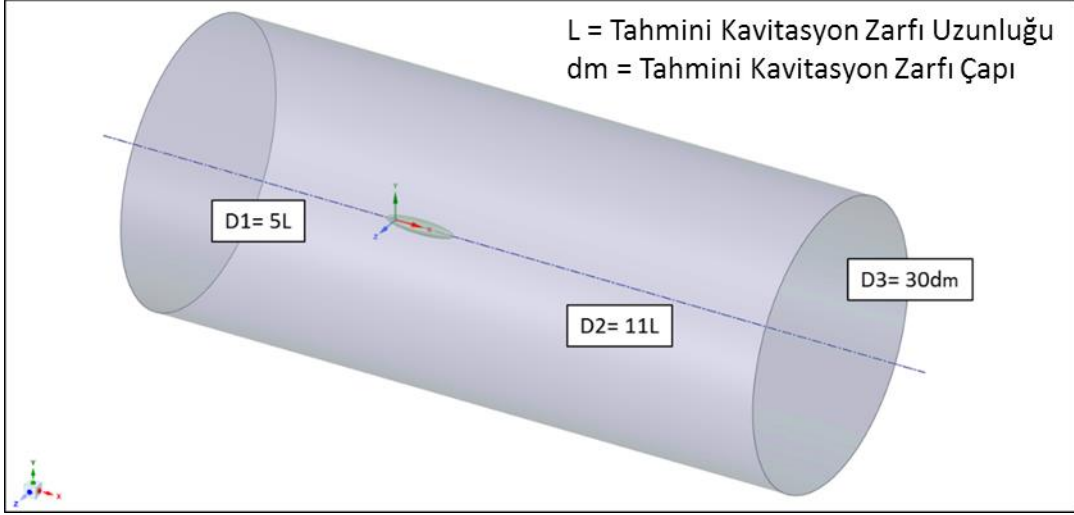
Gaz ve sıvı fazlarını içerisinde barındıran ve bir dış akış problemi olarak ele alınan süperkavitasyon rejiminin çözümlenebilmesi amacıyla yapılacak olan HAD çözümlerinde çoklu faz modellemesinin de çözüm metoduna dâhil edilmesi gerekmektedir.

Bir dış akışın HAD analizinde ilk olarak model etrafını çevreleyen akışkanın karakteristiğinin incelendiği bir çözüm uzayı oluşturulmalıdır. Bu çözüm uzayının boyutları ise çözülecek dış akış probleminin fiziğini etkilemeyecek genişlikte olmalıdır. Ayrıca analiz süresinin uzatılmaması ve maliyet etkin olunması amacıyla gereğinden büyük bir çözüm uzayı oluşturulmamalıdır.

Süperkavite akışların inceleneceği dış akış problemlerinde akışın tek fazlı olmamasından, sıvı ve gaz fazlarını içerisinde barındırmasından ve çözümün doğru yapılabilmesi için gaz dinamiğinin çözümlenmesi gerekliliğinden ötürü yapılacak olan HAD analizleri çok fazlı modelleme modülünü de içermelidir. Ek olarak çözümün çok fazlı modelleme modülünü içermesinin amacı çok fazlı modellemenin kavitasyon çözüm modülünü içermesiyle süperkavitasyon rejiminin çözümlenmesine olanak sağlamasıdır. Süperkavitasyon rejiminin istenen çözünürlükte çözümlenebilmesi için çözüm ağı oluşturulurken hedeflenen kavitasyon zarfı etrafında bir iyileştirme yapılmalıdır. Bu nedenle incelenecek akış problemlerinde deneysel verilerden yararlanılarak kavitatörün etrafında oluşması beklenen kavitasyon zarfı hacmi belirlenmiş ve bu hacim referans alınarak iyileştirilmiş bir çözüm ağına sahip ilave çözüm uzayı “*Body of Influence- Modelin Etkin Bölgesi*” (BOI) oluşturulmuştur.

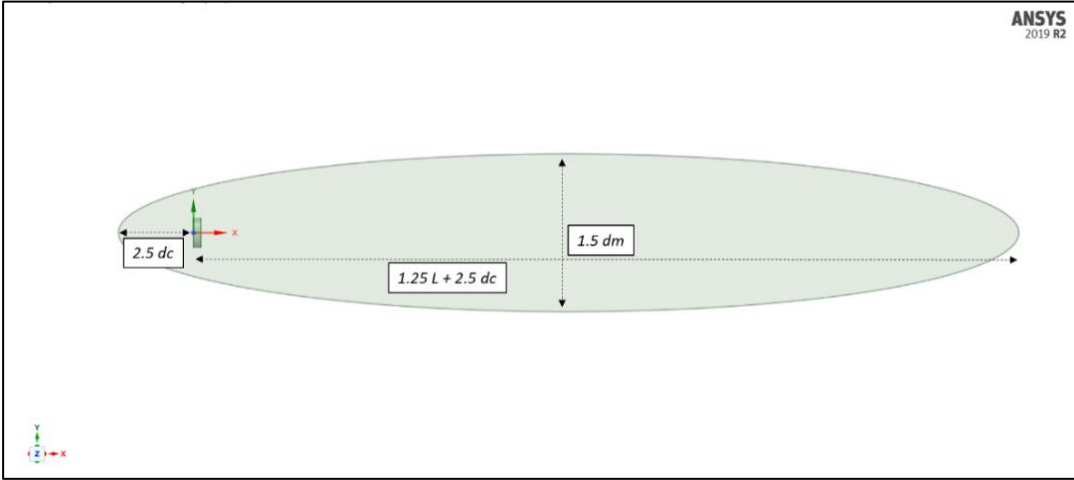
Çözüm uzayı ve katı model arasında kalan bu çözüm hacmi daha sık çözüm ağından oluşmakta ve süperkavitasyon rejiminin daha yüksek çözünürlükte çözülebilmesine olanak sağlamaktadır. Raporda çözüm uzayını ve ek çözüm hacmini (BOI) oluşturmak için referans alınacak geometrik ölçüler kavitasyon zarfını tanımlamak için kullanılan ampirik formüllerden ve deneysel verilerden yararlanılarak elde edilmiştir. Literatürde yer alan çalışmalar kullanılarak kavitatör tipine, çapına ve kavitasyon sayısına göre kavitasyon zarf parametreleri belirlenirken, elde edilen en büyük kavitasyon zarfı çapı ve uzunluğu değerleri referans alınmıştır. Süperkavitasyon rejimini incelemek için yapılacak HAD analizlerinde kullanılacak olan çözüm uzayı ölçüleri kavitasyon zarfı çapı (d_m) ve uzunluğuna (L_c) bağlı olacak şekilde Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Şekil 6.3’te yeşil renkle gösterilen eliptik hacim Bölüm 2’deki literatür verilerinden yararlanılarak oluşturulan kavitasyon zarfını temsil etmektedir.

Raporda en iyi çözüm uzayının belirlenmesi maksadıyla farklı çözüm ağları için farklı çözüm uzayları incelenmiştir. Diğer yandan, çözüm uzayı boyutlandırılması çözüm uzaylarının geometrik şekillerinden bağımsız bir şekilde yapılmıştır. Şekil 6.2’de de temsili bir silindirik hacim üzerinde çözüm uzayı boyutlandırması gösterilmiştir.



Şekil 6.2: Silindirik çözüm uzayı ölçüleri.

BOI boyutlandırması yapılırken literatürdeki verilerden yararlanılarak oluşturulan en büyük kaviteasyon zarfı geometrisi referans alınarak eliptik bir hacim oluşturulmuştur. Oluşturulacak BOI'nin referans alınan kaviteasyon zarfı geometrisinden büyük olması amaçlanmıştır. Bu kapsamda eliptik bir hacim referans alınarak belirlenen BOI ölçüleri Şekil 6.3'te verilmiştir. Şekil 6.3'te verilen BOI hacmi literatürdeki çalışmalar referans alınarak oluşturulan kaviteasyon zarfı uzunluğu ve çapından sırasıyla $1.25L + 5 d_c$ ve $1.5 d_m$ katı olacak şekilde boyutlandırılmıştır.

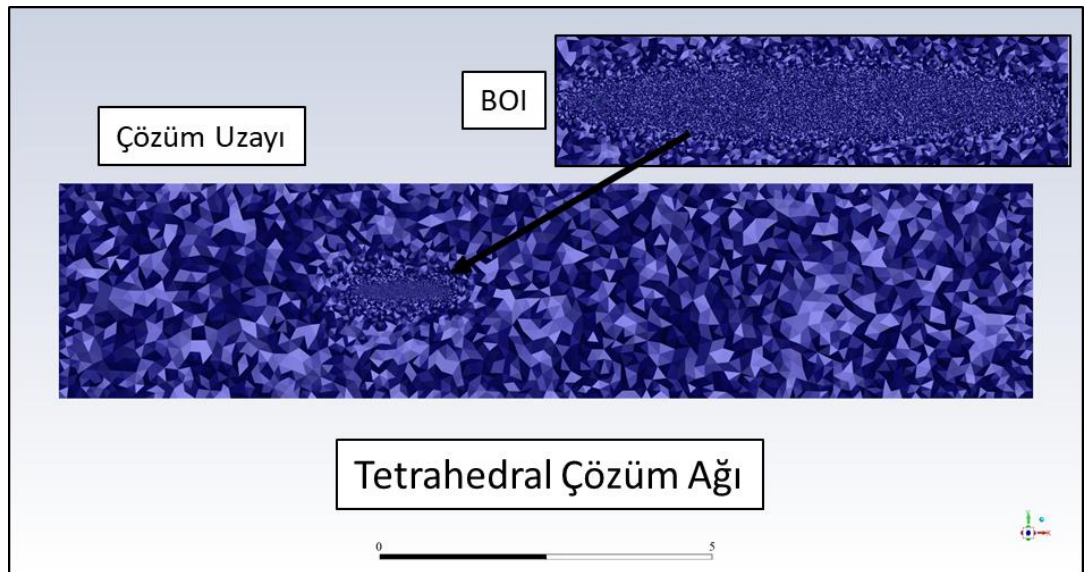
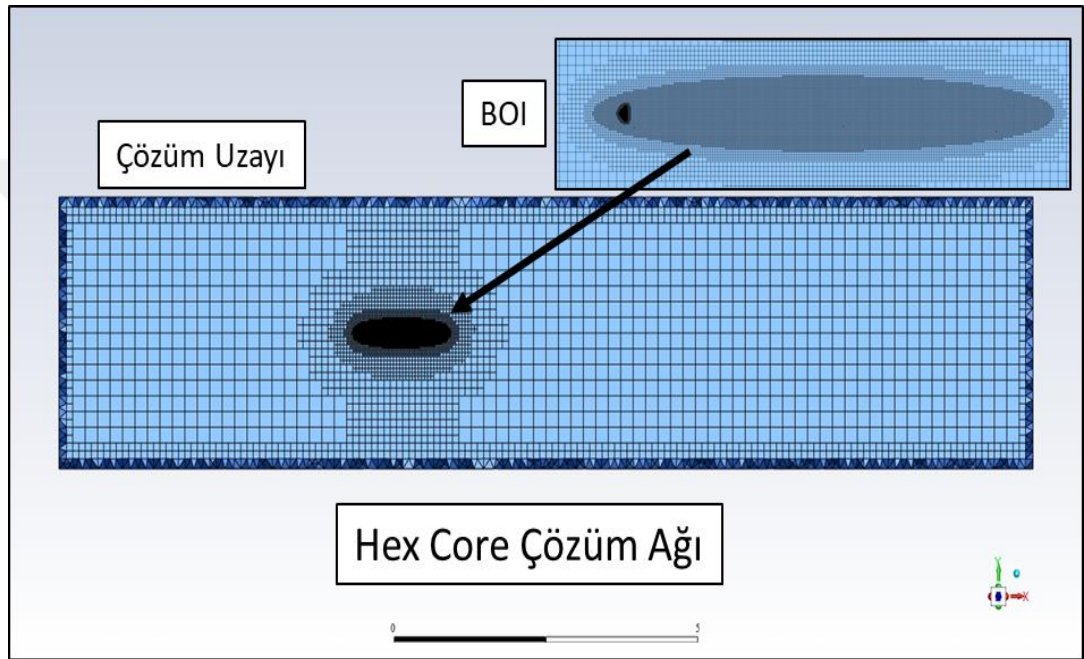


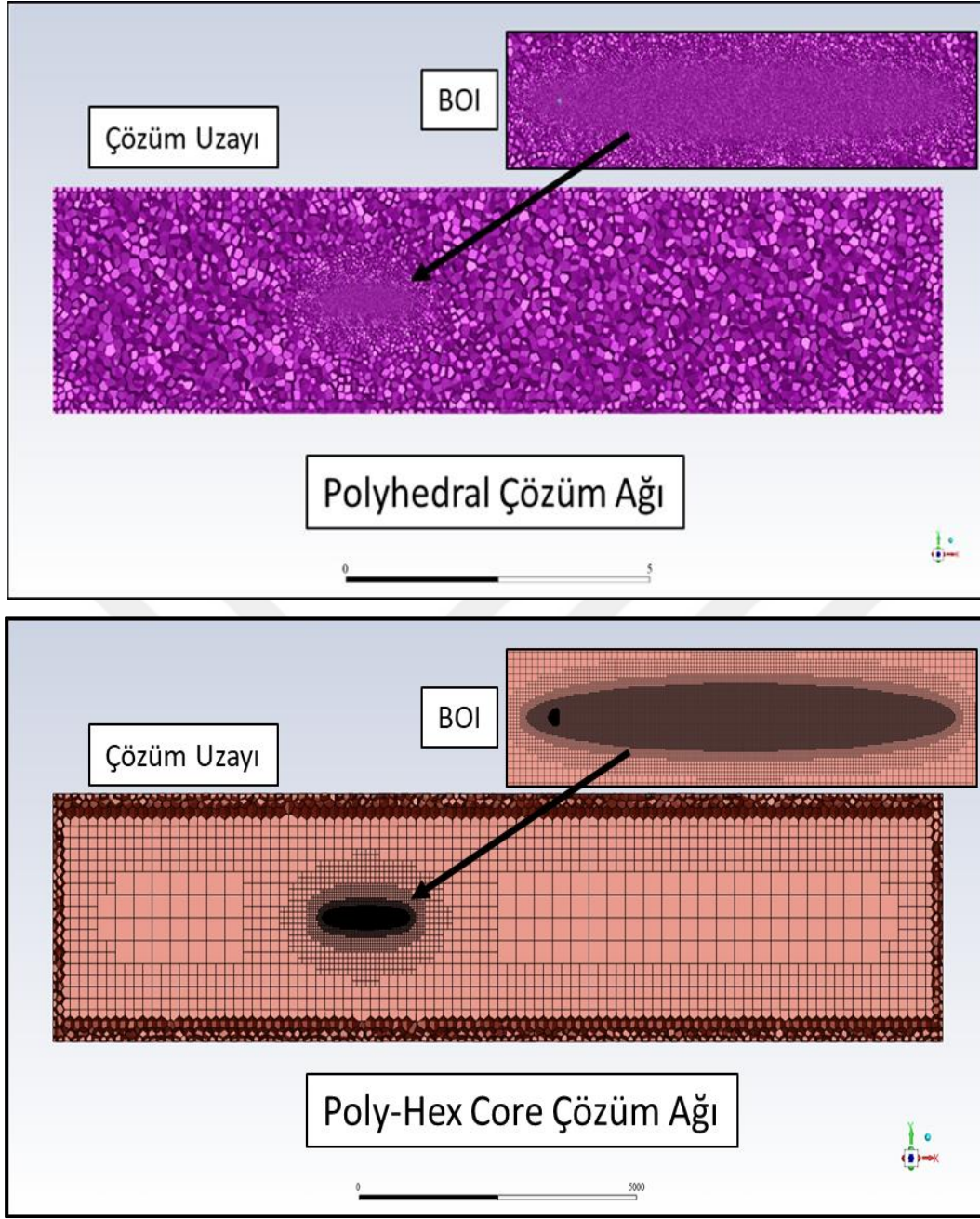
Şekil 6.3: Eliptik BOI hacminin boyutlandırılması.

6.2. Çözüm Ağı Tipinin Belirlemesi

Doğal kaviteasyon rejiminin çözülmesi amacıyla ilk olarak çözüm uzayı ve sınır şartları belirlenmiştir. Sonrasında, bu rejimin doğru bir şekilde gözlemlenebilmesi için HAD analizlerinde kullanılacak olan çözüm ağı tipi belirlenmelidir.

Bu raporda tetrahedral, hex core, polyhedral ve poly-hex core olmak üzere 4 farklı çözüm ağı 3 cm çapında 45 derece yarım açındaki konik bir kavitatör geometrisi üzerinde, 0.04 kavitasyon sayısında, doğal kavitasyon etkisinde HAD analizleri yapılarak incelenmiştir. Çözüm ağları incelenirken çözüm uzayı geometrisinin etkisi de sisteme dâhil edilmiştir. Bu kapsamda silindirik çözüm uzayı, dikdörtgen prizma çözüm uzayı” ve mermi tipi çözüm uzayı olmak üzere 3 farklı çözüm uzayı tipi, 4 farklı çözüm ağı için incelenmiştir. Bu incelemeler çarpıklık, ortogonal nicelik ve hücre sayısı gibi kıstaslar dikkate alınarak yapılmıştır.





Şekil 6.4: 4 farklı tipteki çözüm ağı modellemesi.

Çözüm ağı tipine bağlı olarak çözüm uzayı geometrisinin belirlenmesi için yapılan HAD analizleri kapsamında, yalnızca tetrahedral çözüm ağı için dikdörtgen prizma çözüm uzayı kullanılması, diğer çözüm ağı tipleri içinse silindirik çözüm uzayı kullanılması kararlaştırılmıştır. Şekil 22’de çözüm ağı tipi belirlenmesi kapsamında gerçekleştirilen HAD analizlerinde kullanılan tetrahedral, hexcore, polyhedral ve poly-hex core olmak üzere 4 farklı tipteki çözüm ağı örnekleri gösterilmiştir.

Çizelge 6.1’de 4 farklı çözüm ağı kullanılarak süperkavitasyon rejiminin doğal kavitasyon karakteristiğinin çözümlenmesi kapsamında yapılan 4 farklı HAD

analizleri sonrasında, benzer çözüm modelleri kullanılarak elde edilen kavitasyon zarfı çapı, uzunluğu ve sürüklenme katsayısı gibi karşılaştırma parametreleri verilmiştir. Aynı zamanda, yapılan literatür araştırmaları sonucunda elde edilen ampirik denklemler, deneysel veriler ve teorik eşitlikler kullanılarak hedeflenen kavitasyon zarfı çapının ve uzunluğunun aralıkları ile hedeflenen sürüklenme katsayısı değerleri de Çizelge 6.1’de gösterilmiştir. Ek olarak, gerçekleştirilen 4 farklı HAD çalışmasında da hedeflenen kavitasyon sayısına ulaşılmıştır.

Literatür verileri kullanılarak elde edilen kavitasyon zarfı çapı ve uzunluğu, bir sayı aralığını temsil edecek şekilde belirlenmiştir. Bu prensibin tercih edilmesinin nedeni, doğal kavitasyon karakteristiğinin incelenmesi üzerine çalışmalar yapmış tek bir bilim insanının elde ettiği sonuçların kullanması yerine, bu konu hakkında literatürde bulunan bütün çalışmalar bir araya toplanarak elde edilen veri havuzunun kullanılmasının daha doğru bir yaklaşım olması düşüncesidir. Aynı zamanda, yapılan HAD çalışmaları sonrasında elde edilen kavitasyon zarfı çapının ve uzunluğunun bu aralık içinde kalması beklenmektedir.

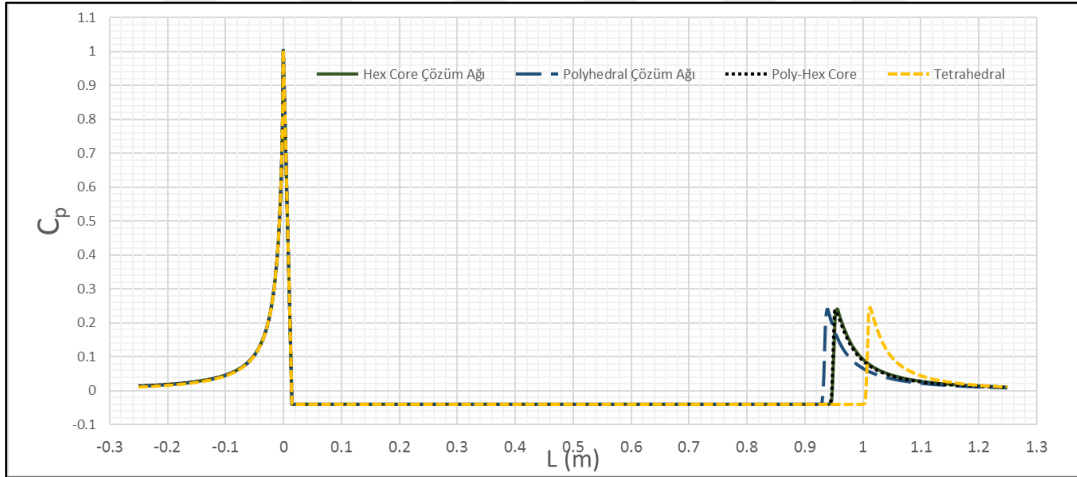
Çizelge 6.1: Doğal kavitasyon karakteristiğinin karşılaştırma parametrelerinin veri havuzuna ve farklı çözümlerdeki HAD analizlerine bağlı sonuçları.

Parametreler / Sonuçlar		Kavitasyon Zarfı Çapı Aralığı		Kavitasyon Zarfı Uzunluğu Aralığı		Sürüklenme Katsayısı
Veri Havuzu Sonuçları		0.10864	0.11347	0.97453	1.01612	0.52452
HAD Sonuçları	Tetrahedral	0.1184841		1.003841		0.5722
	Hex Core	0.1156738		0.944813		0.5671
	Polyhedral	0.1134526		0.929454		0.5659
	Poly-Hex Core	0.1155460		0.945411		0.5655

Çizelge 6.1’de 4 farklı çözüm ağı için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, tüm çözüm ağı tiplerinde HAD analizlerinin yakınsadığı ve tek bir karşılaştırma parametresi dikkate alındığında ufak farklılıklara rastlansa da üç parametreyi de dikkate aldığımızda farklı çözüm ağları için elde edilen sonuçların birbirlerine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Sonuç olarak HAD metotları kullanılarak yapılacak analiz modeli geliştirme ve doğrulama çalışmalarının çözüm ağı tipinden bağımsız bir

şekilde gerçekleştirilebileceği görülmektedir. Yapılan HAD analizlerinde kullanılacak çözüm ağı belirlenirken, çözüm ağının oluşturulmasındaki kolaylık ve maliyet etkinlik gibi durumlar dikkate alınmıştır. Örneğin, çözüm ağı sayısı düşük çözünürlükte olmasına rağmen hızlı ve yeterli sadakatte sonuç veren bir analiz modeli tercih edildiği kavramsal tasarım çalışmalarında polyhedral çözüm ağı, çözüm ağı çözünürlüğü yüksek, daha yavaş ancak daha yüksek sadakatli sonuçların elde edilmesi gerektiği kritik tasarım aşamalarında tetrahedral çözüm ağı tercih edilebilir.

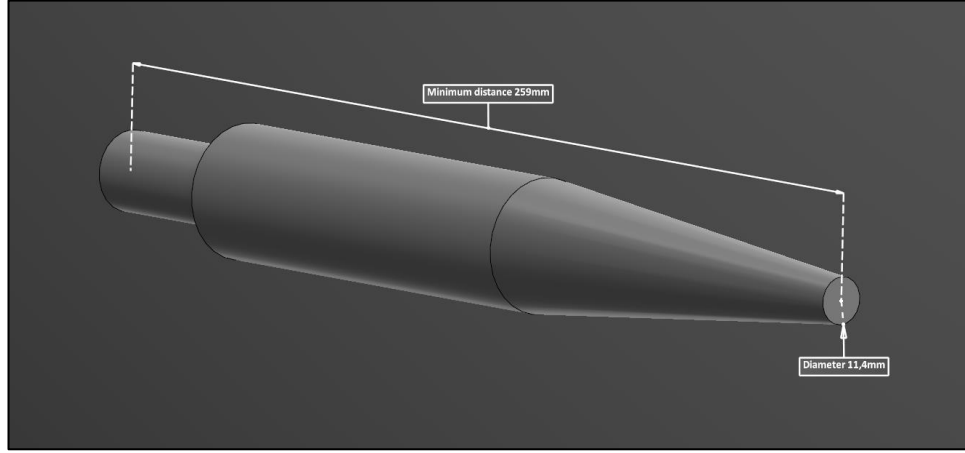
Şekil 6.5'te de 4 farklı çözüm ağı kullanılarak yapılan HAD analizleri sonucunda elde edilen basınç katsayısı dağılımının birimsiz kavitasyon zarfı uzunluğuna bağlı değişimi verilmiştir. Analizlerde incelenen basınç dağılımı kavitatörün yatay eksenı boyunca sahip olduğu basınç katsayısı değeridir. Başlangıç noktası olarak kavitatörün uç kısmı seçilmiştir.



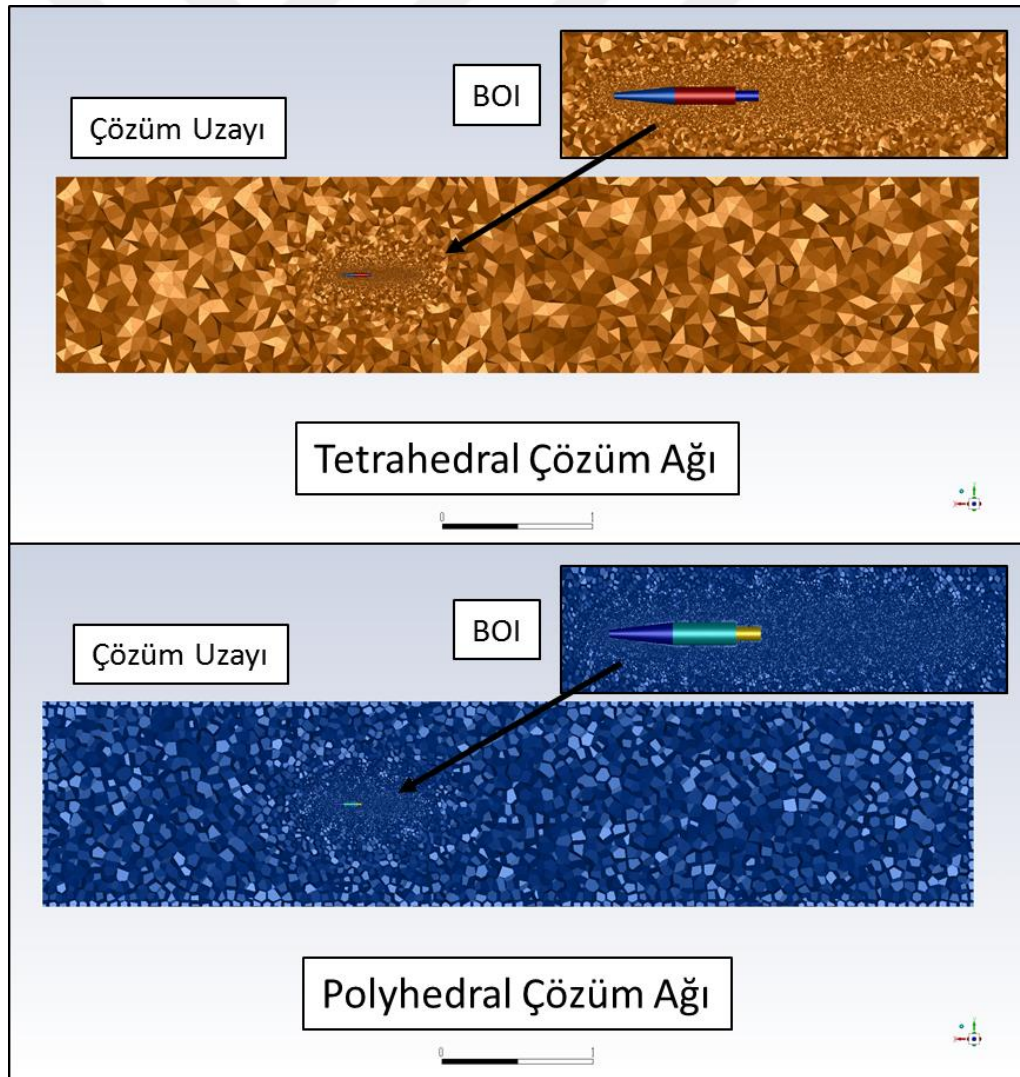
Şekil 6.5: Birimsiz kavitasyon zarfı uzunluğuna bağlı basınç katsayısı dağılımının 4 farklı çözüm ağına göre değişimi.

Çözüm ağı sayısı bakımından en az ekonomik tip olan tetrahedral tipi, karmaşık geometrilerde en iyi çözümü sunmaktadır. Polyhedral çözüm tipi ise tetrahedral tipine göre daha ekonomik olması ile birlikte arı peteği yüzey yapısından ötürü diğer tiplere göre türbülanslı akışları daha iyi modelleme kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle tetrahedral ve polyhedral çözüm ağı tiplerinin daha karmaşık bir geometri olan torpedo geometrisi üzerinde doğal kavitasyon etkisini de içinde barındıracak şekilde incelemek için 75 m/s hızda ve 0.04 kavitasyon sayısında HAD analizleri yapılmıştır. Buradaki amaç çözüm ağlarının daha karmaşık geometriler üzerindeki çözüm kabiliyetini gözlemlemektir. Şekil 6.6'da 2 farklı çözüm ağı için HAD analizleri yapılacak kontrol

yüzeyleri çıkarılmış torpido geometrisi verilmiştir. Şekil 6.7’de ise tetrahedral ve polyhedral çözüm ağları gösterilmiştir.



Şekil 6.6: 2 farklı çözüm ağı kullanılarak gerçekleştirilen had analizlerindeki torpido geometrisi [55].



Şekil 6.7: Tetrahedral ve polyhedral çözüm ağı tipleri.

2 farklı çözüm ağı için yapılan HAD analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2’de verilmiştir. Çizelge 6.2’den görüldüğü üzere iki çözüm ağı tipi de HAD analizini başarıyla yakınsamış ve birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Tetrahedral çözüm ağı, kavitasyon zarfı çapı ve sürüklenme katsayısı değerleri için diğer çözüm ağı tipleri ile benzer çözümler sunsa da kavitasyon zarfı uzunluğunu diğer çözüm ağı tiplerine göre daha iyi çözmektedir. Ekonomik bir tipi olmasa da yapılacak olan HAD çalışmalarında tetrahedral çözüm ağı tipi kullanılmıştır. Ancak, polyhedral çözüm ağı tipi daha ekonomik bir tipi olmasından ve literatürde yer alan karşılaştırma parametrelerini düşük bir hata ile tahmin edebilmesinden ötürü sık analizlerin yapılacağı veritabanı üretme gibi çalışmalarda zaman etkin olması açısından alternatif tip olarak tercih edilebilir.

Çizelge 6.2: Karşılaştırma parametrelerinin veri havuzuna ve farklı çözümlerdeki HAD analizlerine bağlı sonuçları.

Parametreler / Sonuçlar		Kavitasyon Zarfı Çapı Aralığı		Kavitasyon Zarfı Uzunluğu Aralığı		Sürükleme Katsayısı Aralığı
Veri Havuzu Sonuçları		0.04929	0.05481	0.45001	0.49084	0.8476
HAD Sonuçları	Tetrahedral	0.05129734		0.445688		0.8606
	Polyhedral	0.05170032		0.436819		0.8563
İki HAD Arası Fark (%)		0.7856		1.99		0.4997

Çözüm ağı tipi belirleme çalışmasının amacı, doğal kavitasyon etkisindeki bir süperkavitasyon rejiminin çözümlenmesine olanak sağlayan çözüm ağı tiplerini belirlemek ve sonrasında belirlenen tiplerden en uygun olanını yapılacak HAD analizi çalışmalarında kullanmak üzere seçmektir. Bu şekilde HAD analizi yapılacak olan geometri üzerinde doğru sonuçların elde edilebileceği çözüm ağı alternatiflerine sahip olunacaktır. Bu kapsamda incelenen 4 farklı çözüm ağı tipinin HAD analizlerini düşük bir hata ile hesapladığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle 4 çözüm ağı tipinin de sayısal analiz modeli geliştirilmesi ve doğrulanması kapsamında yapılacak çalışmalarda bir alternatif olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Raporun bundan sonraki aşamalarında kullanılmak üzere 4 alternatif üzerinden tetrahedral çözüm ağı tipi tercih edilmiştir.

6.3. Çözüm Ağı Yoğunluğunun Belirlenmesi

Bu bölümde süperkavitasyon rejiminin doğal kavitasyon karakteristiğinin HAD analizleri kullanılarak metot geliştirmesi ve doğrulanması kapsamında, 0.03 metre çapındaki 45 derece yarım açılı bir konik kavitatörün, 75 m/s seyir hızında 0.04

kavitasyon sayısında çözüm ağına bağlılığı incelenmiştir. HAD modelleri için çözüm ağına bağlılık çalışmasının yapılmasının nedeni planlanan akış analizlerini yeterli seviyede verimli ve güvenilir kılmaktır. Bu nedenle yukarıda belirtilen şartlarda aynı çözüm uzayı için farklı yoğunluklarda 4 adet çözüm ağı oluşturulmuştur. Bu sayede belirlenen çözüm ağı yoğunluğuna özgü olarak yapılan HAD analizlerini en kısa sürede çözebilecek ve aynı zamanda yüksek sadakatli sonuçları verecek çözüm ağı yoğunluğu belirlenecektir. Çizelge 6.3'te WATERTIGHT programı kullanılarak elde edilen çözüm ağları artan yoğunluğuna göre sıralanmış ve oluşturulan çözüm ağlarının özellikleri verilmiştir.

Çizelge 6.3: Farklı yoğunluktaki 4 çözüm ağının özellikleri.

Çözüm Ağı Özellikleri/Çözüm Ağları	Çözüm Ağı 1	Çözüm Ağı 2	Çözüm Ağı 3	Çözüm Ağı 4
Çözüm Ağı Tipi	Tetrahedral			
Çözüm Ağı Sayısı	414082	3370415	9142382	23205133
Maksimum Çarpıklık	0.914	0.932	0.868	0.938
Ortogonal Nicelik	0.05	0.05	0.09	0.05
Ortalama Yüzey Çözüm Ağı Büyüklüğü (mm^2)	0.81976	0.10393	0.03834	0.00432
Ortalama Hacim Çözüm Ağı Büyüklüğü (mm^3)	482206.7	59242.9	21840.4	8604.7

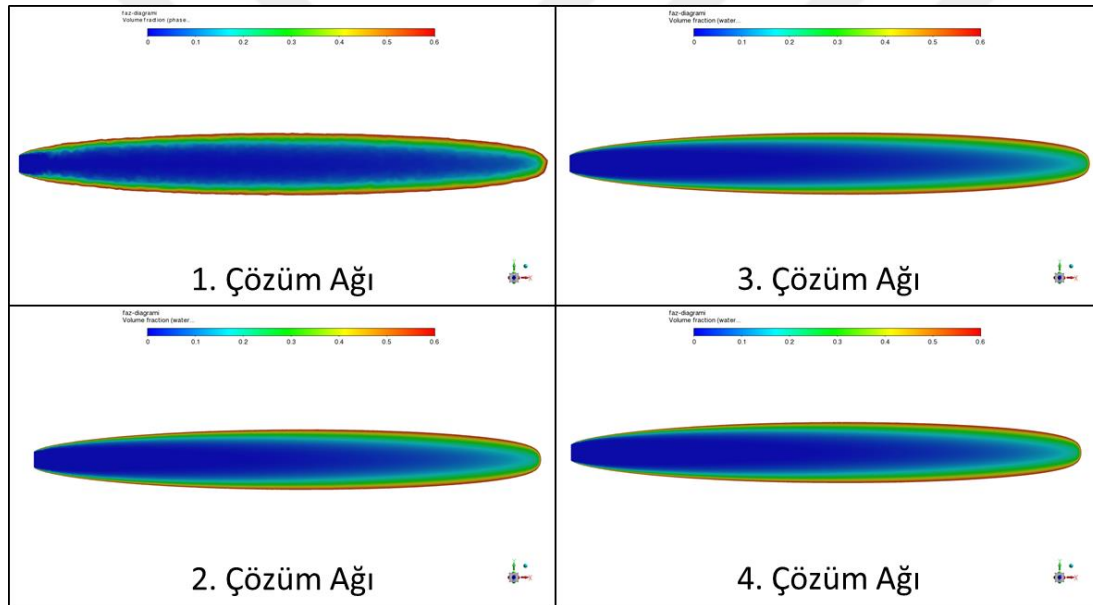
Oluşturulan 4 farklı yoğunluktaki çözüm ağları belirlenen seyir koşullarında ve kavitasyon sayısında 45 derece konik açılı bir kavitatör üzerinde süperkavitasyon rejiminin etkisinde incelenmişlerdir. Gerçekleştirilen HAD analizleri sonrasında elde edilen süperkavitasyon rejimi doğrulama parametreleri Tablo 4'te verilmiştir. Ek olarak Çizelge 6.4'te literatürden elde edilen veriler kullanılarak elde edilen kavitasyon zarfı parametreleri de verilmiştir.

Çizelge 6.4 incelendiğinde, elde edilen kavitasyon zarfı parametrelerinin 4 farklı yoğunluktaki çözüm ağı için de birbirlerine benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Ancak, çözüm ağı sayısı azaldıkça BOI çözünürlüğü de azaldığı için kavitasyon zarfı geometrisi üzerinde bozulmalar başlamaya ve geometri eliptik yapısını kaybetmeye

başlamaktadır. Şekil 26’da 4 farklı çözüm ağı yoğunluğu için de yapılan HAD analizleri sonucunda elde edilen kavitasyon zarfı geometrileri gösterilmiştir.

Çizelge 6.4: 4 farklı çözüm ağı için gerçekleştirilen HAD analizi sonucundan elde edilen zarf parametreleri.

Kavitasyon Zarfı Parametreleri	Çözüm Ağı 1	Çözüm Ağı 2	Çözüm Ağı 3	Çözüm Ağı 4	Literatür [33]	
Sürüklenme Katsayısı	0.57302	0.57509	0.57515	0.57302	0.52452	
Kavitasyon Zarfı Uzunluğu (m)	0.96492	1.01012	1.01732	1.01398	0.97453	1.01612
Kavitasyon Zarfı Çapı (m)	0.11087	0.11854	0.11951	0.11917	0.10864	0.11347



Şekil 6.8: 4 farklı çözüm ağı yoğunluğunda HAD analizleriyle elde edilen kavitasyon zarfları.

Şekil 6.8 incelendiğinde Çözüm Ağı 1’in kavitasyon zarfı geometrisinde bozulmalar görülmektedir. Yapılan HAD analizlerinde sonuçların benzer olmasının nedeni 45 dereceli konik kavitatörün arkasında kavitasyon zarfının dışına çıkabilecek bir geometri olmamasıdır. Gelişmiş bir kavitasyon zarfı içerisinde kontrol yüzeylerinin bir kısmının kavitasyon zarfı dışına çıktığı bir geometri değerlendirildiğinde çözüm ağı yoğunluğunun düşük olmasından kaynaklı zarf yüzeyinde oluşacak bozuntular süperkavite su altı aracı üzerindeki kuvvet ve moment değerlerini etkileyecektir. Bu durumda elde edilen sonuçların sadakati düşük olacaktır. Çözüm ağından bağımsızlık

çalışması kapsamında 4 farklı yoğunluktaki çözüm ağları değerlendirildiğinde çözüm süresi ve sadakat seviyesi bakımından en iyi çözümü sunan çözüm ağı yoğunluğunun Çözüm Ağı 2'deki gibi olması beklenmektedir. Buna kapsamda gerçekleştirilecek HAD analiz modeli geliştirilmesi kapsamında çözüm ağı sayısının 3 milyon civarında ve kavitasyon rejiminin gözlemlenmeye başladığı bölge olan kavitatör etrafındaki ortalama yüzey çözüm ağı büyüklüğünün de 0.1 mm^2 mertebesinde olması beklenmektedir.

İleriki çalışmalarda oluşturulacak olan çözüm uzayı ve BOI ölçüleri farklılık gösterebileceği için de alınan referansa kıyasla benzer çözünürlükte kalmak kaydıyla çözüm ağı sayısında artış veya azalış olabilir.

6.4. Türbülans Modelinin Belirlenmesi

Süperkavitasyon rejiminde doğal kavitasyon karakteristiğinin çözümlenmesine yönelik yapılan HAD analizlerinde ANSYS FLUENT 19.5 ve ANSYS 20.1 programları kullanılmıştır. ANSYS literatüründe türbülans modelinin çözülmesine yönelik kullanılabilecek en temel modeller ile bu modellerin davranışları ve kullanım şekilleri aşağıda listelenmiştir. Listelenen bütün modeller RANS temelli modellerdir ve listede aşağı yönlü ilerledikçe iterasyon başına harcanan hesaplama zamanı artmaktadır. Ayrıca Realizable $k - \varepsilon$ ve SST $k - \omega$ modelleri ANSYS tarafından en fazla tavsiye edilen modellerdir [56].

- Tek Denklem Çözen Modeller:

- *Spalart – Allmaras*: Ekonomiktir. Orta karmaşıklıkta (quasi-2D) iç/dış akış ve basınç gradienti etkisindeki sınır tabaka akışı problemlerinin çözümünde kullanılabilir. 3D akışlarda, serbest kayma akışlarında ve güçlü akım ayrılması olan akışlarda düşük performanslıdır. Bu nedenle türbülans modelinin belirlenmesi çalışmasında denenmesi planlanan modellerde yer almamaktadır.

- İki Denklem Çözen Modeller:

- *Standard $k - \varepsilon$* : Birden fazla basınç gradyanı ve/veya akım ayrılması içeren akışlarda düşük performanslıdır. Ayrıca, yüksek eğriliğe sahip akım çizgilerinin oluşması beklenen akışlarda da düşük performansta çözüm sunar. Bu türbülans modeli parametrik çalışmalarda, alternatif

tasarım süreçlerinde veya türbülans modellemesinin ilk aşamalarında hızlı sonuç vermesinden ötürü tercih edilmektedir.

- *RNG $k - \varepsilon$* : Genel olarak Realizable $k - \varepsilon$ modeliyle benzer uygulamalarda kullanılır. Realizable $k - \varepsilon$ modelinden farkı RNG $k - \varepsilon$ modelinin Realizable $k - \varepsilon$ ile kıyaslandığında daha zor yakınsamasıdır.
- *Realizable $k - \varepsilon$* : Orta derecede girdaplar ve/veya vorteksler, ani gerilmeler ve bölgesel türbülansa geçişler içeren karmaşık kayma akışları için kullanılabilir. Bazı uygulama alanları aşağıdaki verilmiştir.
 - ✦ Sınır tabaka ayrılmalarının incelenmesi,
 - ✦ Yoğun akım ayrılmaları içeren akışların incelenmesi,
 - ✦ Akım ayrılmasına neden olabilecek cisimlerin arkasında oluşturdukları vorteks salımlı akışların incelenmesi,
 - ✦ Havalandırma odalarının incelenmesi,
 - ✦ Geniş açılı difüzörlerde perdövitesin incelenmesi vb.
- *Standard $k - \omega$* : $k - \varepsilon$ modellerine göre, duvar üzerinde oluşacak sınır tabaka çözümlerinde, serbest kayma akışlarında ve düşük Reynolds Sayılı akışlarda daha yüksek performans sunmaktadır. Bu model, aerodinamik ve turbomakine uygulamalarında, ters basınç gradienti ve akım ayrılması etkisinde, karmaşık sınır tabaka çözümleri yapabilme kabiliyetine sahiptir. Bu modelin dezavantajı ayrılmayı daha geniş çapta ve olması gerektiğinden daha erken tahmin etme ihtimalini bulundurmasıdır.
- *SST $k - \omega$* : Genel olarak Standard $k - \omega$ modeli ile benzer uygulamalarda kullanılır. Ancak bu model, “Inlet” tipi sınır koşullarına Standard $k - \omega$ modeli kadar duyarlı değildir. SST $k - \omega$ modelini diğer bütün RANS modellerinden ayıran şey ise akım ayrılmalarını daha hassas bir şekilde tahmin edebilmesidir.
- *Reynolds Stress Modeli*: Fiziksel olarak en doğru sonuçlar sunan RANS modelidir. İzotropik Eddy Viskozitesi varsayımını kullanmamaktadır. Çözüm sunabilmek için daha fazla CPU zamanına ve hafızaya ihtiyaç duyar. Çözdüğü denklemlerin birbiri ile bağlantılı olmasından ötürü yakınsaması diğer

modellere göre daha zordur. Bu model, yüksek eğriliğe sahip akım çizgilerinin oluşması beklenen akışlarda, güçlü girdapların ve dönüşlerin gözlemleneceği akışlarda, eğimli kanal akışlarında, dönümlü akış geçitlerinde her türlü karmaşık 3D akış rejimi için çözüm sunmaktadır.

- Transition Modelleri:
 - $k - \epsilon - \omega$
 - SST

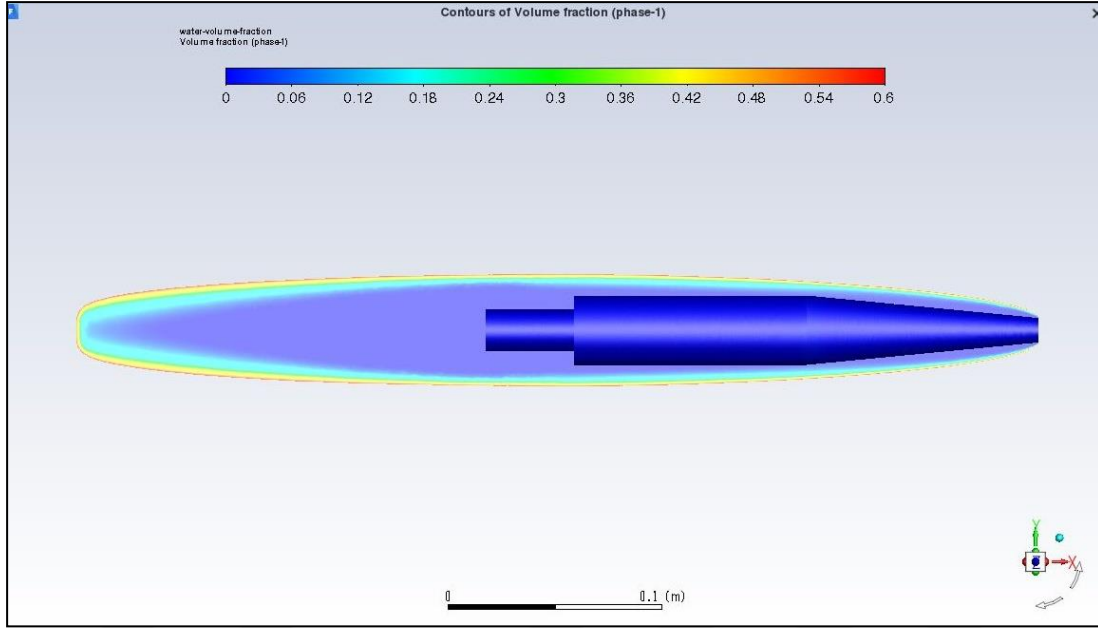
RANS temelli olmayan benzetim modelleri de aşağıda listelenmiştir.

- Large Eddy Simulation (LES)
- Detached Eddy Simulation (DES)

Bu çalışma kapsamında zamandan bağımsız bir dış akış modellemesi yapılacağı için geçiş ve benzetim modelleri türbülans modelinin belirlenmesinde kullanılmamıştır. Realizable $k - \epsilon$, $SST k - \omega$ ve Reynolds Stress modelleri üzerinden bir türbülans modeli belirlenmesi çalışması yapılmıştır. Realizable $k - \epsilon$ ve $SST k - \omega$ modellerinin tercih edilmesinin nedeni akım ayrılmalarını en iyi şekilde modelleme kabiliyetine sahip iki denklemlilik türbülans modeli çözücüsü olmalarındandır. Bu modellere ek olarak Reynolds Stress modelinin de tercih edilmesinin nedeni zamandan bağımsız akış analizlerinde en iyi sonucu sunmasıdır. Ancak, ihtiyaç duyduğu işlemci hacminin büyük olmasının ve analiz sürecince 7 tane denklem çözmesinden ötürü yakınsamasının zor olmasının büyük bir dezavantaj olduğu değerlendirilmektedir.

Türbülans modelinin belirlenmesi amacıyla yukarıda belirtilen üç adet türbülans modeli, 3 cm çapında 45 derece yarım açılı bir konik kavitatör ve Şekil 24'te verilen kontrol yüzeyleri bulunmayan ölçekli bir torpido geometrisi olmak üzere iki farklı geometri üzerinde, 0.04 kavitasyon sayısında çözümlenmeye çalışılmıştır. Toplamda yapılan 6 adet akış analizinin hepsi başarıyla yakınsanmış ve elde edilen sonuçlar incelendiğinde türbülans modelleri ve literatürdeki veriler arasında tutarlılık gözlemlenmiştir.

Şekil 6.9'da kontrol yüzeyleri olmayan örnek torpido modeli üzerinde belirlenen seyir koşullarında $SST k - \omega$ türbülans modeli kullanılarak elde edilen HAD analiz sonucu verilmiştir. Çizelge 6.5'te ve Çizelge 6.6'da ise iki farklı kavitatör geometrisine sahip torpido modeli için toplamda 6 adet akış analizi sonuçları ile literatür araştırması sonucu elde edilen ampirik denklemlerden yararlanılarak aynı şartlarda oluşması beklenen kavitasyon zarf geometrisi ölçüleri ve sürüklenme katsayısı değerleri verilmiştir [33].



Şekil 6.9: Kontrol yüzeyleri olmayan torpido modeli üzerinde su fazı yüzdesi dağılımının 2D gösterimi.

Çizelge 6.5: 45 Derece yarım açılı konik kavitatöre sahip model için literatür ve HAD sonuçları.

Sonuçlar	Zarf Çapı (m)		Zarf Uzunluğu (m)		Sürüklenme Katsayısı
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	
Literatür Verileri	0.108636	0.113467	0.974528	1.016121	0.52452
<i>Realizable k – ε</i> - HAD	0.1177046		0.998769		0.57642
<i>SST k – ω</i> - HAD	0.1182822		1.003816		0.57526
Reynold Stress - HAD	0.1179101		1.045194		0.57393

Çizelge 6.6: Şekil 27’da verilen disk kavitatöre sahip model için literatür ve HAD sonuçları.

Sonuçlar	Zarf Çapı (m)		Zarf Uzunluğu (m)		Sürüklenme Katsayısı
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	
Literatür Verileri	0.049286	0.054811	0.450013	0.490844	0.84760
<i>Realizable k – ε</i> - HAD	0.05292386		0.4444506		0.86459
<i>SST k – ω</i> - HAD	0.05243384		0.4508649		0.86093
Reynold Stress HAD	0.05390044		0.4617065		0.87043

İki denklemlili türbülans modeli olan Realizable $k - \epsilon$ Türbülans Modeli sınır tabaka üzerindeki akış ayrılmasının daha iyi gözlemlenmesi amacıyla Enhanced Wall Treatment seçeneği açılarak çözümlenmiştir. Çözüm modelini daha doğru çözümlmek amacıyla da $y +$ değerin 5'ten küçük olması hedeflenmiş ve olabildiğince 1'e yaklaştırılmaya çalışılmıştır. Bu durum çözüm ağı hacminde artışa ve başarı ile yakınsama elde edilse de yakınsama sürecinde zorluklara yol açmıştır. Ayrıca, yukarıdaki iki tablo değerlendirildiğinde, kavitasyon zarf uzunluğu ve çapı değerlerinin diğer iki analiz modeline göre daha yüksek hata payı barındırdığı ve sürüklenme katsayısı değerin de yine iki analiz modeline göre daha uzak sonuçlar verdiği görülmektedir. Kullanılan bir diğer model olan, Reynold Stress modelinin çok fazla işlem hacmine ihtiyaç duyması, yakınsama sürecinde zorluklara yol açması ve SST $k - \omega$ modelinin Reynold Stress modeline yakın sonuçlar vermesi nedeniyle türbülans modelinin belirlenmesi kapsamında SST $k - \omega$ modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. Türbülans modeli olarak SST $k - \omega$ modelinin tercih edilmesindeki bir diğer neden ise $y +$ değerin 5 dolaylarında bu model için iyi sonuçlar vermesi ve buna bağlı olarak çözüm ağına olan bağımlılığın azalmasıdır.

Bu bölümde iki farklı kavitatör geometrisi ve 3 farklı türbülans modeli için toplamda 6 adet akış analizi literatürdeki verilerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak işlemci hacminin ve çözüm ağına olan bağımlılığın düşük olması ile birlikte en önemlisi literatür verilerine yakın sonuçlar elde etmesi nedeniyle SST $k - \omega$ modeli süperkavitasyon rejiminde doğal kavitasyon karakteristiğinin HAD analizleriyle çözümlenmesi kapsamında ihtiyaç duyulan türbülans modeli olarak belirlenmiştir.

6.5. Çok Fazlı Modelin ve Kavitasyon Modelinin Belirlenmesi

Süperkavitasyon rejiminin çözümlenmesi kapsamında gerçekleştirilecek HAD analizlerinde kavitasyon dinamiğini çözebilen yeni bir modellemenin çözüm metoduna dâhil edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda birden çok fazın çözümlenmesine olanak sağlayan Çok fazlı modelleme modülü kullanılmalıdır. Bu modül kavitasyon dinamiğini çözümleyebilen üç farklı çözüm modeline sahiptir. Bu modeller VOF, Mixture ve Euler çok fazlı modelleridir. Kavitasyon dinamiğinin modellenmesinde, VOF modelinden Euler modeline gidildikçe elde edilen HAD çözümlerinin sadakati artmakla birlikte modellemenin karmaşılaşmasından ötürü iterasyon başına düşen süre artmakta ve çözümü yakınsamak zorlaşmaktadır.

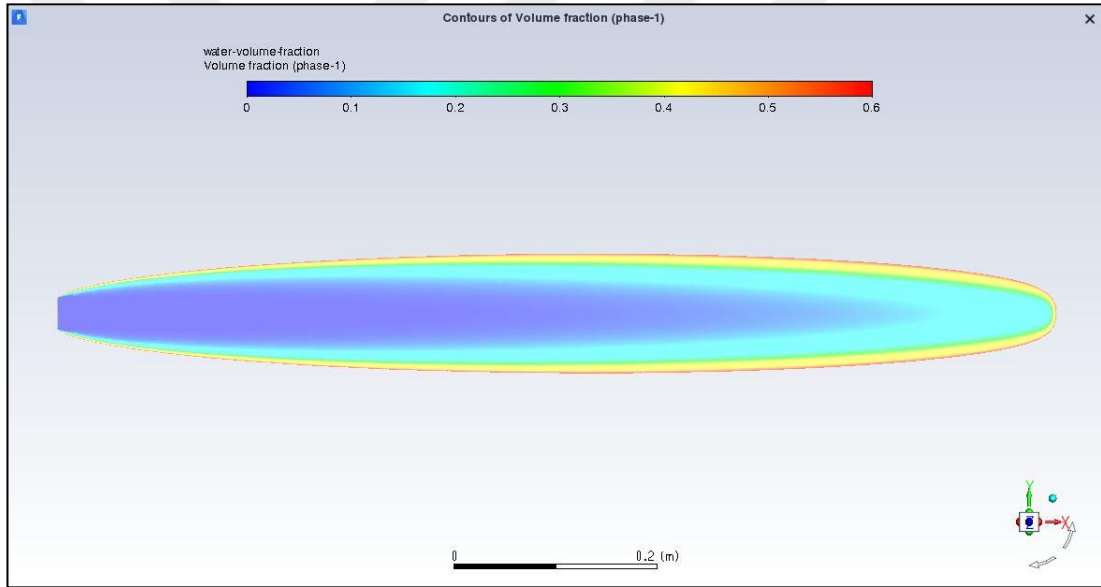
İlk bakışta Euler çok fazlı modeli daha geniş alanda kullanabilmesi ve yüksek sadakatli çözümler sunması kabiliyetlerinden ötürü diğer modellere göre daha tercih edilebilir durmaktadır. Ancak, HAD analizleri yapılırken çözümlenmesi beklenen model ne kadar karmaşık olursa analizin yakınsanması da o kadar güç olacaktır. Süperkavitasyon analizleri de yüksek hızlarda çok miktarda faz değişimi barındırmasından dolayı çözümlenmesi oldukça karmaşık olan yakınsanması zor analizlerdir. Bu nedenle gerçekleştirilecek HAD analizlerinde yakınsaması daha kolay olan ve daha hızlı sonuç verebilen VOF ve Mixture modelleri kullanılmıştır. VOF ve Mixture modelleri de kavitasyon dinamiğinin çözümlenmesi kapsamında gerçekleştirilen analizlerde sunduğu sonuçlar bakımından sadakat seviyesi yüksektir.

Bu nedenle VOF ve Mixture modelleri bu rapor kapsamında incelenmiş, Euler modeline ise yer verilmemiştir. Doğal kavitasyonu çözümlmek amacıyla için 3 cm çapında ve 1 cm genişliğinde bir disk kavitatör üzerinde 0.04 kavitasyon sayısında iki farklı HAD analizi yapılmıştır. Bu çalışmalar yapılırken de kavitasyon modeli olarak literatürde yer alan, kavitasyon dinamiğinin çözümlenmesi konusunda kabiliyetli Schnerr-Sauer ile Zwart-Gerber-Belamri kavitasyon modelleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak toplamda 4 farklı HAD analizi 2 farklı çok fazlı model ve 2 farklı kavitasyon modeli için gerçekleştirilmiştir. Yapılan 4 farklı analiz sonucunda elde edilen veriler Çizelge 6.7’de gösterilmiştir. Şekil 6.10’da ise Mixture çok fazlı modeli ve Zwart-Gerber-Belamri kavitasyon modeli kullanılarak yapılan HAD analizi sonucunda elde edilen kavitasyon zarfı geometrisi 2D olarak gösterilmiştir. Kavitasyon zarfı geometrisi ifade edilirken su fazının gaz yüzdesinden yararlanılmıştır [60].

Sonuçlar incelendiğinde 4 farklı analiz için de elde edilen değerlerin birbirlerine çok yakın oldukları gözlemlenmiştir. Bu sebeple 4 farklı çözüm tekniği de literatürle uyumlu sonuçları elde etmek için kullanılabilir. Ancak, çözüm süreleri ve yakınsama dereceleri incelendiğinde çok fazlı modellerde Mixture modeli, kavitasyon modellerinde ise Schnerr-Sauer modeli daha verimlidir. Bu aşamada hidrodinamik analiz modeli geliştirilmesi kapsamında yapılacak HAD çalışmalarında Mixture çok fazlı modeli ve Schnerr-Sauer kavitasyon modeli referans model olacak şekilde belirlenmiştir.

Çizelge 6.7: Çok Fazlı Model ve Kaviteasyon Modeli belirlenmesi kapsamında yapılan HAD analizleri sonuçları.

Sonuçlar - HAD Verileri		Zarf Çapı (m)		Zarf Uzunluğu (m)		Sürüklemeye Katsayısı
Çok Fazlı Model	Kaviteasyon Modeli					
VOF	Schner-Sauer	0.11826		1.00228		0.57596
VOF	Zwart-Gerber-Belamri	0.11745		0.99603		0.57492
Mixture	Schner-Sauer	0.11828		1.00382		0.57526
Mixture	Zwart-Gerber-Belamri	0.11751		0.997208		0.57448
Sonuçlar - Literatür Verileri		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Optimum
		0.108636	0.113467	0.974528	1.016121	0.52452



Şekil 6.10: Yapılan HAD analizi sonuçlarına göre elde edilen kaviteasyon zarfı geometrisi.

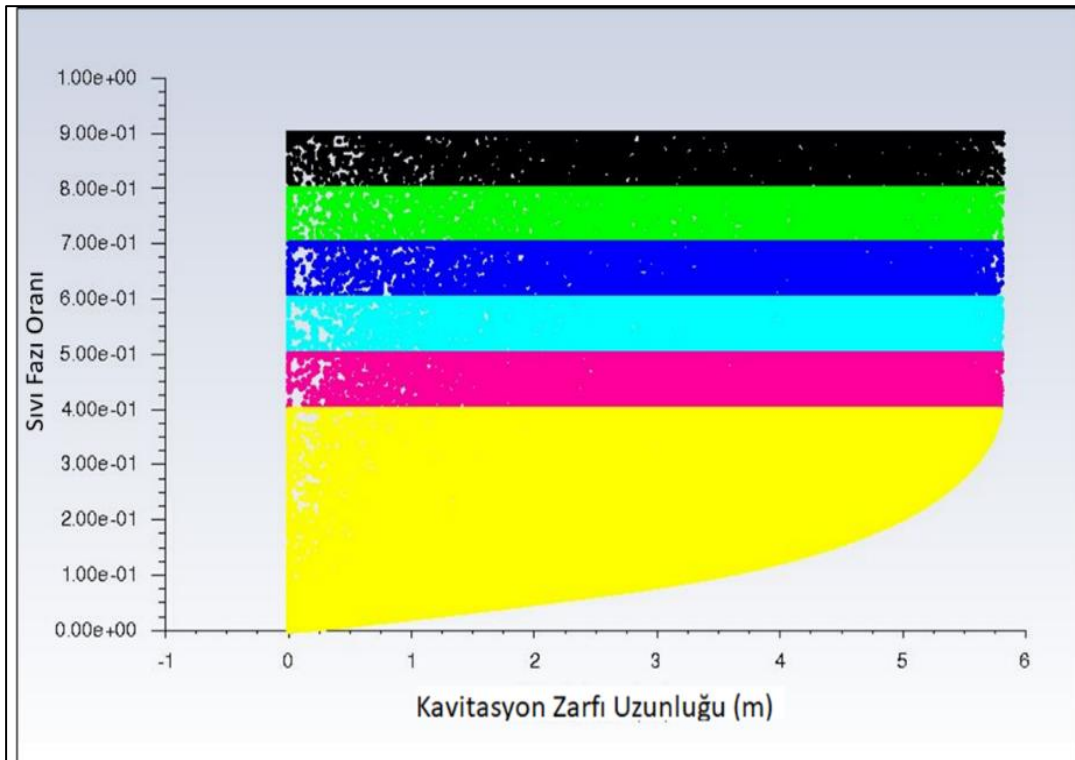
Mixture modeli aynı hızlarda hareket eden ve aralarında güçlü etkileşimler bulunan çok fazlı akışlarda kullanılabilir. Aynı zamanda gaz oranının düşük olduğu kabarcıklı akışlarda da tercih edilmektedir [60]. Schnerr-Sauer ve Zwart-Gerber-Belamri modelleri genel olarak birbirine benzeyen kaviteasyon modelleri olmakla birlikte Schnerr-Sauer modeli sıvı fazında bulunan birim hacimdeki kabarcık sayısını ifade eden buhar (gaz fazı) hacim oranını diğer modellere göre daha farklı şekilde ifade etmiştir. Aynı zamanda, sıvı fazından gaz fazına geçen kütle oranını da daha farklı bir açılımla göstermiştir [60].

6.6. Gaz Yüzdesinin Belirlenmesi

Süperkavitasyon rejiminde doğal kavitasyon karakteristiğinin çözülmesi kapsamında ilk olarak çözüm uzayı ve çözüm ağı belirlenmiştir. Ardından, HAD analizlerini verimli ve doğru bir şekilde gerçekleştirebilmek amacıyla her çözüm uzayına özgü en uygun çözüm ağı çözünürlüğü belirlenmiştir. Bu aşamalar tamamlandıktan sonra HAD modeli kurulmuş ve HAD analizleri yapılmıştır. Analizler tamamlandıktan sonra sonuçlar incelenirken hangi kavitasyon zarfı parametrelerinin hangi kıstaslara göre hangi şartlarda değerlendirileceği önem arz etmektedir.

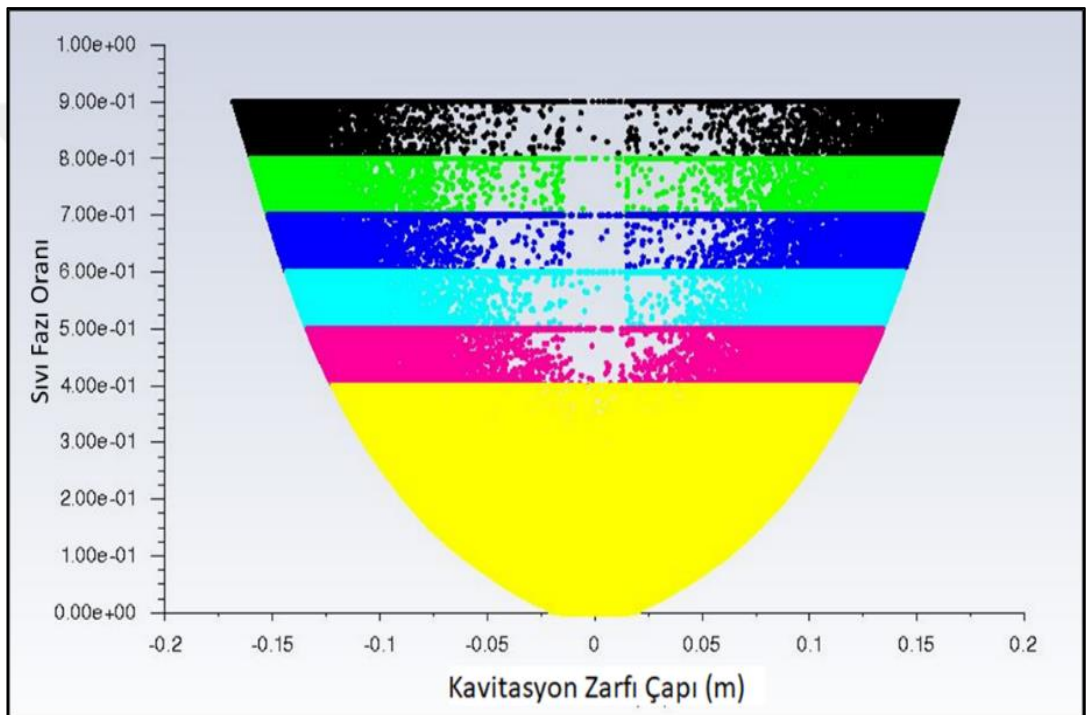
Elde edilen HAD çözümlerinde oluşan kavitasyon zarfı çapı ve uzunluğu parametreleri çok fazlı modelin oluşturulması aşamasında belirlenen sıvı fazının kontör gösterimi ile değerlendirilebilmektedir. Bu aşamada kavitasyon zarfının doğru bir şekilde ifade edilebilmesi amacıyla oluşturulacak olan kontörün hangi sıvı yüzdesi referans alınarak çizdirileceği belirlenmiştir.

Bu amaçla 3 cm çapındaki bir disk kavitatör kullanılarak 0.01 kavitasyon sayısında HAD analizi yapılmıştır. Aşağıdaki grafiklerde de sıvı oranı 0.5'ten (%50 sıvı oranı ile sınırlandırılmış kontör) başlayarak 0.9'a kadar 0.1'er artacak şekilde kavitasyon zarfı çapı ve uzunluğu için ayrı ayrı gösterilmiştir.



Şekil 6.11: Kavitasyon zarfı uzunluğunun sıvı fazı oranına bağlı gösterimi.

Şekil 6.11’de 0.5 sıvı oranından itibaren kavitasyon zarfı uzunluğunun ihmal edilebilecek düzeyde değiştiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.12’de ise literatür verileri üzerinden değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda kavitasyon çapının literatür verileri arasında kalabilmesi hedeflendiğinde çizdirilecek olan kontör için 0.5-0.7 arasında bir sıvı oranı referans alınmalıdır. Bu oran 0.5’ten büyük olduğu için kavitasyon zarfı uzunluğunu belirlemek amacıyla da kullanılabilir. Gaz yüzdesinin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen HAD analizleri verileri kapsamında, 0.6 sıvı oranı için çizilecek kontörün kavitasyon zarfı geometrisini doğru bir şekilde ifade edeceği düşünülmektedir.



Şekil 6.12: Kaviteasyon zarfı çapının sıvı fazı oranına bağlı gösterimi.

6.7. Süperkavitasyon Rejimi Doğal Kaviteasyon Karakteristiğinin HAD Metotları Kullanılarak Doğrulanması

Tez çalışması kapsamında bu bölümde şu ana kadar yapılan bütün çalışmalar süperkavitasyon rejiminin doğal kaviteasyon karakteristiğinin sayısal metotları kullanan FLUENT yazılımı üzerinden doğrulama çalışması yapılabilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tezin ikinci bölümünde sürüklenme katsayısı, kaviteasyon zarfı uzunluğu ve kaviteasyon zarfı çapı gibi süperkavitasyon rejiminin karşılaştırma parametrelerine yer verilmiş ve bu parametrelerin kavitatör çapına ve seyir koşullarına

bağlı olarak değişimi literatür verilerinden faydalanılarak ifade edilmiştir. Literatür verileri bu bölümde yapılacak olan sayısal analizlerin doğrulanması çalışmasında bir karşılaştırma aracı olarak kullanılacaktır. Diğer bölümlerde yapılan çalışmalar ise süperkavitasyon rejiminin çözümlenebilmesi için izlenmesi gereken köşe taşlarıdır. Örneğin, bir sayısal analiz modeli kurmadan önce o analiz modeli için tamamlanması gereken çözüm uzayının, çözüm ağının, çözüm ağı çözünürlüğünün, türbülans ve kavitasyon modelinin belirlenmesi gibi bazı ön adımlar bulunmaktadır. Yapılan ön çalışmalar ile bu ön adımlar tamamlanmıştır.

Tezin bu bölümünde hazırlık ve kurulum aşamalarını tamamlayan analiz modeli literatürdeki verilerle doğrulanmıştır. Bu amaçla yalnızca 45 derece yarım açılı konik kavitatör, disk kavitatör ve disk kavitatöre sahip bir torpido modeli [59] olmak üzere üç farklı geometri üzerinde farklı seyir koşullarında doğal kavitasyon incelenmiştir. HAD analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar literatür araştırması bölümünde disk ve 45 derece yarım açılı konik kavitatörler için oluşturulan veri havuzları ile karşılaştırılmıştır. HAD verileri ile literatür araştırması sonucu elde edilen verilerin aynı eğilimde olması hedeflenmiştir. Doğrulama çalışması yapılırken tek bir bilim insanının elde ettiği ampirik bir ifade ile karşılaştırma yapmaktan kaçınılmış, onun yerine süperkavitasyon alanında çalışmalar yapmış Waid, Reichardt ve McNown gibi birçok bilim insanının elde ettiği deneysel veriler ve teorik çalışmalar kullanılmıştır. Bu sayede hem HAD doğrulama çalışması kapsamında kullanılabilecek veri sayısı artırılmış hem de bilim insanlarının gerçekleştirdikleri test süreçlerinde olabilecek ölçüm hatalarını doğrulama değeri olarak kullanmaktan kaçınılmıştır [33].

HAD çalışmaları kapsamında ilk aşamada 0.03 metre çapındaki yalnızca 45 derece yarım açılı konik kavitatöre ve disk kavitatöre sahip geometriler incelenmiştir. Doğrulama çalışmasında bu iki geometri için kavitasyon sayısı 0.01'den başlayacak şekilde 0.2 değerine kadar toplamda 14 farklı kavitasyon sayısı istasyonu için incelenmiştir. Yalnızca kavitatörden oluşan bu geometriler için toplamda 28 adet HAD analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde disk kavitatör geometrisi için sürüklenme katsayısı hata yüzdesi $<1.82\%$ konik kavitatör içinse $<3.51\%$ mertebesinde dir. Kavitasyon zarfı çapı ve uzunluğu için literatürdeki deneysel veriler sonucunda elde edilen veri aralığı referans alınmakla birlikte HAD analizleri ile elde edilen sonuçların bu aralıkta kaldığı gözlemlenmiştir. Kavitasyon zarfı çapının bu aralığın üst limitinde, uzunluğunun ise alt limitinde yer aldığı da dikkat çekmektedir.

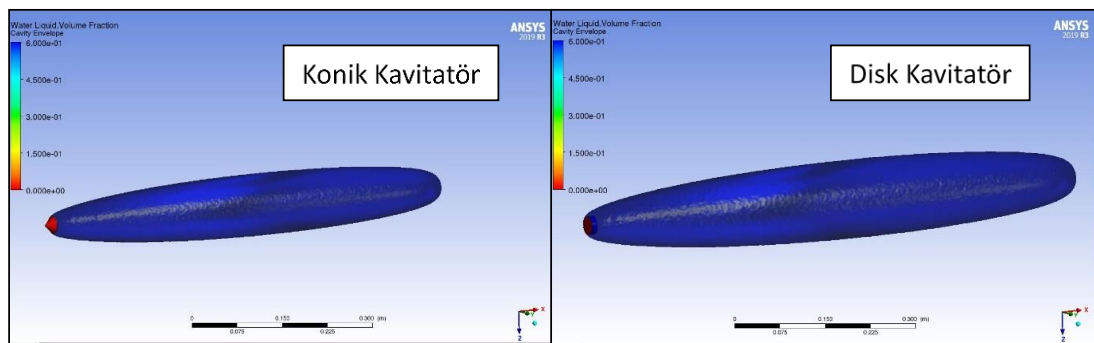
Yapılan çalışmalarda Literatür verilerinden uzaklaşma oranı kavitasyon sayısının artması ile doğru orantılı olarak değişmiştir.

Yalnızca kavitatör incelemesinin tamamlanmasının ardından 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 ve 0.1 kavitasyon sayıları için 0.0114 metre çapındaki disk kavitatöre sahip süperkavite su altı modeli üzerinde toplamda 5 farklı HAD analizi gerçekleştirilmiştir.

0.02 ve 0.04 kavitasyon sayılarında elde edilen sonuçlar literatür verileri ile uyumluluk göstermekte olup sürüklenme katsayısı hata yüzdesi <0.85 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların tez kapsamında Bölüm 2’de elde edilen veri havuzu ile uyumluluk gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak, 0.06, 0.08 ve 0.1 kavitasyon sayısı değerleri için sürüklenme katsayısı ve kavitasyon zarfı uzunluğu parametreleri bir karşılaştırma ölçütü olarak ele alınamamıştır. Bunun nedeni artan kavitasyon sayısına bağlı olarak kavitasyon zarfının geometriyi kapatamaz hale gelmesi ve değerlerin karşılaştırılmaz seviyede olmasıdır. Kavitasyon zarfının geometriyi kapatamaması sonucunda ıslak alan etkileri artmış ve buna bağlı olarak sürüklenme kuvvetinde artışlar olmuştur. Kavitasyon zarfı çapı ise kavitasyon zarfının kapanamaması koşulundan etkilenmemiştir. Bu nedenle literatürdeki değerlerle karşılaştırılabilmiştir.

Gizlilik kapsamında elde edilen sayısal veriler paylaşılmamıştır. Yalnızca şekiller üzerinde HAD sonuçları ile literatür verileri karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiştir.

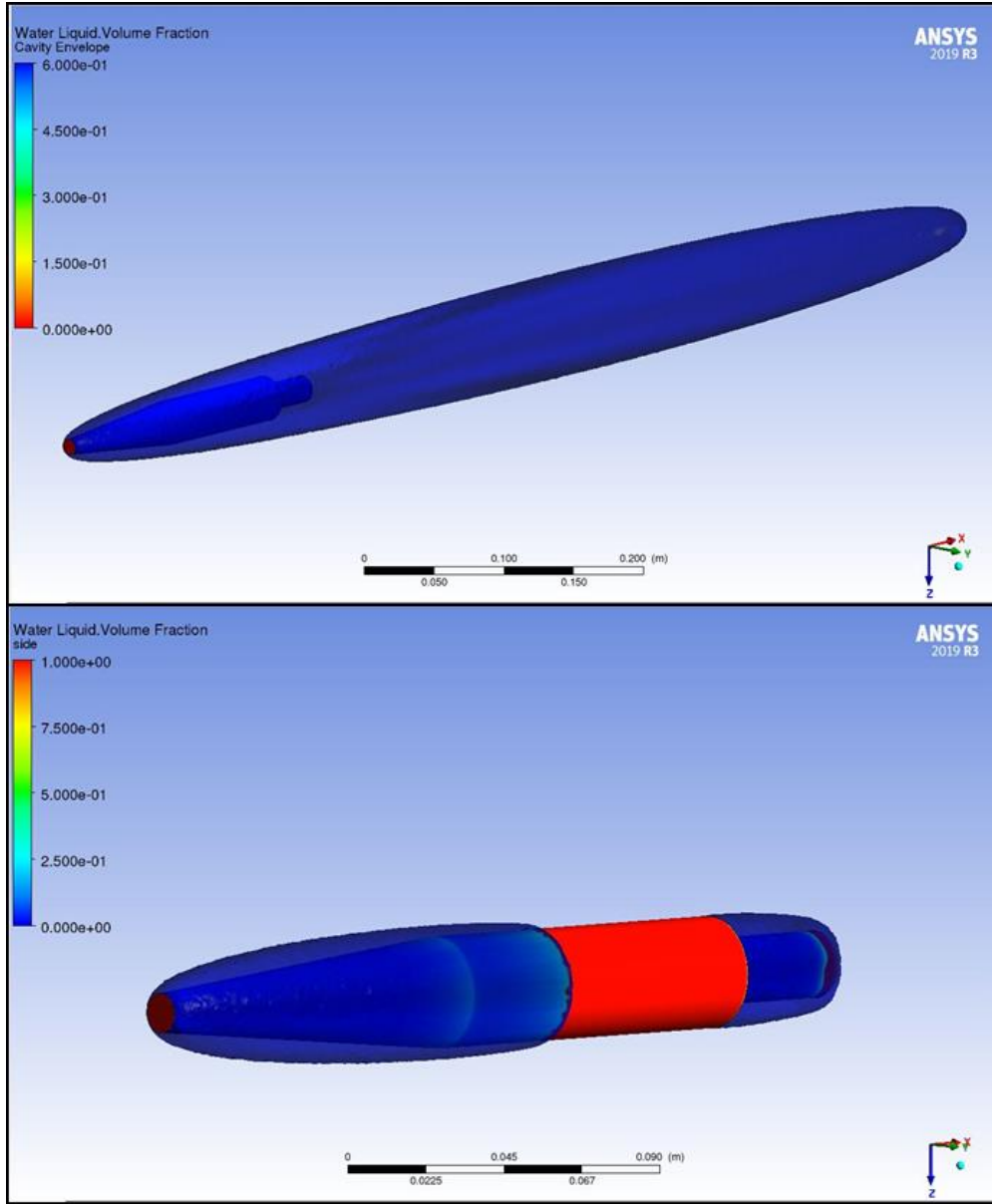
Şekil 6.13’te 0.03 kavitatör çapında ve aynı kavitasyon sayısında farklı kavitatör tipleri için yapılan HAD analizleri kapsamında elde edilen kavitasyon zarfları gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde disk kavitatörün 45 derece yarım açılı konik kavitatöre göre daha uzun ve daha geniş bir kavitasyon zarfı geometrisi oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 6.13: 0.05 kavitasyon sayısında 45 derece yarım açılı konik kavitatör ve disk kavitatör için elde edilen zarf geometrileri.

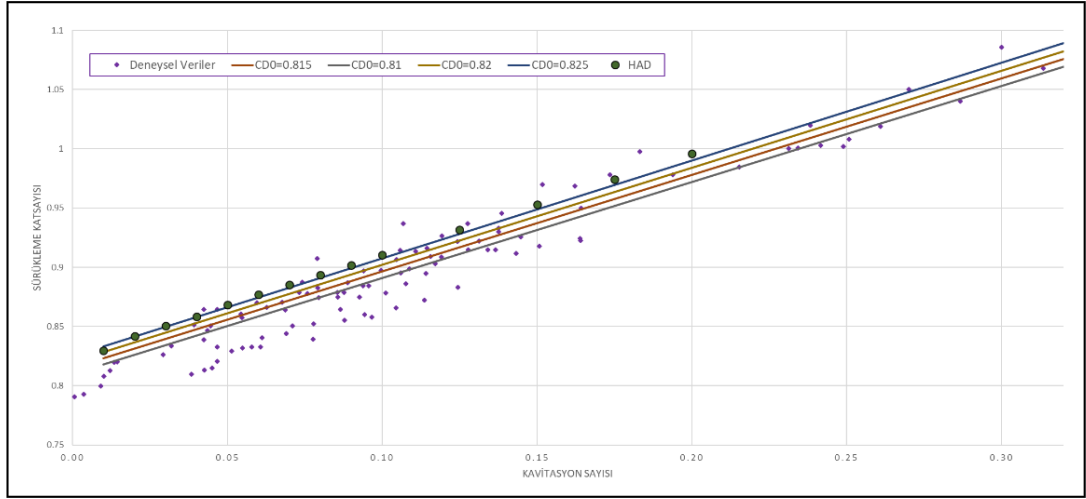
Şekil 6.14’te ise 0.02 ve 0.08 kavitasyon sayılarında disk kavitatöre sahip torpido modeli üzerinde yapılan HAD analizleri sonucunda elde edilen kavitasyon zarfı geometrileri

gösterilmiştir. Farklı iki kavitasyon sayısının tercih edilmesinin nedeni artan kavitasyon sayısına bağlı olarak ıslak alan etkisini gözlemlemektir.

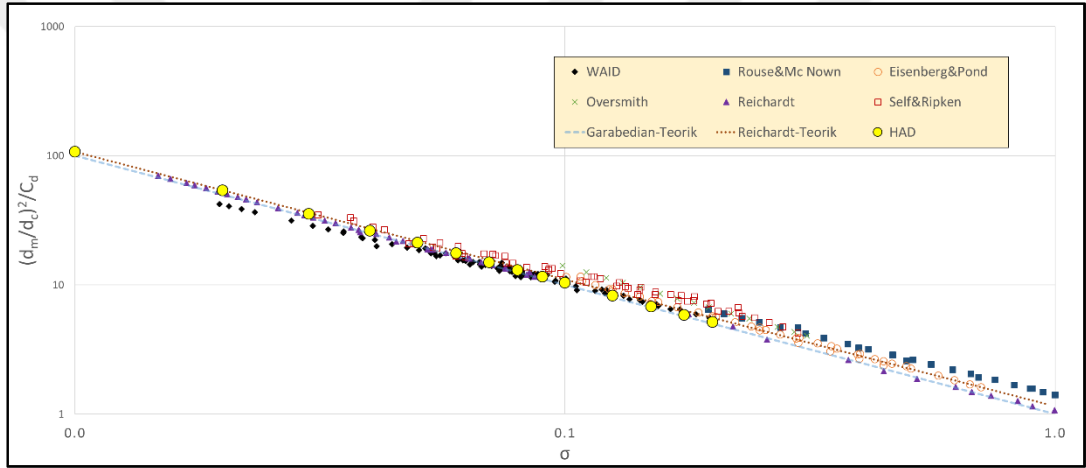


Şekil 6.14: Sırasıyla 0.02 ve 0.08 kavitasyon sayılarında kavitasyon zarfı geometrileri.

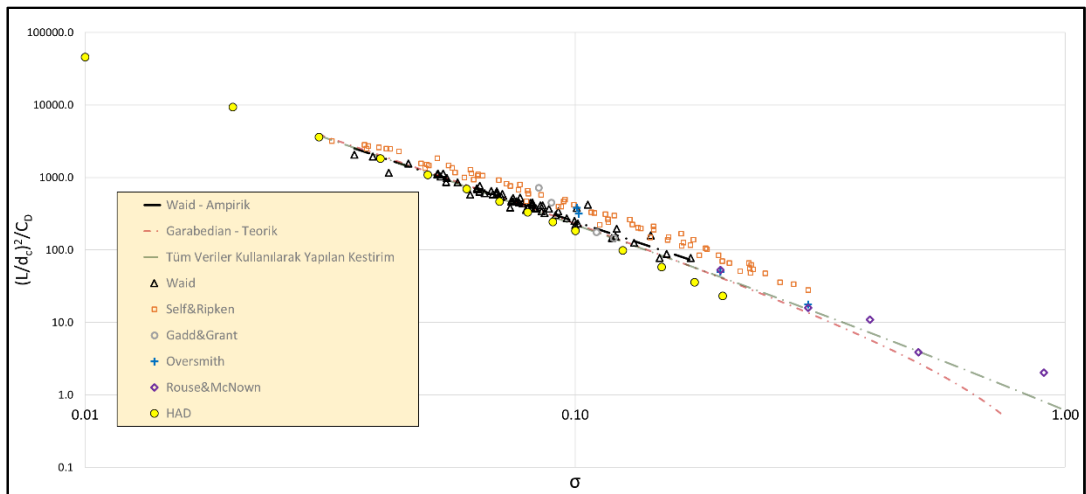
Şekil 6.15, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de disk kavitatörler üzerinde yapılan HAD analizleri sonucunda elde edilen verilerin literatür araştırması sonucunda oluşturulan veri havuzuna uyumlulukları incelenmiştir. Bu kapsamda sürüklenme katsayısı, kavitasyon zarfı çap ve uzunluk parametresi verileri kullanılmış olup elde edilen HAD sonuçları Bölüm 2’de verilen verilerle aynı şekil üzerinde incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda üç parametre için de elde edilen HAD verilerinin literatür veri havuzu ile uyumluluk gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.15: Disk kavitatörlerde had sonucunda elde edilen sürüklenme katsayısının literatür veri havuzu ile karşılaştırılması [33].

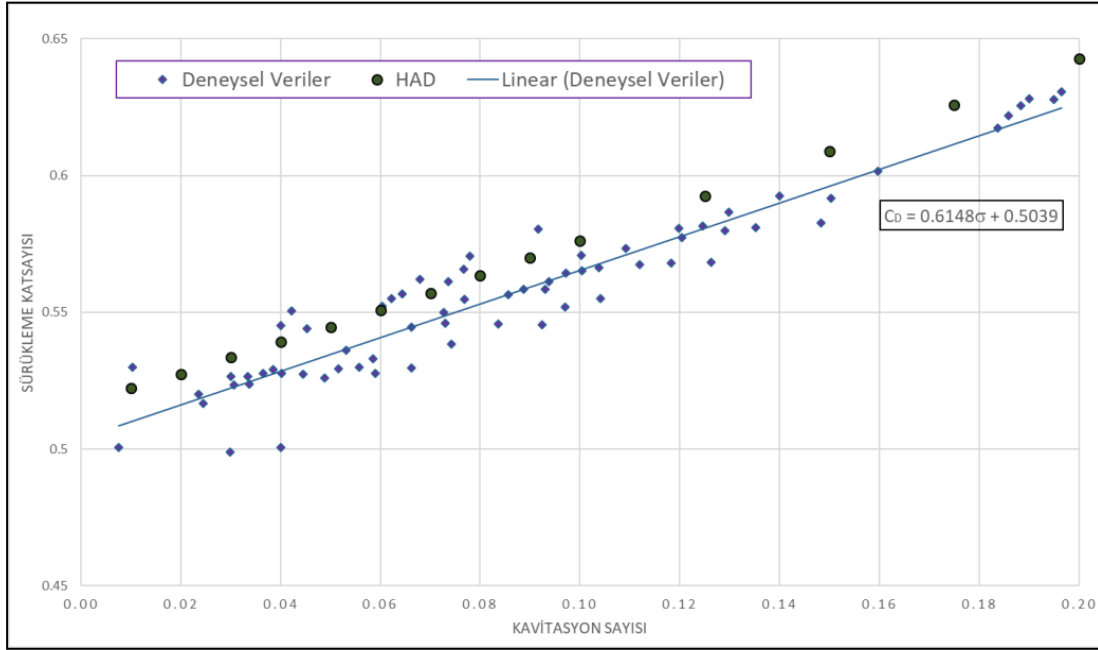


Şekil 6.16: Disk kavitatörlerde had sonucunda elde edilen kaviteasyon zarfı çap parametresinin literatür veri havuzu ile karşılaştırılması [33].

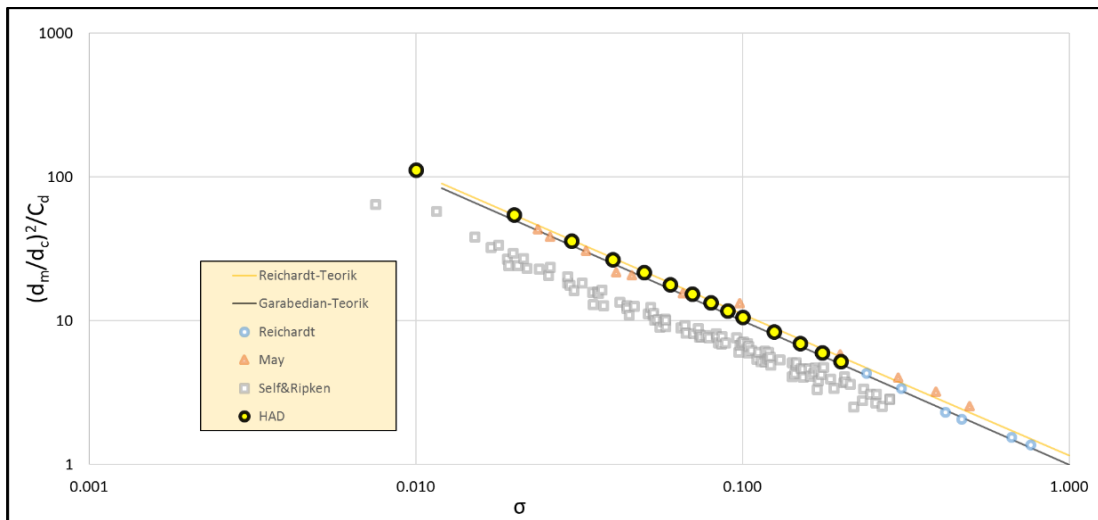


Şekil 6.17: Disk kavitatörlerde had sonucunda elde edilen kaviteasyon zarfı uzunluk parametresinin literatür veri havuzu ile karşılaştırılması [33].

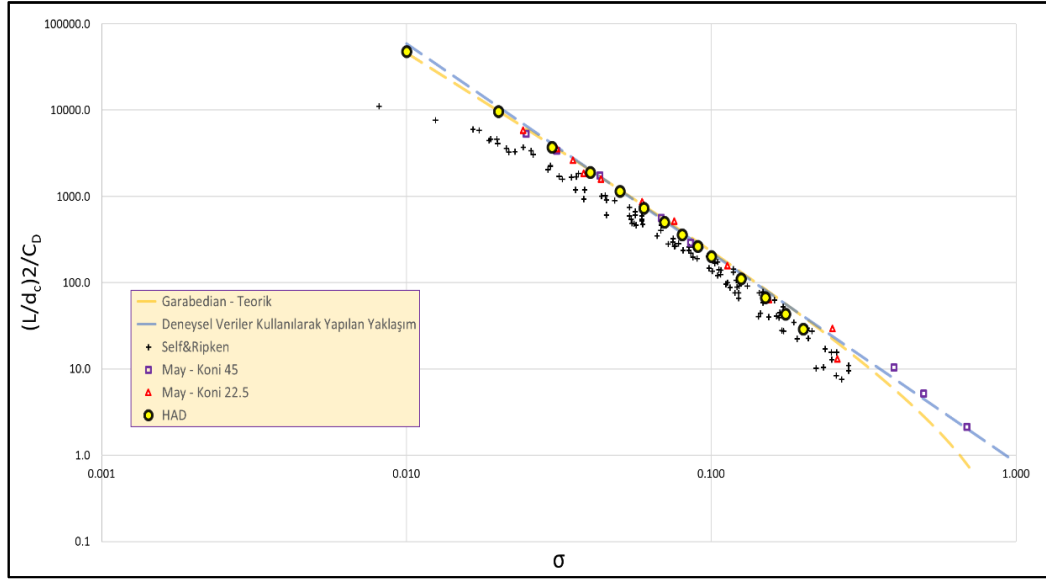
Şekil 6.18’de, Şekil 6.19’da ve Şekil 6.20’de 45 derece yarım açılı konik kavitatörler üzerinde yapılan HAD analizleri sonucunda elde edilen verilerin literatür araştırması sonucunda oluşturulan veri havuzuna uyumlulukları incelenmiştir. Bu kapsamda sürüklenme katsayısı, kavitasyon zarfı çap ve uzunluk parametresi verileri kullanılmış olup elde edilen HAD sonuçları Bölüm 2’de verilen verilerle aynı şekil üzerinde incelenmiştir.. Yapılan çalışma sonucunda üç parametre için de elde edilen HAD verileri literatür veri havuzu ile uyumluluk göstermektedir.



Şekil 6.18: 45 derece yarım açılı konik kavitatörlerde had sonucunda elde edilen sürüklenme katsayısının literatür veri havuzu ile karşılaştırılması [33].



Şekil 6.19: 45 derece yarım açılı konik kavitatörlerde had sonucunda elde edilen kavitasyon zarfı çap parametresinin literatür veri havuzu ile karşılaştırılması [33].



Şekil 6.20: 45 derece yarım açılı konik kavitatörlerde had sonucunda elde edilen kavitasyon zarfı uzunluk parametresinin literatür veri havuzu ile karşılaştırılması [33].

6.8. Analiz Modeli Geliştirilmesi ve Doğrulama Çalışmasının Değerlendirilmesi

Tez çalışması kapsamında bu bölümde süperkavitasyon rejimi doğal kavitasyon karakteristiği HAD analiz modeli geliştirilerek çözümlenmiş ve HAD analizleri ile elde edilen verilen literatür verileri ile karşılaştırılarak süperkavite akışları çözmek için geliştirilen HAD analiz modeli doğrulanmıştır.

Doğrulama çalışmasının yapılabilmesi için ilk olarak çözüm uzayı belirlenmiştir. Çözüm uzayı ve Modelin Etkin Bölgesi (BOI) oluşturulurken literatür verilerine göre oluşması beklenen kavitasyon zarfı çapı ve uzunluğu referans alınmıştır. Çözüm uzayı ve BOI belirlendikten sonra 3 farklı çözüm uzayı geometrisi ve 4 farklı çözüm ağı için HAD analiz modelleri kurulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonrasında en iyi çözüm uzayı geometrisi “Dikdörtgenler Prizması” ve çözüm ağı tipi ise “Tetrahedral” olacak şekilde belirlenmiştir. Ek olarak diğer geometrilerin ve çözüm ağlarının da iyi sonuçlar verdiğine değinilmiştir. Bu nedenle çözüm uzayı geometrisini ve çözüm ağını belirlerken herhangi bir eleme yapılmadan en iyi çözüm sunan geometri ve çözüm ağı değerlendirilmiştir. Bu aşama tamamlandıktan sonra çözüm ağından bağımsızlık çalışması yapılmış, en iyi çözümü sunabilecek çözüm ağı çözünürlüğü belirlenmiştir.

HAD analizi kurulum aşamasında ise türbülans modeli, çok fazlı model ve kavitasyon modeli olmak üzere 3 farklı çözüm metodu değerlendirilmiştir. İlk olarak

Realizable $k - \varepsilon$, SST $k - \omega$ ve Reynolds Stress türbülans modelleri 45 derece yarım açılı konik kavitatör ve disk kavitatöre sahip bir torpido modeli olmak üzere 2 farklı geometri üzerinde analiz edilmiştir. Değerlendirme sürecinde sürüklenme katsayısı, kavitasyon zarfı uzunluğu, kavitasyon zarfı çapı, iterasyon süresi ve yakınsama kolaylığı gibi parametreler dikkate alınmıştır. Yapılan HAD analizleri sonrasında yine herhangi model elemesi yapılmadan en iyi sonucu, en kolay ve hızlı şekilde vermesinden ötürü SST $k - \omega$ türbülans modeli bu doğrulama çalışmasında kullanılacak olan türbülans modeli olarak belirlenmiştir. Daha sonrasında VOF ve Mixture olmak üzere iki farklı çok fazlı model ve Schnerr-Sauer ve Zwart-Gerber-Belamri olmak üzere de iki farklı kavitasyon modeli 3 cm çapındaki bir disk kavitatör geometrisi kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmalar da türbülans modelinin belirlenmesi çalışmasında ele alınan parametreler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak bu doğrulama çalışmasında Mixture çok fazlı modelinin ve Schnerr-Sauer kavitasyon modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. Kurulum aşaması da tamamlandıktan en doğru kavitasyon zarf geometrisini belirlemek amacıyla su fazı yüzdesine bağlı olarak bir kontör çizme çalışması yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda 0.6 sıvı faz oranı (%60) hedeflenerek çizdirilecek olan kontörün kavitasyon zarfı geometrisini doğru bir şekilde ifade edeceğine karar verilmiştir.

Hazırlık ve kurulum aşaması tamamlandıktan sonra da belirlenen analiz modeli ile disk kavitatör, konik kavitatör ve torpido modeli için gerçekleştirilen analizler literatürdeki verilerle doğrulanmıştır. Doğrulama çalışması süresince 14 farklı seyir koşulunda disk ve 45 derece yarım açılı kavitatör geometrisi süperkavitasyon rejimi etkisinde incelenmiştir. Ayrıca 5 farklı seyir koşulunda disk kavitatöre sahip bir torpido modeli de incelenmiş, doğrulama çalışması kapsamında toplamda 33 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sürüklenme katsayısı, kavitasyon zarfı uzunluğu ve kavitasyon zarfı çapı değerleri Bölüm 2’de ortaya çıkarılan veri havuzundaki değerler kullanılarak elde edilen literatürdeki verileri ile uyumluluğu grafikler üzerinde incelenmiştir. Sürüklenme katsayısı, kavitasyon zarfı boyu ve çapı değerleri üzerinden yapılan değerlendirmelerde HAD analizleri ile elde edilen sonuçların literatür veri havuzu ile uyumlu olduğu görülmüştür. Yapılan karşılaştırma çalışmalarıyla birlikte 33 adet HAD çalışması hata yüzdesi $< \%5$ olacak şekilde tamamlanmıştır. Bu çalışma ile süperkavitasyon rejiminde doğal kavitasyon karakteristiğini çözümleyebilecek bir analiz modeli geliştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar literatür verileri ile doğrulanmıştır.

Bu sayede geliştirilen analiz modeli kullanılarak süperkavite bir su altı aracının üç serbestlik derecesindeki hidrodinamik veri havuzu yüksek sadakat ile oluşturulacak ve sistemin hidrodinamik performansı incelenebilecektir.





7. SÜPERKAVİTE SU ALTI ARACININ HİDRODİNAMİK VERİTABANININ HAZIRLANMASI

Tez kapsamında hidrodinamik hidrodinamik denklem seti oluşturulan 5 cm kavitatör çapındaki 2 metre uzunluğundaki süperkavite su altı aracı için farklı operasyon koşullarında gerçekleştirilen HAD analizleri sonucunda 5 serbestlik derecesinde hidrodinamik veritabanı oluşturulmuştur. Oluşturulan veritabanında her seyir koşulunda süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan X, Y, Z hidrodinamik kuvvetleri ile K, M, N hidrodinamik momentleri incelenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvet ve momentlerin hücum açısına (α) bağlı değişimi incelenmiştir. Hücum açısı taramasının tamamlanmasının ardından süperkavite su altı aracı için sırasıyla kavitatör ve ufki dümenler sapma açılarına bağlı olarak tarama işlemi tamamlanmıştır. Sonrasında su altı aracının sahip olduğu kavitasyon zarfının manevra boyunca gövde üzerinde ıslak alan oluşturmadığı bir hız rejiminde, farklı dönme yarıçaplarında süperkavite su altı aracı üzerindeki yunuslama açısal hızı incelenmiş, yunuslama açısal hızının kavitasyon zarfını yönlendirmesi değerlendirilmiştir. 5 serbestlik derecesindeki hidrodinamik veritabanı oluşturulurken süperkavite su altı aracı için ilerleme kuvveti, düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti incelenmiştir. Sapma kuvveti ve sapma momenti de yapılan varsayımlar kapsamında sırasıyla düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momentinin simetrik koşulu olarak değerlendirilmiştir. Süperkavite su altı aracı üzerinde pervane gibi sistemi ters akış etkilerine maruz bırakan bir etki olmaması kaynaklı sistem üzerinde asimetrik etkilerin ve akuple manevra katsayılarının bulunmadığı değerlendirilerek 5 serbestlik derecesinde hidrodinamik denklem seti oluşturulmuş, bu kapsamda hidrodinamik katsayılar belirlenmiştir. Veritabanı oluşturma çalışması kapsamında toplamda 433 adet seyir koşulu incelenmiştir.

Bu bölümde belirlenen seyir koşullarının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen HAD analizlerinde Bölüm 6'da geliştirilen hidrodinamik analiz modeli referans alınmıştır. İncelenecek süperkavite su altı aracının fiziksel özellikleri ve performans gereksinimleri Bölüm 3'de belirlenmiştir.

7.1 Analiz Noktalarının ve Hidrodinamik Parametrelerin Belirlenmesi

Süperkavite su altı aracının hidrodinamik veri tabanının hazırlanması ve elde edilen sonuçlara bağlı olarak hidrodinamik katsayıların belirlenip 5 serbestlik derecesinde denklem setinin oluşturulması kapsamında ilk olarak incelenecek seyir koşulları ve belirlenen seyir koşulları için hesaplanacak hidrodinamik parametreler belirlenmiştir. Analiz noktalarının ve hidrodinamik parametrelerin belirlenmesi taranacak analiz uzayının ve incelenecek sonuçların tanımlanması açısından önemlidir. Çizelge 7.1’de süperkavite su altı aracı için oluşturulan veritabanı kapsamında belirlenen analiz noktaları verilmiştir.

Çizelge 7.1: Hidrodinamik veritabanı oluşturulması kapsamında belirlenen analiz noktaları.

Seyir Hızı (U_{∞})	[160 knot]
Hücum Açısı (α)	$[-1.2^{\circ}, -1^{\circ}, -0.8^{\circ}, -0.6^{\circ}, -0.4^{\circ}, -0.2^{\circ}, 0^{\circ}, 0.2^{\circ}, 0.4^{\circ}, 0.6^{\circ}, 0.8^{\circ}, 1.0^{\circ}, 1.2^{\circ}]$
Sapma Açısı (β)	$[-1.2^{\circ}, -1^{\circ}, -0.8^{\circ}, -0.6^{\circ}, -0.4^{\circ}, -0.2^{\circ}, 0^{\circ}, 0.2^{\circ}, 0.4^{\circ}, 0.6^{\circ}, 0.8^{\circ}, 1.0^{\circ}, 1.2^{\circ}]$
Kavitatör Yunuslama Açısı (δ_{cp})	$[-20^{\circ}, -15^{\circ}, -10^{\circ}, -5^{\circ}, 0^{\circ}, 5^{\circ}, 10^{\circ}, 15^{\circ}, 20^{\circ}]$
Kavitatör Sapma Açısı (δ_{cy})	$[-20^{\circ}, -15^{\circ}, -10^{\circ}, -5^{\circ}, 0^{\circ}, 5^{\circ}, 10^{\circ}, 15^{\circ}, 20^{\circ}]$
Ufki Dümen Sapma Açısı (δ_e)	$[-8^{\circ}, -6^{\circ}, -4^{\circ}, -2^{\circ}, 0^{\circ}, 2^{\circ}, 4^{\circ}, 6^{\circ}, 8^{\circ}]$
Amudi Dümen Sapma Açısı (δ_r)	$[-8^{\circ}, -6^{\circ}, -4^{\circ}, -2^{\circ}, 0^{\circ}, 2^{\circ}, 4^{\circ}, 6^{\circ}, 8^{\circ}]$
Yunuslama Açısal Hızı (q)	$[-45^{\circ}/s, -30^{\circ}/s, -20^{\circ}/s, -10^{\circ}/s, 0^{\circ}/s, 10^{\circ}/s, 20^{\circ}/s, 30^{\circ}/s, 45^{\circ}/s]$
Sapma Açısal Hızı (r)	$[-45^{\circ}/s, -30^{\circ}/s, -20^{\circ}/s, -10^{\circ}/s, 0^{\circ}/s, 10^{\circ}/s, 20^{\circ}/s, 30^{\circ}/s, 45^{\circ}/s]$

Veritabanının hazırlanması kapsamında 13 farklı noktada hücum açısı ve sapma açısı taraması, 9 farklı noktada kavitatör yunuslama ve sapma açısı taraması 9 farklı noktada ufki ve amudi dümen sapma açısı taraması ve 7 farklı noktada yunuslama ve sapma açısal hızı taraması yapılmıştır. Veritabanı oluşturulurken süperkavite su altı aracının kavitasyon zarfının içerisinde kalması amaçlanmıştır ve bu kapsamda seyir koşulları incelenirken süperkavite su altı aracının belirgin bir şekilde kavitasyon zarfı dışında kaldığı koşullar incelenmeye alınmamıştır. Çizelge 7.2’de veri tabanı oluşturulurken hesaplanan hidrodinamik parametreler verilmiştir. Bu parametreler referans alınarak 5 serbestlik derecesindeki hareket denklemleri için hidrodinamik katsayılar belirlenmiştir. Tez kapsamında belirlenen seyir koşulları için gerçekleştirilen HAD

analizlerine bağı olarak belirlenen hidrodinamik katsayılar en küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 7.2: Hidrodinamik veritabanı oluşturulması kapsamında hesaplanan hidrodinamik parametreler.

Hidrodinamik Parametreler	Bağı Olduğu Parametreler
X (Eksenel Kuvvet)	$U_{\infty}, \alpha, \beta, \delta_{cp}, \delta_{cy}, \delta_e, \delta_r, q, r$
Y (Yanal Kuvvet)	$U_{\infty}, \beta, \delta_{cy}, \delta_r, r$
Z (Düşey Öteleme Kuvveti)	$U_{\infty}, \alpha, \delta_{cp}, \delta_e, q$
M (Yunuslama Momenti)	$U_{\infty}, \alpha, \delta_{cp}, \delta_e, q$
N (Sapma Momenti)	$U_{\infty}, \beta, \delta_{cy}, \delta_r, r$

7.2 Hücüm Açısı (α) Taraması

Süperkavite su altı aracının seyri süresince kavitasyon zarfının içerisinde kalması amaçlanmaktadır. Bu durumun nedeni araç üzerindeki ıslak alan etkilerini minimize etmek, bu sayede aracın hız ve menzil parametrelerini iyileştirmektir. Bu kapsamda ilk olarak süperkavite su altı aracının kavitasyon zarfı içerisinde seyrettiği hücüm açısı aralığı belirlenmelidir. Bu amaçla süperkavite su altı aracının hassas bir şekilde hücüm açısının tarandığı bir ilk çalışma gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda süperkavite su altı aracının kavitasyon zarfı içerisinde seyredebilmesi için sahip olabileceği maksimum hücüm açısı 1.2° olarak belirlenmiştir. Aracın üzerindeki hücüm açısının 1.2° 'yi aşması durumunda gövde üzerinde oluşan ıslak alan etkileri belirgin bir şekilde artmaktadır. Çizelge 7.3'te artan hücüm açısına bağı olarak süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan sürükleme kuvvetinin artış yüzdeleri gösterilmiştir. Çizelge 7.3'te hücüm açısının 1.2° 'den sonra süperkavite su altı aracının maruz kaldığı sürükleme kuvvetinin 0° hücüm açısındaki duruma göre %10'un üzerinde bir artış gözlemlenmiştir. Bu nedenle süperkavite su altı aracının hücüm açısı limitleri $\pm 1.2^\circ$ olarak belirlenmiştir.

Süperkavite su altı aracı için taranacak hücüm açısı limitlerinin belirlenmesinin ardından 13 farklı hücüm açısında eksenel kuvvet (X) ve düşey öteleme kuvveti (Z) ile yunuslama momenti (M) incelenmiştir. Sistemde etkin olan hidrodinamik parametrelerin tanımlanmasının ardından sistemi en iyi şekilde temsil edecek hidrodinamik katsayılar belirlenmiştir.

Çizelge 7.3: Hücum açısına bağlı olarak sürüklenme kuvvetinin yüzdesel değişimi.

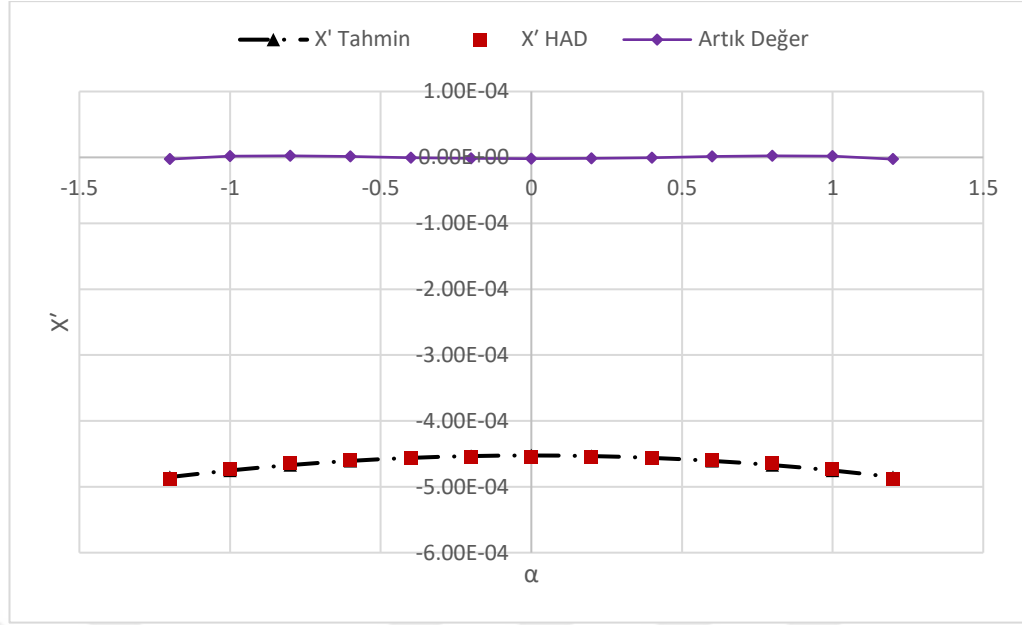
Hücum Açısı (°)	Sürüklenme Kuvveti Yüzde Değişimi (%)
0	-
0.2	0.17
0.4	0.51
0.6	1.13
0.8	2.29
1.0	4.18
1.2	7.40
1.4	12.88
1.6	20.47

Çizelge 7.4'te eksenel kuvvet (X), düşey öteleme kuvveti (Z) ve yunuslama momenti (M) için katsayıların belirlenmesinin ardından elde edilen artık değerler ve sigma değeri verilmiştir. Sigma değeri katsayılar kullanılarak tahmin edilen sonuçların hata miktarını temsil etmektedir ve bir noktadaki hata yüzdelерinin karelerinin toplamının karekökü olarak ifade edilmektedir. Bu değer arttıkça sistemin belirlenen katsayılarla ifade edilme yüzdesi düşmektedir.

Çizelge 7.4: Hücum açısı taramasının ardından elde edilen artık değerler ve sigma değeri.

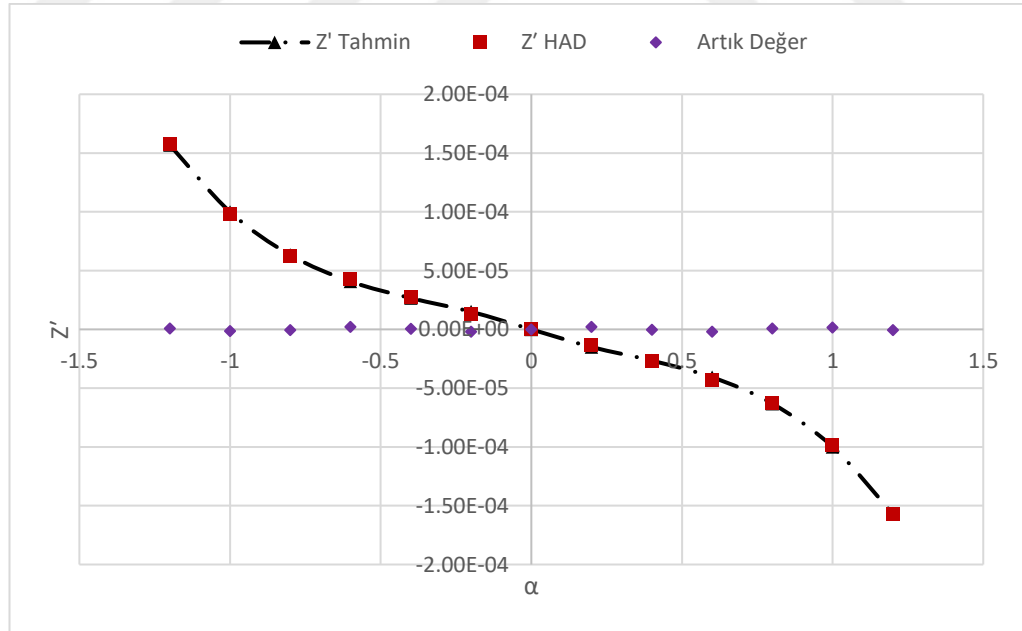
Hücum Açısı (α)	Artık Değerler		
	Eksenel Kuvvet	Düşey Öteleme Kuvveti	Yunuslama Momenti
0.2°	-1.65E-06	2.15E-06	7.03E-07
0.4°	-4.35E-07	-3.70E-07	-1.35E-07
0.6°	1.27E-06	-2.14E-06	-7.07E-07
0.8°	2.38E-06	5.54E-07	2.37E-07
1.0°	1.97E-06	1.41E-06	4.06E-07
1.2°	-2.65E-06	-7.09E-07	-2.15E-07
Sigma	1.43	24.88	22.84

Çizelge 7.4 incelendiğinde artık değerlerin genel olarak $< 10^{-6}$ mertebesinde kaldığı sigma değerlerinin de sıfıra yakın olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 7.1'de süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan eksenel kuvvet sonuçlarının incelenmesi sonrasında elde edilen katsayılar kullanılarak tahmin edilen değerler ve HAD analizleri sonucunda elde edilen analiz değerleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Aynı zamanda Şekil 7.1'de artık değerler de ifade edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda X'_{uu} katsayısı -0.000452491 ve X'_{ww} katsayısı -0.074905525 olarak belirlenmiştir. Eksenel kuvvet temsil edilirken ikinci dereceden katsayılar kullanılmasının nedeni eksenel kuvvetin değişen hücum açılarına bağlı olarak ikinci dereceden değişmesidir.



Şekil 7.1: Hücüm açısına bağlı olarak birimsizleştirilmiş eksenel kuvvetin incelenmesi.

Şekil 8.2’de de süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan düşey öteleme kuvvetinin sonuçlarının incelenmesi ardından elde edilen katsayılar kullanılarak tahmin edilen değerler ile HAD analizleri sonucunda elde edilen analiz değerleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekil 7.2’de artık değerler de ifade edilmiştir.

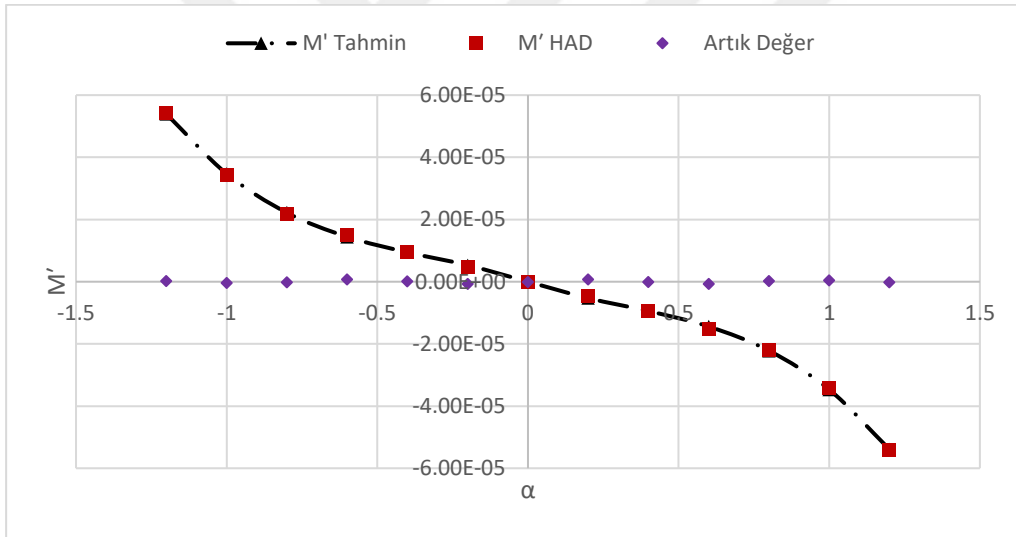


Şekil 7.2: Hücüm açısına bağlı olarak birimsizleştirilmiş düşey öteleme kuvvetinin incelenmesi.

Yapılan çalışma sonucunda Z'_w katsayısı -0.005348709 , $Z'_{w|w|}$ katsayısı 0.381124378 ve Z'_{www} katsayısı -23.077619 olarak belirlenmiştir. Hücüm açısı

taramasında Z'_{www} katsayısının kullanılmasının nedeni süperkavite su altı aracının özellikle artan hücum açılarında düşey öteleme kuvvetinin üçüncü dereceden değişme eğilimidir. Bu üçüncü dereceden eğilimin yunuslama momentinde de görülmesi beklenmektedir.

Şekil 7.3'te ise süperkavite su altı aracı üzerinde HAD verilerinden yararlanılarak elde edilen hidrodinamik katsayılar kullanılarak ifade edilen yunuslama momenti ile HAD analizleri sonucunda elde edilen analiz değerleri gösterilmiştir. Şekil 8.3'te artık değerlere de yer verilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda M'_w katsayısı -0.001868255 , $M'_{w|w|}$ katsayısı 0.127399947 ve M'_{www} katsayısı -7.695445621 olarak belirlenmiştir. Beklendiği gibi hücum açısı taramasında sistemin üzerindeki yunuslama momenti üçüncü dereceden değişmektedir. Bu nedenle sistem temsil edilirken sisteme M'_w ve $M'_{w|w|}$ katsayılarına ek olarak M'_{www} katsayısı da dahil edilmiştir.



Şekil 7.3: Hücum açısına bağlı olarak birimsizleştirilmiş yunuslama momentinin incelenmesi.

Şekil 8.1, Şekil 8.2 ve Şekil 8.3 incelendiğinde üç farklı hidrodinamik parametre için de elde edilen katsayıların sistemi doğru bir şekilde tahmin ettiği gözlemlenmektedir. Sistemin hücum açısına bağlı olarak tepkisinin ifade edilmesi kapsamında bu katsayılardan yararlanılacaktır.

7.3 Kavitatör Yunuslama Açısı (δ_{cp}) Taraması

Süperkavite su altı aracı için hücum açısı taramasının ardından kavitatör yunuslama açısına bağlı olan seyir koşulları incelenmiştir. Bu kapsamda süperkavite su altı

aracının kavitatörünün yunuslama ve sapma düzlemlerinde hareket edebildiği varsayılmıştır. Bu bölümde de sistemin üzerindeki kavitatör sapma açısına bağlı olarak oluşan hidrodinamik parametreler yunuslama açısına özgü hidrodinamik katsayılarla ifade edilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak kavitatörün yunuslama ve sapma açısı limitleri belirlenmiştir. Mekanik kısıtlar ve süperkavite su altı aracının değişen kavitatör açısına bağlı olarak verdiği tepkiler referans alındığında, yunuslama ve sapma açısı limitleri $\pm 20^\circ$ olarak belirlenmiştir. Veritabanı oluşturulması çalışması kapsamında süperkavite su altı aracı için kavitatör sapması kavitatör yunuslama açısı limitleri içerisinde kalacak şekilde 9 farklı noktada incelenmiştir.

Çizelge 7.5'te kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak süperkavite su altı aracının üzerinde oluşan eksenel kuvveti (X), düşey öteleme kuvvetini (Z) ve yunuslama momentini (M) temsil etmek amacıyla hidrodinamik katsayıların belirlenmesi kapsamında elde edilen artık değerler ve sigma değeri verilmiştir.

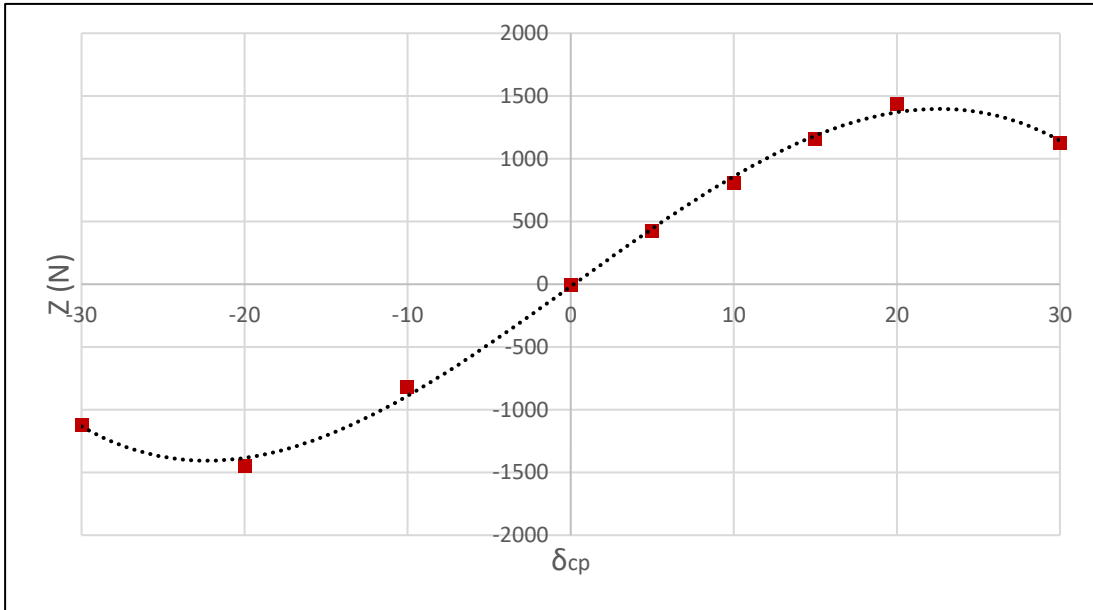
Çizelge 7.5: Kavitatör yunuslama açısı taraması sonucunda elde edilen artık değerler ve sigma değeri.

Kavitatör Sapma Açısı (δ_{cp})	Artık Değerler		
	Eksenel Kuvvet	Düşey Öteleme Kuvveti	Yunuslama Momenti
-20°	-3.25E-07	9.26E-08	-1.76E-07
-15°	4.84E-07	-3.97E-07	2.56E-07
-10°	2.30E-07	-3.32E-07	-7.45E-08
-5°	-6.52E-08	4.04E-07	-2.82E-07
0°	-7.35E-07	-3.57E-07	-1.09E-07
Sigma	0.27	2.15	1.8

Sonuçlar incelendiğinde artık değerlerin genel olarak $< 10^{-7}$ mertebesinde kaldığı, sigma değerlerinin ise sıfıra yakın olduğu gözlemlenmektedir. Sonuç olarak kavitatör yunuslama açısı taraması çalışması kapsamında ifade edilen katsayıların sistemi yüksek sadakatte temsil ettiği gözlemlenmiştir.

Şekil 7.4'te sistemin 20 derece yunuslama açısından sonra tepe noktasına ulaştığı ve bu noktadan itibaren düşey öteleme kuvvetinde azalmaların olduğu görülmektedir. Aynı şekil incelendiğinde sistemin en performanslı çalıştığı aralığın lineer bir eğilim gösteren $\pm 15^\circ$ aralığı olduğu görülmektedir. Kavitatör yunuslama açısına özgü düşey öteleme kuvvetini ve yunuslama momentini ifade edece hidrodinamik katsayılar tanımlanırken $\pm 20^\circ$ aralığı incelenmesinden ve sistemin bu aralık boyunca özellikle

$\pm 15^\circ$ 'den itibaren lineer özelliğini kaybetmesinden ötürü sistem temsil edilirken δ'_{cp} katsayısına ek olarak $\delta'_{cp}|\delta'_{cp}|$ katsayısı da çözüme dahil edilmiştir.

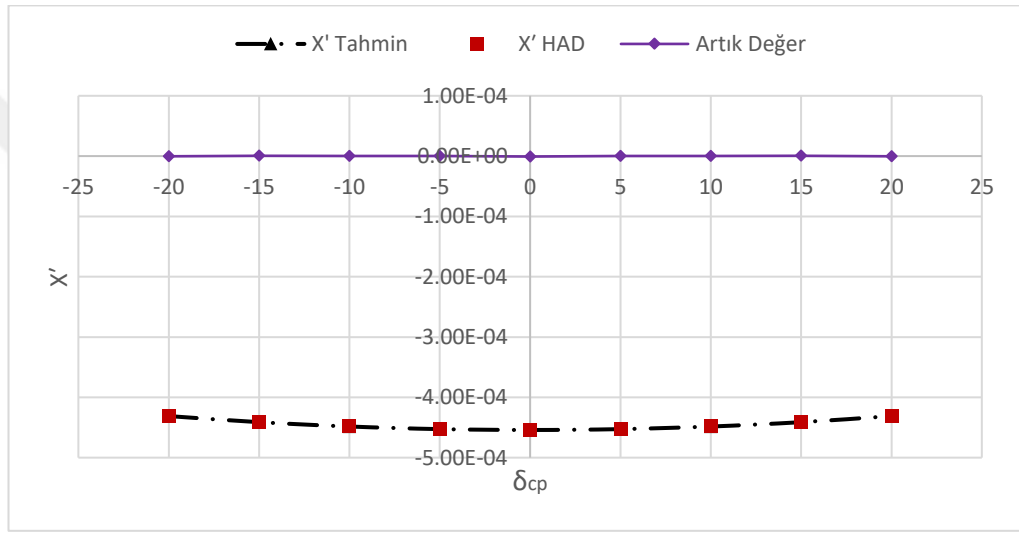


Şekil 7.4: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki düşey öteleme kuvvetinin değişimi.

Şekil 7.5'te 9 farklı seyir koşulu için gerçekleştirilen kavitatör yunuslama açısı taraması sonucunda elde edilen birimsizleştirilmiş eksenel kuvvetler gösterilmiştir. Şekilde kırmızı ile işaretlenmiş sonuçlar HAD analizleri sonucunda elde edilen birimsiz eksenel kuvvet verilerini, siyah kesikli çizgi ile gösterilen eğri ise X'_{uu} ve $X'_{\delta_{cp}\delta_{cp}}$ katsayıları kullanılarak temsil edilen birimsiz eksenel kuvveti ifade etmektedir. Ayrıca mor renkle gösterilen çizgi ise artık değerleri temsil etmektedir. HAD verileri incelendiğinde, eksenel kuvvetin δ_{cp} eksenine simetrik bir eğilimde olmasından ötürü eksenel kuvvet temsil edilirken ikinci derece katsayılardan yararlanılmıştır.

Şekil 7.5'te süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan eksenel kuvvetin temsil edilmesi amacıyla gerçekleştirilen hidrodinamik katsayıların belirlenmesi kapsamında kavitatör yunuslama açısı taraması sonucunda X'_{uu} katsayısı -0.000454127 ve $X'_{\delta_{cp}\delta_{cp}}$ katsayısı da 0.000188996 olarak belirlenmiştir. Süperkavite su altı aracının veritabanının oluşturulması ve hücum açısı, kavitatör yunuslama açısı, ufki dümen sapma açısı ile yunuslama açısal hızına bağlı olarak hidrodinamik katsayıların belirlenmesi kapsamında eksenel kuvvetin belirlenmesi amacıyla X'_{uu} katsayısı her taramaya dahil edilmiştir. X'_{uu} katsayısının dahil edilmesinin nedeni sistemin

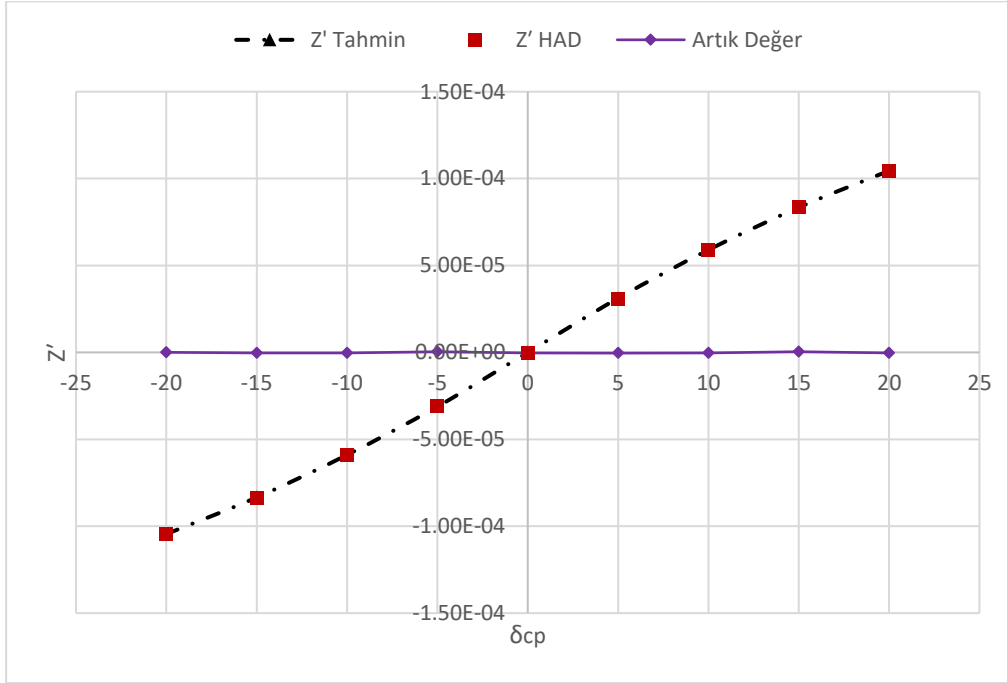
üzerinde herhangi bir açı bulunmadığı yani düz seyir ettiği durumda oluşan eksenel kuvvetin de çözüme dahil edilmesi zorunluluğudur. Ancak, her tarama işlemi için X'_{uu} katsayısı belirlenirken yapılan çalışma diğer tarama işleminden bağımsız bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan belirlenecek X'_{uu} katsayısının bütün tarama işlemlerinde birbirine yakın sonuçlar vermesi beklenmektedir. Bu kapsamda hücum açısı ve kavitatör yunuslama açısı taraması sonucunda elde edilen X'_{uu} katsayıları incelendiğinde sonuçların birbirlerine %99.64 mertesinde yakın olduğu görülmektedir. Aynı şekilde ufki dümen sapma açısı ve yunuslama açısal hızı taramaları sonucunda da elde edilecek X'_{uu} katsayılarının birbirlerine sonuçlar vermesi beklenmektedir.



Şekil 7.5: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz eksenel kuvvetin değişimi.

Şekil 7.6'da ve Şekil 8.7'de HAD analiz metodları kullanılarak gerçekleştirilen kavitatör yunuslama açısı taraması sonucunda sırasıyla elde edilen birimsizleştirilmiş düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti gösterilmiştir. Şekilde kırmızı ile işaretlenmiş sonuçlar HAD analizleri sonucunda elde edilen birimsiz kuvvet ve moment verilerini, siyah kesikli çizgi ile gösterilen eğri ise hidrodinamik katsayıları kullanılarak temsil edilen birimsiz kuvveti ve momenti ifade etmektedir. Ayrıca şekillerde mor renkle gösterilen çizgi de artık değerleri temsil etmektedir. Düşey öteleme kuvvetini ifade ederken $Z'_{\delta_{cp}}$ ve $Z'_{\delta_{cp}|\delta_{cp}}$ katsayıları, yunuslama momenti ifade edilirken de $M'_{\delta_{cp}}$ ve $M'_{\delta_{cp}|\delta_{cp}}$ katsayıları kullanılmıştır. Kavitatör yunuslama açısı taraması kapsamında elde edilen HAD verileri kullanılarak $Z - \delta_{cp}$ ve $M - \delta_{cp}$ ilişkileri incelenmiştir. Sonuç olarak sistem üzerindeki oluşan düşey öteleme kuvvetini

ve yunuslama momentini ifade ederken lineer katsayılar ek olarak $Z'_{\delta_{cp}|\delta_{cp}|}$ ve $M'_{\delta_{cp}|\delta_{cp}|}$ katsayılarının da çözüm uzayına dahil edildiği durumlarda sonuçların sadakatinin belirgin bir şekilde iyileştiği gözlemlenmiştir.

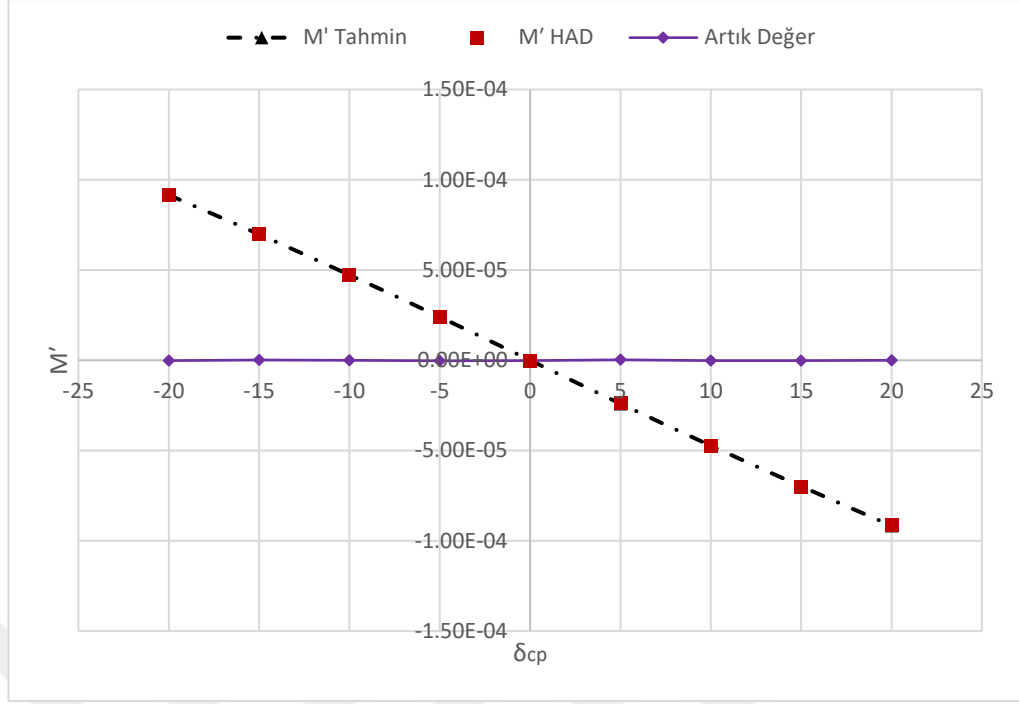


Şekil 7.6: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz düşey öteleme kuvvetinin değişimi.

Şekil 7.6'da kavitatör yunuslama açısı taraması kapsamında süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan düşey öteleme kuvvetinin temsil edilmesi maksadıyla gerçekleştirilen hidrodinamik katsayıların belirlenmesi çalışmasında $Z'_{\delta_{cp}}$ katsayısı 0.000376317 ve $Z'_{\delta_{cp}|\delta_{cp}|}$ katsayısı da -0.00022037 olarak belirlenmiştir.

Şekil 7.7'de de kavitatör yunuslama açısı taraması kapsamında süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan yunuslama momentinin temsil edilmesi maksadıyla gerçekleştirilen hidrodinamik katsayıların belirlenmesi çalışmasında $M'_{\delta_{cp}}$ katsayısı -0.000279553 ve $M'_{\delta_{cp}|\delta_{cp}|}$ katsayısı da $4.92165E - 05$ olarak belirlenmiştir.

Şekil 7.6 ve Şekil 7.7 incelendiğinde kavitatör sapma açısına bağlı olarak sistemin üzerindeki düşey öteleme kuvveti ile yunuslama momentinin birbirlerine göre zıt işaretli oldukları görülmektedir. Bu durumun iki nedeni vardır. Birinci nedeni, seyir boyunca oluşan kuvvet ve momentin büyük çoğunluğunun kavitatör üzerinde oluşması ve ikinci nedeni de oluşan düşey öteleme kuvveti merkezinin moment merkezinin önünde olmasından ötürü ters yönde yunuslama momenti oluşturmaktadır.



Şekil 7.7: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz yunuslama momentinin değişimi.

7.4 Ufki Dümen Sapma Açısı (δ_e) Taraması

Bu bölüm kapsamında ilk olarak 9 farklı ufki dümen sapma açısında HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Ufki dümen sapma açısı limitlerini belirken hücum açısı taraması kapsamında yapılan limit belirleme çalışmasındaki gibi bir yaklaşım kullanılmıştır. Bu amaçla ufki dümen sapması kaynaklı sürüklenme kuvvetindeki artış incelenmiştir. Ek olarak hücum açısı ile ufki dümen sapma açısı arasındaki kontrol etkinliği de incelenmiş, sistemin toplam öteleme kuvveti ve toplam yunuslama momenti ifadelerini sıfır yapacak hücum açısı ve ufki dümen açısı belirlenerek denge koşulları incelenmiştir. Kontrol etkinliğinin incelenmesine Bölüm 8’de değinilmiştir. Gerçekleştirilen iki çalışma kapsamında ufki dümen sapma açısı limitleri $\pm 8^\circ$ olarak belirlenmiştir.

Ufki dümen sapma açısı limitleri dahilinde gerçekleştirilen HAD analizleri sonucunda eksenel kuvvet, düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti hidrodinamik katsayılarla temsil edilmiştir. Katsayıların belirlenmesinin ardından elde edilen sonuçlar HAD analizleri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 7.6’da ufki dümen sapma açısına bağlı olarak süperkavite su altı aracının üzerinde oluşan eksenel kuvvetin (X), düşey öteleme kuvvetinin (Z) ve yunuslama momentinin (M) temsil edilmesi amacıyla gerçekleştirilen hidrodinamik katsayıların

belirlenmesi çalışması kapsamında elde edilen artık değerler ve sigma değeri verilmiştir.

Çizelge 7.6: Ufki dümen sapma açısı taraması sonucunda elde edilen artık değerler ve sigma değeri.

Ufki Dümen Sapma Açısı (δ_e °)	Artık Değerler		
	Eksenel Kuvvet	Düşey Öteleme Kuvveti	Yunuslama Momenti
-8°	-7.97E-07	1.10E-08	-2.34E-08
-6°	7.79E-07	-1.21E-06	-3.38E-07
-4°	1.69E-06	3.55E-06	1.16E-06
-2°	-1.04E-06	-3.53E-06	-1.20E-06
0°	-1.27E-06	-3.55E-07	-1.08E-07
Sigma	0.73	9.44	9.84

Sonuçlar incelendiğinde artık değerlerin genel olarak $< 10^{-7}$ mertebesinde kaldığı, sigma değerlerinin ise sıfıra yakın olduğu gözlemlenmektedir. Sonuç ufki dümen sapma açısı taraması çalışması kapsamında ifade edilen katsayıların sistemi yüksek sadakatte temsil ettiği gözlemlenmektedir.

Ufki dümen sapması kaynaklı oluşan katsayılar lineer ve lineer olmayan hidrodinamik katsayılardan oluşmaktadır. Bu bölümde hidrodinamik katsayılar elde edilirken yalnızca ufki dümen sapma açısına bağlı bir tarama işlemi yapılmasının nedeni sistemi ters akış etkilerine maruz bırakacak bir pervaneye sahip olmamasından kaynaklı sistem üzerinde akuple etkilerin oluşmamasıdır.

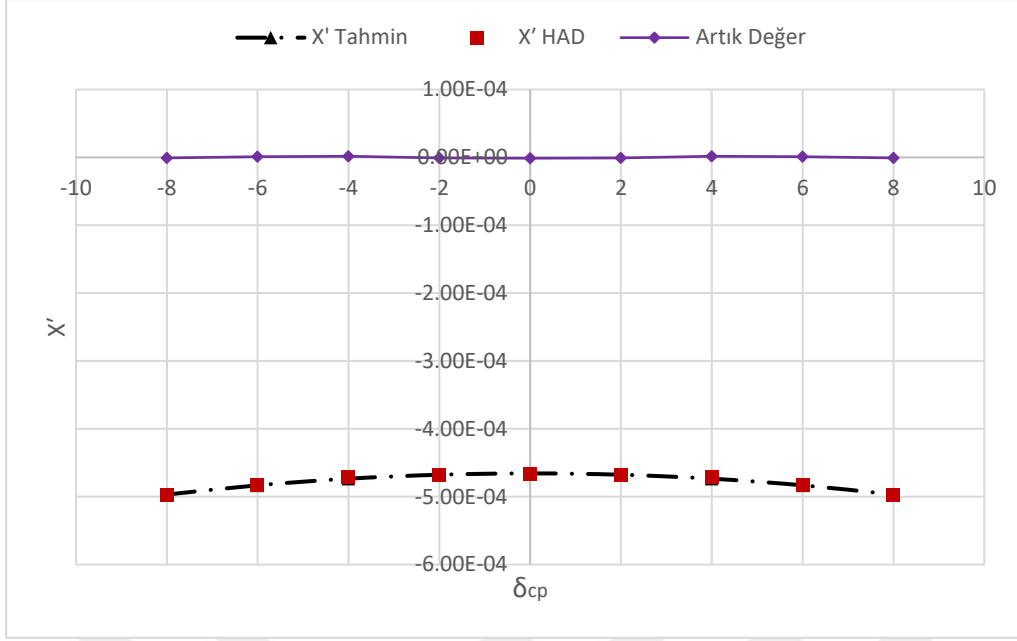
HAD analizleri sonucunda elde edilen düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti sonuçları incelendiğinde sistemin genel olarak kavitatör yunuslama açısı taraması kapsamında gözlemlenen eğilime benzer bir eğilim izlediği görülmektedir. Ancak, kavitatör yunuslama açısı taramasında özellikle yüksek sapma açılarında sistem üzerindeki kuvvet ve moment değerlerinde düşüşler gözlemlenmesine rağmen burada açı limitlerinin düşük olmasından kaynaklı bu duruma benzer kayıp gözlemlenmemiştir. Bu nedenle sistemdeki lineer olmayan katsayıların devre dışı bırakılarak yalnızca lineer katsayılar kullanılarak da temsil edilebileceği görülmüştür. Diğer taraftan sistemin lineer katsayılarla ifade edilebilmesine rağmen sisteme lineer olmayan katsayıların eklenmesiyle birlikte artık değerlerin ve sigma değerinin

azalmasından ve buna bağlı olarak sistemin daha iyi ifade edilebilmesinden ötürü $\delta'_e|\delta'_e|$ katsayısı da düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti çözümüne eklenmiştir.

Şekil 7.8’de 9 farklı seyir koşulu için gerçekleştirilen ufki dümen sapma açısı taraması sonucunda elde edilen birimsizleştirilmiş eksenel kuvvetler gösterilmiştir. Şekilde kırmızı ile işaretlenmiş sonuçlar HAD analizleri sonucunda elde edilen birimsiz eksenel kuvvet verilerini, siyah kesikli çizgi ile gösterilen eğri ise X'_{uu} ve $X'_{\delta_e\delta_e}$ katsayıları kullanılarak temsil edilen birimsiz eksenel kuvveti ifade etmektedir. Ayrıca mor renkle gösterilen çizgi ise artık değerleri temsil etmektedir. HAD verileri incelendiğinde, eksenel kuvvetin δ_e eksenine göre simetrik bir eğilimde olduğu görülmektedir. Bu nedenle eksenel kuvvet temsil edilirken ikinci derece katsayılarından yararlanılmıştır.

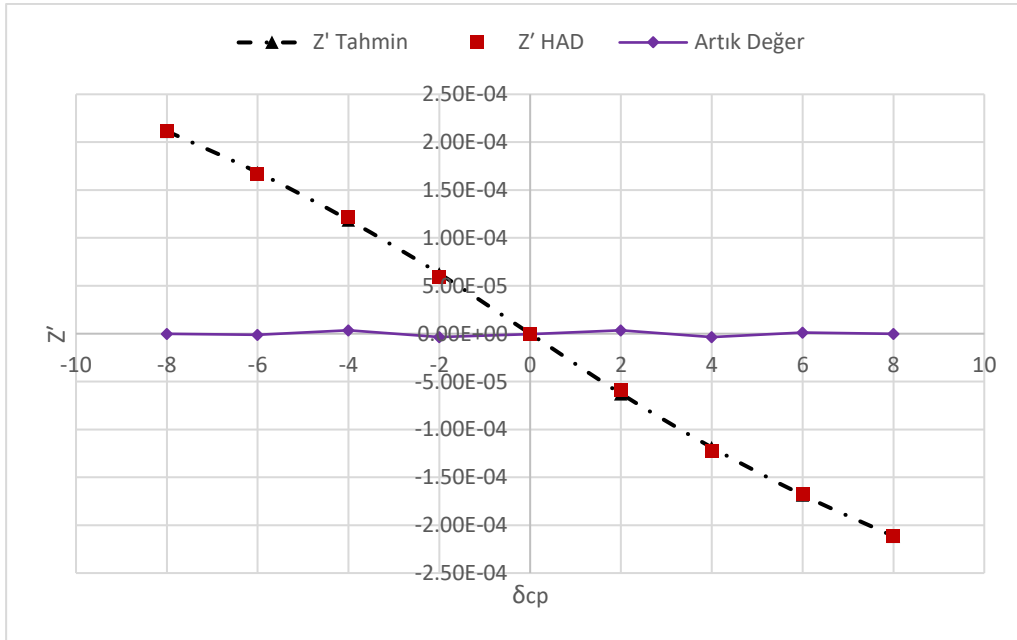
Şekil 7.8’de süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan eksenel kuvvetin temsil edilmesi maksadıyla gerçekleştirilen hidrodinamik katsayıların belirlenmesi kapsamında ufki dümen sapma açısı taraması sonucunda X'_{uu} katsayısı -0.000465623 ve $X'_{\delta_e\delta_e}$ katsayısı da -0.001598689 olarak belirlenmiştir. Bu tarama çalışmasında da X'_{uu} katsayısı sisteme dahil edilmiştir. Beklenildiği gibi ufki dümen sapma açısı taraması sonucunda elde edilen X'_{uu} katsayısının değerinin hücum açısı ve kavitatör yunuslama açısı taramaları sonucunda elde edilen X'_{uu} değerine yüksek mertebede ($> \%97$) yakın olduğu görülmektedir.

Şekil 7.9’da ve Şekil 7.10’da HAD analiz metodları kullanılarak gerçekleştirilen ufki dümen sapma açısı taraması sonucunda sırasıyla elde edilen birimsizleştirilmiş düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti gösterilmiştir. Düşey öteleme kuvvetini ifade ederken Z'_{δ_e} ve $Z'_{\delta_e|\delta_e|}$ katsayıları, yunuslama momenti ifade edilirken M'_{δ_e} ve $M'_{\delta_e|\delta_e|}$ katsayıları kullanılmıştır. Kavitatör yunuslama açısı taraması kapsamında elde edilen HAD verileri kullanılarak $Z - \delta_e$ ve $M - \delta_e$ ilişkileri incelenmiştir. Sonuç olarak sistem üzerindeki oluşan düşey öteleme kuvvetini ve yunuslama momentini ifade ederken lineer katsayılar ek olarak $Z'_{\delta_e|\delta_e|}$ ve $M'_{\delta_e|\delta_e|}$ katsayılarının da çözüm uzayına dahil edildiği durumlarda sonuçların sadakatinin belirgin bir şekilde iyileştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 7.8: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz eksenel kuvvetin değişimi.

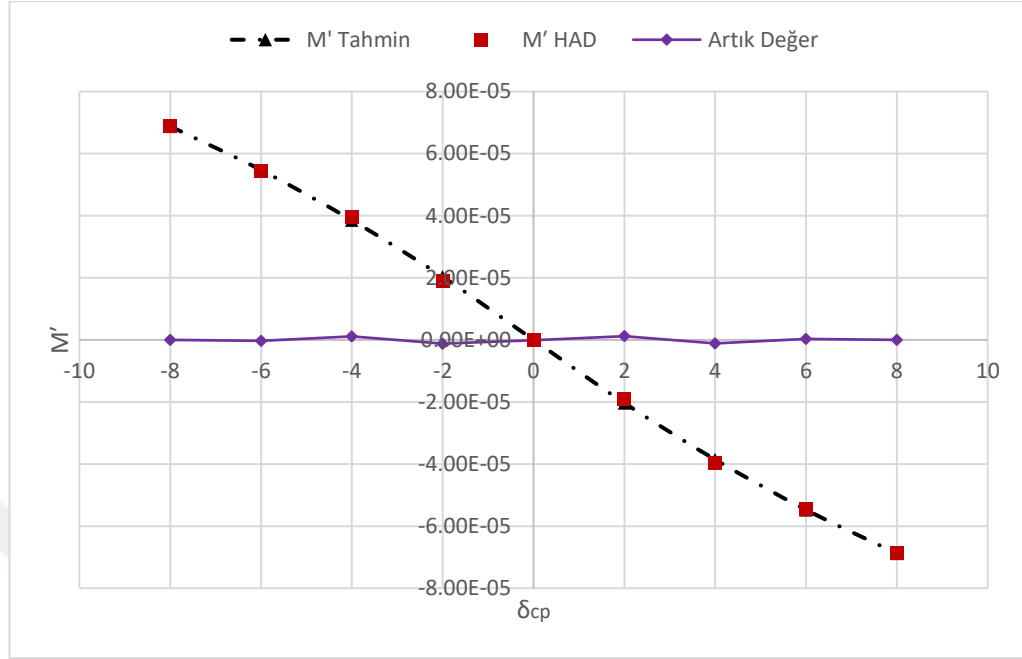
Şekil 7.9’da kavitatör yunuslama açısı taraması kapsamında süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan düşey öteleme kuvvetinin temsil edilmesi amacıyla gerçekleştirilen hidrodinamik katsayıların belirlenmesi çalışmasında Z'_{δ_e} katsayısı -0.00188883 ve $Z'_{\delta_e|\delta_e|}$ katsayısı da 0.0026771 olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.9: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz düşey öteleme kuvvetinin değişimi.

Şekil 7.10’da da kavitatör yunuslama açısı taraması kapsamında süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan yunuslama momentinin temsil edilmesi amacıyla

gerçekleştirilen hidrodinamik katsayıların belirlenmesi çalışmasında M'_{δ_e} katsayısı - 0.000611715 ve $M'_{\delta_e|\delta_e|}$ katsayısı da 0.000852043 olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.10: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz yunuslama momentinin değişimi.

Şekil 7.9 ve Şekil 7.10 incelendiğinde kavitatör sapma açısına bağlı olarak sistemin üzerindeki düşey öteleme kuvveti ile yunuslama momentinin kavitatör sapma açısı taramasında gözlemlenen farklı olarak birbirlerini aynı işaretli oldukları görülmektedir. Bu durumun iki nedeni vardır. Birinci nedeni, seyir boyunca oluşan kuvvet ve momentin büyük çoğunluğunun ufki dümenler üzerinde oluşması ve ikinci nedeni de oluşan düşey öteleme kuvveti merkezinin moment merkezinin arkasında olmasından ötürü ters yönde yunuslama momenti oluşturmasıdır.

7.5 Yunuslama Açısal Hızı (q) Taraması

Yunuslama açısal hızı taraması sonucunda elde edilecek katsayılar süperkavite su altı aracının yunuslama düzlemindeki manevra kabiliyetinin belirlenmesinde öneme sahiptir. Bu kapsamda döner kol analiz modeli kullanılarak 9 farklı yunuslama açısal hızı için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerindeki seyir koşulları belirlenirken süperkavite su altı aracının gövdesi üzerinde yunuslama manevrası boyunca ıslak alan etkilerinin oluşmaması amaçlanmıştır. Yunuslama açısal hızı taraması yapılırken açısal hız limitinin belirlenmesi kapsamında da süperkavite su altı aracının dönüş yarıçapı referans alınmıştır. Bu sebeple yunuslama açısal hızı

taranırken açısal hız limiti $\pm 45^\circ/s$ olacak şekilde belirlenmiştir. Aynı zamanda süperkavite su altı aracının $\pm 45^\circ/s$ gibi yüksek açısal hızlarda seyir yaptığı durumda aracın etrafında oluşan kavitasyon zarfının bozulma eğiliminde olmasına rağmen aracın gövde bölümünü tamamen sardığı da gözlemlenmiştir. Süperkavite su altı aracının dönüş yarıçapının incelenmesine yönelik gerekli açıklamalar Bölüm 9’da yapılmıştır.

Yunuslama açısal hızı taraması dahilinde gerçekleştirilen HAD analizleri sonucunda eksenel kuvvet, düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti hidrodinamik katsayılarla temsil edilmiştir. Katsayıların belirlenmesinin ardından elde edilen sonuçlar HAD analizleri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 7.7’de hidrodinamik katsayıların belirlenmesi çalışması kapsamında yunuslama açısal hızına bağlı olarak süperkavite su altı aracının üzerinde oluşan eksenel kuvvetin (X), düşey öteleme kuvvetinin (Z) ve yunuslama momentinin (M) artık değerleri ve sigma değeri verilmiştir.

Çizelge 7.7: Yunuslama açısal hızı taraması sonucunda elde edilen artık değerler ve sigma değeri.

Yunuslama Açısal Hızı (q)	Artık Değerler		
	Eksenel Kuvvet	Düşey Öteleme Kuvveti	Yunuslama Momenti
$-45^\circ/s$	1.01E-05	-5.68E-08	-3.23E-08
$-30^\circ/s$	8.01E-06	4.76E-08	2.71E-08
$-20^\circ/s$	1.78E-06	1.86E-08	1.05E-08
$-10^\circ/s$	-4.80E-06	-4.71E-08	-2.68E-08
0	-1.26E-05	-2.46E-07	-1.53E-07
Sigma	5.64	4.30	2.99

Sonuçlar incelendiğinde artık değerlerin genel olarak $< 10^{-7}$ mertebesinde kaldığı, sigma değerlerinin ise sıfıra yakın olduğu gözlemlenmektedir. Yunuslama açısal hızı taraması çalışması kapsamında HAD analizleri ile elde edilen değerler ile tahmin edilen değerler incelendiğinde hidrodinamik katsayıların sistemi yüksek sadakatle temsil ettiği gözlemlenmektedir.

Yunuslama açısal hızı taraması kaynaklı oluşan katsayılar lineer ve lineer olmayan hidrodinamik katsayılardan oluşmaktadır. Ek olarak sistemin davranışı incelendiğinde

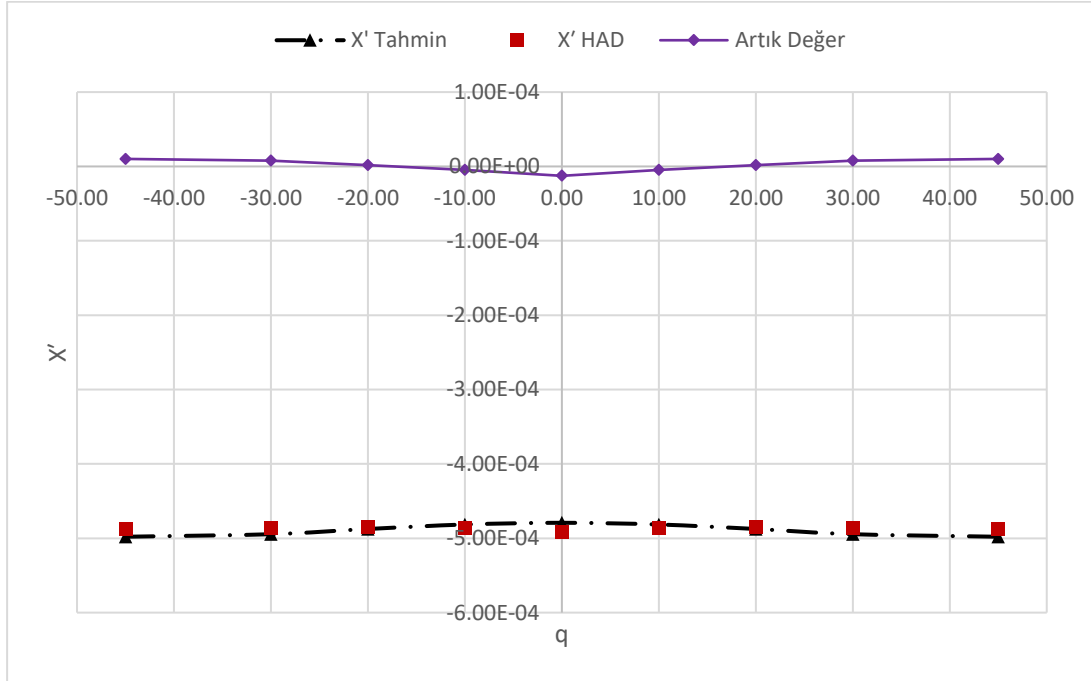
düşey öteleme kuvvetini ve yunuslama momentini ifade etmek için üçüncü dereceden ifadelerin denklem setine dahil edilmesinin yakınsamayı belirgin ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle birinci ve ikinci dereceden katsayılara ek olarak üçüncü dereceden katsayılardan da yararlanılmıştır.

Geleneksel bir su altı aracının belirli bir yunuslama açısal hızında yunuslama manevrası yaptığını varsayalım. Aracın bu manevrası süresince üzerinde oluşacak düşey öteleme kuvvetinin ve yunuslama momentinin büyük bir bölümü aracın gövde bölümü kaynaklıdır. Diğer taraftan süperkavite bir su altı aracı incelendiğinde gövde bölümünün kavitasyon zarfı ile çevrelenmesinden ötürü manevra esnasında oluşacak düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti değerleri geleneksel su altı araçlarına göre daha düşük kalacaktır. Bu nedenle süperkavite su altı araçlarının yüksek hızlarında seyir etmelerine rağmen aracın etrafının su ortamından izole olmasından ve bu izole ortamın korunması gerekliliğinden ötürü bu araçlar geleneksel su altı araçlarına göre düşük manevra kabiliyetlerine sahiptirler.

Şekil 7.11’de 9 farklı seyir koşulu için gerçekleştirilen yunuslama açısal hızı taraması sonucunda elde edilen birimsizleştirilmiş eksenel kuvvetler gösterilmiştir. Şekilde kırmızı ile işaretlenmiş sonuçlar HAD analizleri sonucunda elde edilen birimsiz eksenel kuvvet verilerini, siyah kesikli çizgi ile gösterilen eğri ise X'_{uu} ve X'_{qq} katsayıları kullanılarak temsil edilen birimsiz eksenel kuvveti ifade etmektedir. Ayrıca mor renkle gösterilen çizgi ise artık değerleri temsil etmektedir. HAD verileri incelendiğinde, eksenel kuvvetin değişen q değerlerine bağlı olarak düşük mertebede değiştiği görülmektedir. Bu durumun nedeni taranan yunuslama açısal hızı limitleri içerisinde kalınması kaydıyla süperkavite su altı aracının etrafındaki kavitasyon zarf geometrisinin değişmesine rağmen ıslak alan etkilerinin açısal hıza bağlı olarak değişmemesidir. Islak alan etkilerinin minör değişimlerinden ötürü eksenel kuvvet değerlerindeki değişimlerin de düşük seviyelerde kaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 7.11’de süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan eksenel kuvvetin temsil edilmesi amacıyla gerçekleştirilen hidrodinamik katsayıların belirlenmesi kapsamında X'_{uu} katsayısı -0.000451 ve X'_{qq} katsayısı da -0.00031827 olarak belirlenmiştir. Bu tarama çalışmasında da X'_{uu} katsayısı sisteme dahil edilmiştir. Beklenildiği üzere yunuslama açısal hızı taraması sonucunda elde edilen X'_{uu} katsayısının da hücum açısı

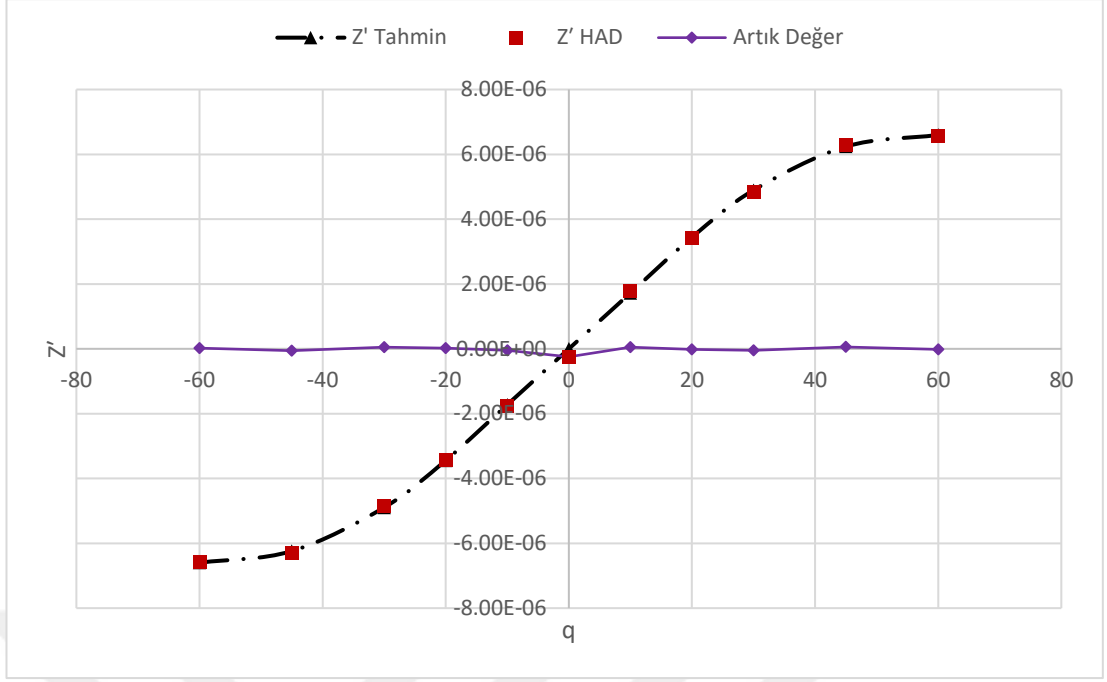
ve kavitatör yunuslama açısı taramaları sonucunda elde edilen X'_{uu} katsayılarına yüksek mertebede ($> \%97$) yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 7.11: Yunuslama açısal hızına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz eksenel kuvvetin değişimi.

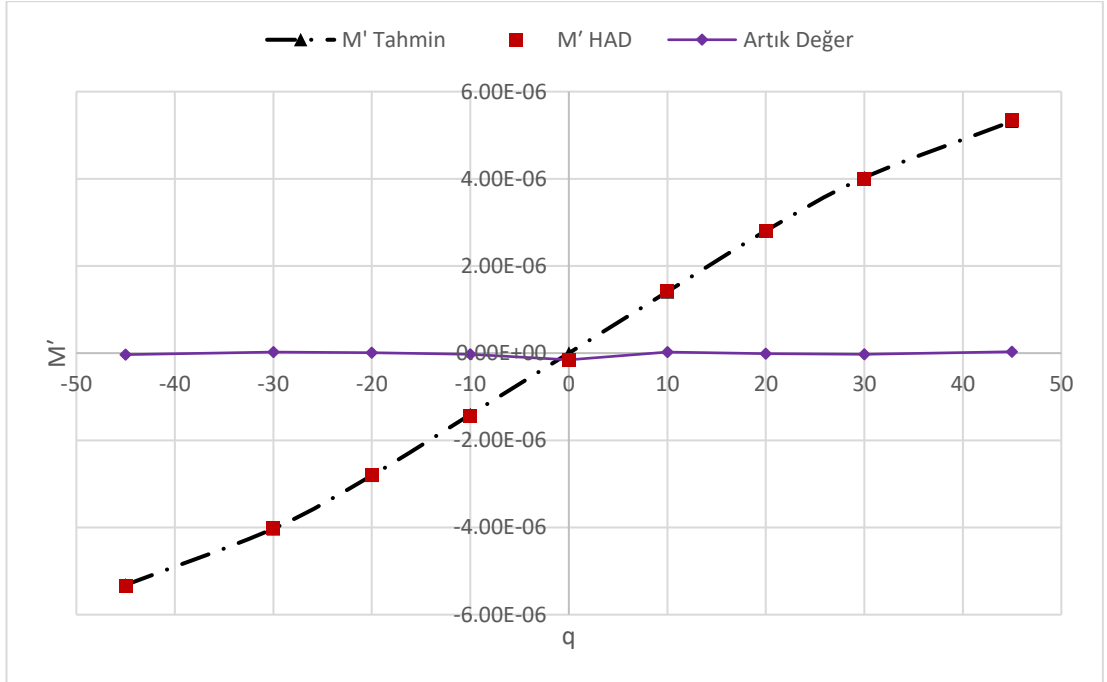
Şekil 7.12'de ve Şekil 7.13'te döner kol mekanizması HAD analiz metodları kullanılarak gerçekleştirilen yunuslama açısal hızı taraması sonucunda sırasıyla elde edilen birimsizleştirilmiş düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti sonuçları verilmiştir. Düşey öteleme kuvvetini ifade ederken Z'_q , $Z'_{q|q|}$ ve Z'_{qqq} katsayıları, yunuslama momenti ifade edilirken de M'_q , $M'_{q|q|}$ ve M'_{qqq} katsayıları kullanılmıştır. Üçüncü dereceden ifadelerin tercih edilmesinin nedeni düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti değerlerinin orjine göre simetrik olması ile birlikte artan yunuslama açısal hızlarına bağlı olarak da sistemin lineerlikten uzaklaşarak üçüncü dereceden ifadelere duyarlı kalmasıdır. Ek olarak hidrodinamik denklemde üçüncü dereceden katsayıların eklenmesi ile birlikte denklem setinin sadakatinde belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir.

Şekil 7.12'de kavitatör yunuslama açısı taraması kapsamında süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan düşey öteleme kuvvetinin temsil edilmesi amacıyla gerçekleştirilen hidrodinamik katsayıların belirlenmesi çalışmasında Z'_q katsayısı $9.29306E-06$, $Z'_{q|q|}$ katsayısı $4.9807E-06$ ve Z'_{qqq} katsayısı da $-7.984E-06$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.12: Yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz düşey öteleme kuvvetinin değişimi.

Şekil 7.13'te de süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan yunuslama momentinin temsil edilmesi maksadıyla gerçekleştirilen hidrodinamik katsayıların belirlenmesi çalışmasında M'_q katsayısı $7.75822E - 06$, $M'_{q|q|}$ katsayısı $2.8255E - 06$ ve M'_{qqq} katsayısı da $-4.47065E - 06$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.13: Kavitatör yunuslama açısına bağlı olarak sistem üzerindeki birimsiz yunuslama momentinin değişimi.

Geleneksel su altı araçlarında negatif yunuslama açısal hızının pozitif düşey öteleme kuvveti ve pozitif yunuslama momenti oluşturduğu bilinmektedir. Şekil 7.12 ve Şekil 7.13 incelendiğinde ise geleneksel su altı araçlarının aksine süperkavite su altı aracında pozitif yunuslama açısal hızında pozitif düşey öteleme kuvveti ve pozitif yunuslama momenti olduğu gözlemlenmiştir.

7.6 5 Serbestlik Derecesinde Hareket Denklem Setinin Oluşturulması

Süperkavite su altı aracının hidrodinamik hidrodinamik denklem setinin kurulması kapsamında belirlenen analiz noktalarında hidrodinamik parametreler incelenmiştir. Bu amaçla hücum açısı, ufki dümen sapma açısı, kavitatör yunuslama açısı ve yunuslama açısal hızı taraması yapılmış, elde edilen HAD sonuçları kullanılarak da hidrodinamik katsayılar çıkarılmıştır.

Tez kapsamında süperkavite su altı aracının hidrodinamik katsayıları belirlenirken, yalnızca yunuslama düzlemindeki katsayılar incelenmiştir. Bunun sonucunda sadece yunuslama düzlemine özgü katsayılar elde edilmiştir. Süperkavite su altı aracının yatay ekseninde eksenel simetrik olması ve araç üzerinde akuple etkiler ile pervane etkilerinin bulunmaması yunuslama düzlemindeki hidrodinamik katsayılar ile sapma düzlemindeki hidrodinamik katsayıları birbirlerinin simetrik koşulu olarak değerlendirebilme imkanı sağlamıştır. Bu nedenle sapma düzlemindeki hidrodinamik katsayılar hesaplanırken HAD analizleri yapılmamış, yunuslama düzlemindeki hidrodinamik katsayıların belirlenmesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan yararlanılmıştır. Yuvarlanma düzlemindeki hidrodinamik katsayıların belirlenmesi bu tezin kapsamı dışında kalmaktadır.

7.6.1 Eksenel kuvvetin ifade edildiği hidrodinamik katsayıların belirlenmesi

Eksenel kuvvetin incelenmesi kapsamında, HAD metodlarından yararlanılarak yapılan 4 farklı tarama çalışması ile katsayılar hesaplanırken her tarama çalışması için farklı bir X'_{uu} katsayısı elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar kapsamında elde edilen bu katsayıların birbirlerine çok yakın olması beklenmekle birlikte katsayılar elde edildikten sonra sonuçlar incelendiğinde katsayıların birbirlerine $> \%97$ mertebesinde yakın oldukları görülmüştür. Ancak hidrodinamik denklem setinde hangi eksenel kuvvet katsayısının kullanılacağına yönelik herhangi bir açıklama yapılmamıştır. Bu kapsamda Çizelge 7.8’de tarama çalışmaları sonucunda elde edilen

X'_{uu} katsayıları gösterilmiştir. Ek olarak bu dört tarama çalışması sonrasında elde edilen eksenel kuvvet katsayılarının aritmetik ortalaması alınarak hidrodinamik denklem setinde yer alacak X'_{uu} katsayısı verilmiştir.

Çizelge 7.8: Dört farklı tarama çalışması sonrasında elde edilen X'_{uu} katsayıları.

Tarama Çalışması	X'_{uu}
Hücum Açısı Taraması (α)	-0.000452491
Ufki Dümen Sapma Açısı Taraması (δ_e)	-0.000454127
Kavitatör Sapma Açısı Taraması (δ_{cp})	-0.000465623
Yunuslama Açısız Hızı Taraması (q)	-0.000451000
Hidrodinamik Denklem Seti	-0.000455810

Süperkavite su altı aracı yatay ekseninde eksensel simetrik bir yapıya sahiptir. Bu duruma ek olarak Froude sayısının yüksek olmasından ötürü yer çekimi etkilerinin de ihmal edilmesinden ötürü süperkavite su altı aracının benzer operasyon koşullarında benzer davranışlar sergilemesi öngörülmektedir. Bu nedenle aracın yunuslama düzlemindeki hareketi kaynaklı ortaya çıkan katsayılar aynı zamanda sapma düzlemindeki hareketini temsil etmek için kullanılabilir. Çizelge 7.9'da aracın 5 serbestlik derecesindeki hidrodinamik modelin oluşturulması kapsamında eksenel kuvvet kaynaklı oluşabilecek hidrodinamik katsayılar verilmiştir.

Çizelge 7.9: Süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan eksenel kuvveti temsil edecek hidrodinamik katsayılar.

Yunuslama Manevrası Etkisinde Oluşan Eksenel Kuvvet Katsayıları	Sapma Manevrasındaki Eşlenikleri
X'_{ww}	X'_{vv}
$X'_{\delta_e \delta_e}$	$X'_{\delta_r \delta_r}$
$X'_{\delta_{cp} \delta_{cp}}$	$X'_{\delta_{cr} \delta_{cr}}$
X'_{qq}	X'_{rr}

7.6.2 Simetrik koşulların belirlenmesi

X'_{uu} katsayısının belirlenmesinin ardından yunuslama düzleminde gerçekleştirilen HAD analizleri sonucunda elde edilen hidrodinamik katsayıların sapma düzlemindeki karşılıkları olan simetrik durumlar belirlenmiştir. Bu çalışma gerçekleştirilirken süperkavite su altı aracının hidrodinamik eksen takımından yararlanılmıştır.

Bu kapsamda ilk olarak hücum açısı (α) taraması sonucunda elde edilen hidrodinamik katsayılar incelenmiş, bu katsayıların simetrik durumları kayma açısı (β) taraması ile elde edilecek hidrodinamik katsayıların temsil edilmesinde kullanılmıştır. HAD analizleri yapılarak gerçekleştirilen hücum açısı taraması kapsamında elde edilen hidrodinamik katsayılar ve bu katsayıların sapma düzlemindeki eşlenikleri Çizelge 7.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.10: Hücum açısı taraması sonucunda elde edilen hidrodinamik katsayılar ve sapma düzlemindeki eşlenikleri.

Hücum Açısı Taraması Sonucunda Elde Edilen Hidrodinamik Katsayılar	Sapma Düzlemindeki Eşlenikleri
Z'_w	Y'_v
$Z'_{w w }$	$Y'_{v v }$
Z'_{www}	Y'_{vvv}
M'_w	$-N'_v$
$M'_{w w }$	$-N'_{v v }$
M'_{www}	$-N'_{vvv}$

Sapma açısının değişime bağlı olarak oluşacak hidrodinamik katsayıların belirlenmesinin ardından ufki dümen sapma açısı (δ_e) taraması sonucunda elde edilen hidrodinamik katsayılar incelenmiş, bu katsayıların simetrik durumları amudi dümen sapma açısı (δ_r) taramasıyla elde edilecek hidrodinamik katsayıların temsil edilmesinde kullanılmıştır. HAD analizleri yapılarak gerçekleştirilen ufki dümen sapma açısı taraması kapsamında elde edilen hidrodinamik katsayılar ile bu katsayıların sapma düzlemindeki eşlenikleri Çizelge 7.11'deki gibidir.

Çizelge 7.11: Ufki dümen sapma açısı taraması sonucunda elde edilen hidrodinamik katsayılar ve sapma düzlemindeki eşlenikleri.

Ufki Dümen Sapma Açısı Taraması Sonucunda Elde Edilen Hidrodinamik Katsayılar	Sapma Düzlemindeki Eşlenikleri
Z'_{δ_e}	Y'_{δ_r}
$Z'_{\delta_e \delta_e }$	$Y'_{\delta_r \delta_r }$
M'_{δ_e}	$-N'_{\delta_r}$
$M'_{\delta_e \delta_e }$	$-N'_{\delta_r \delta_r }$

Amudi dümen sapma açısının değişimiyle oluşacak hidrodinamik katsayıların belirlenmesi çalışmasının tamamlanmasıyla kavitör yunuslama açısı (δ_{cp}) taraması sonucunda elde edilen hidrodinamik katsayılar incelenmiş, incelenen bu katsayıların

simetrik durumları kavitatör sapma açısı (δ_{cy}) taraması ile elde edilecek hidrodinamik katsayıların temsil edilmesinde kullanılmıştır. HAD analizlerinden yararlanılarak gerçekleştirilen kavitatör yunuslama açısı taraması çalışması ile elde edilen hidrodinamik katsayılar ve bu katsayıların sapma düzlemindeki eşlenikleri Şekil 7.12’de verilmiştir.

Çizelge 7.12: Kavitatör sapma açısı taraması sonucunda elde edilen hidrodinamik katsayılar ve sapma düzlemindeki eşlenikleri.

Kavitatör Sapma Açısı Taraması Sonucunda Elde Edilen Hidrodinamik Katsayılar	Sapma Düzlemindeki Eşlenikleri
$Z'_{\delta_{cp}}$	$Y'_{\delta_{cy}}$
$Z'_{\delta_{cp} \delta_{cp} }$	$Y'_{\delta_{cy} \delta_{cy} }$
$M'_{\delta_{cp}}$	$-N'_{\delta_{cy}}$
$M'_{\delta_{cp} \delta_{cp} }$	$-N'_{\delta_{cy} \delta_{cy} }$

Kavitatör sapma açısının değişimi ile elde edilecek hidrodinamik katsayıların belirlenmesinin ardından yunuslama açısal hızı (q) taraması sonucunda elde edilen hidrodinamik katsayılar incelenmiş, bu katsayıların simetrik durumları sapma açısal hızı (r) taramasıyla elde edilecek hidrodinamik katsayıların temsil edilmesinde kullanılmıştır. HAD analizleri yapılarak gerçekleştirilen yunuslama açısal hızı taraması çalışmasıyla elde edilen hidrodinamik katsayılar ve bu katsayıların sapma açısal hızının değişimi ile oluşacak sapma düzlemindeki eşlenikleri Çizelge 7.13’te gösterilmiştir.

Çizelge 7.13: Yunuslama açısal hızı taraması sonucunda elde edilen hidrodinamik katsayılar ve sapma düzlemindeki eşlenikleri.

Yunuslama Açısal Hızı Taraması Sonucunda Elde Edilen Hidrodinamik Katsayılar	Sapma Düzlemindeki Eşlenikleri
Z'_q	$-Y'_r$
$Z'_{q q }$	$-Y'_{r r }$
Z'_{qqq}	$-Y'_{rrr}$
M'_q	N'_r
$M'_{q q }$	$N'_{r r }$
M'_{qqq}	N'_{rrr}

Süperkavite su altı aracının yunuslama düzlemindeki hücum açısı, ufki dümen sapma açısı, kavitatör yunuslama açısı ve yunuslama açısal hızı taramalarından yararlanılarak sırasıyla aracın sapma düzlemindeki kayma açısı, amudi dümen sapma

açısı, kavitatör sapma açısı ve sapma açısal hızı değişimlerine bağlı sapma düzlemine özgü hidrodinamik katsayılar elde edilmiştir. Süperkavite su altı aracı üzerinde akuplet etkilerin ile pervane etkilerinin olmamasından ötürü bu aşamada 5 serbestlik derecesinde hidrodinamik denklem seti oluşturulabilir. Bu kapsamda elde edilen hidrodinamik katsayılar Çizelge 7.14'deki gibidir.

Çizelge 7.14: 5 Serbestlik derecesindeki hidrodinamik denklem setinde kullanılacak hidrodinamik katsayıların sonuçları.

Eksenel Kuvvet (X)		Sapma Kuvveti (Y)		Düşey Öteleme Kuvveti (Z)	
X'_{uu}	-0.00045581	Y'_v	-5.35E-03	Z'_w	-5.35E-03
X'_{vv}	-0.074905525	$Y'_{v v }$	3.81E-01	$Z'_{w w }$	3.81E-01
X'_{ww}		Y'_{vvv}	-2.31E+01	Z'_{www}	-2.31E+01
$X_{\delta_{cy}\delta_{cy}}$	0.000188996	$Y'_{\delta_{cy}}$	3.76E-04	$Z'_{\delta_{cp}}$	3.76E-04
$X_{\delta_{cp}\delta_{cp}}$		$Y'_{\delta_{cy} \delta_{cy} }$	-2.20E-04	$Z'_{\delta_{cp} \delta_{cp} }$	-2.20E-04
$X'_{\delta_r\delta_r}$	-0.001598689	Y'_{δ_r}	-1.89E-03	Z'_{δ_e}	-1.89E-03
$X'_{\delta_e\delta_e}$		$Y'_{\delta_r \delta_r }$	2.68E-03	$Z'_{\delta_e \delta_e }$	2.68E-03
X'_{rr}	-0.00031827	Y'_r	-9.29E-06	Z'_q	9.29E-06
X'_{qq}		$Y'_{r r }$	-4.98E-06	$Z'_{q q }$	4.98E-06
		Y'_{rrr}	7.98E-06	Z'_{qqq}	-7.98E-06
Yunuslama Momenti (M)		Sapma Momenti (N)			
M'_w	-1.87E-03	N'_v	1.87E-03		
$M'_{w w }$	1.27E-01	$N'_{v v }$	-1.27E-01		
M'_{www}	-7.70E+00	N'_{vvv}	7.70E+00		
$M'_{\delta_{cp}}$	-2.80E-04	$N'_{\delta_{cy}}$	2.80E-04		
$M'_{\delta_{cp} \delta_{cp} }$	4.92E-05	$N'_{\delta_{cy} \delta_{cy} }$	-4.92E-05		
M'_{δ_e}	-6.12E-04	N'_{δ_r}	6.12E-04		
$M'_{\delta_e \delta_e }$	8.52E-04	$N'_{\delta_r \delta_r }$	-8.52E-04		
M'_q	7.76E-06	N'_r	7.76E-06		
$M'_{q q }$	2.83E-06	$N'_{r r }$	2.83E-06		
M'_{qqq}	-4.47E-06	N'_{rrr}	-4.47E-06		

8. SÜPERKAVİTE SU ALTI ARACI İÇİN KARARLILIK VE PERFORMANS HESAPLAMALARI

Geleneksel su altı araçlarında olduğu gibi Süperkavite su altı araçlarının da belirlenen operasyon koşullarında seyirlerini gerçekleştirebilmeleri gerekmektedir. Bir süperkavite su altı aracının hidrodinamik form tasarımı kapsamında, aracın iç sistem paketlemesinden ve kavitasyon zarfının özelliklerinden kaynaklanan mekanik kısıtlamalar ve aracın istenen operasyon koşullarında seyrini başarı ile gerçekleştirebilmesi için karşılanması gereken performans parametreleri bulunmaktadır. Yapılan hidrodinamik form tasarımı çalışmalarında mekanik kısıtların sağlanabilmesi ve performans parametrelerinin istenen alt ve üst limitler çerçevesinde maksimize edilmesi gerekmektedir. Süperkavite su altı aracının dış formunun belirlenmesinin ardından süperkavite su altı aracının performans parametrelerinin değerlendirilmesi kapsamında aracın stabilite ve performans hesaplamaları yapılabilmesi için etkin hidrostatik ve hidrodinamik katsayıların belirlenmesi ve bu katsayıların çıkarılması gerekmektedir. Form tasarımının tamamlanması ve sistemin hidrodinamik denklem seti oluşturularak katsayılarının hesaplanmasının ardından geleneksel su altı araçlarında olduğu gibi süperkavite su altı aracı için de stabilite ve performans hesaplamaları yapılabilir. Stabilite ve performans hesaplamalarının yapılması kapsamında aracın kararlılık derecesi, kontrol etkinliği ve manevra kabiliyeti incelenmiştir. Süperkavite su altı aracı tasarlanırken istenilen performans gereksinimlerinin karşılanması amacıyla sistemin kararlılık-manevra kabiliyeti ilişkisinin birlikte incelenmesi gerekmektedir. Bu durumun nedeni sistemin kararlılığı ile manevra kabiliyetinin ters orantılı olmasındandır. Bu kapsamda istenen performans gereksinimlerini sağlanabilmesi amacıyla bir en iyileme çalışması tercih edilmelidir. Süperkavite su altı aracının form tasarımının yapılması, hidrodinamik denklem setinin oluşturulması, hidrodinamik katsayılarının çıkarılması, performans ve stabilite hesaplamalarının yapılmasının ardından istenilen seviyelerde aracının kontrolünü sağlayacak bir oto pilot tasarımı yapılmalıdır. Kontrolcü ve oto pilot tasarımı bu tezin kapsamı dışında kalmaktadır. İleriki çalışmalarda statik kararlılığı ve performans

hesapları yapılan süperkavite su altı aracını performans gereksinimlerini sağlayacak bir şekilde kontrol edebilecek bir oto pilot tasarımı yapılabilir.

8.1. Statik Kararlılığın İncelenmesi

Bu bölümde süperkavite su altı aracı için çıkarılan hidrodinamik denklem seti ve elde edilen hidrodinamik katsayılar referans alınarak aracın statik kararlılığı incelenmiştir. Süperkavite su altı aracının statik kararlılığı yapılacak olan kontrolcü tasarımına girdi olacaktır.

Statik kararlılık uçak gibi bir hava aracı veya denizaltı gibi bir su altı aracı için ele alınabilir. Statik kararlılık, durağan veya seyir esnasında bir aracın herhangi bir bozuntu karşısında sahip olduğu denge konumunu koruma isteğidir. Bir aracın statik kararlılığı arttıkça bozuntulardan etkilenmesi güçleşir. Ancak, statik kararlılığı maksimize edilmesi aracın manevra kabiliyetlerini olumsuz yönde etkilemesinden ötürü tercih edilmemektedir.

Süperkavite su altı aracının eksenel simetrik bir geometriye sahip olmasından ötürü bu tez kapsamında yalnızca doğrusal ve yatay statik kararlılık incelenmiştir. Doğrusal ve yatay statik kararlılığın incelenmesi amacıyla farklı hücum (α) ve kayma (β) açılarında süperkavite su altı aracının moment katsayılarına bakılmıştır. Yapılan hesaplamalarda moment merkezi olarak süperkavite su altı aracının ağırlık merkezi referans alınmıştır.

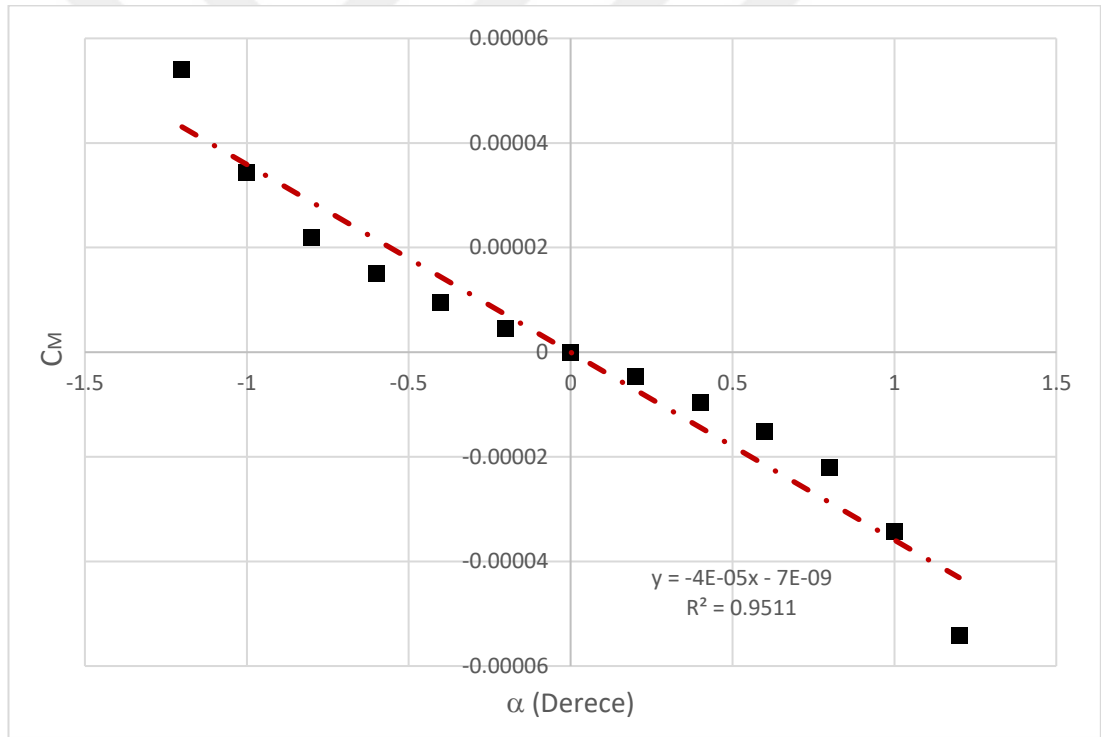
8.1.1. Doğrusal statik kararlılığın incelenmesi

Süperkavite su altı aracının doğrusal statik kararlılığının belirlenebilmesi için su altı aracının yunuslama düzlemindeki hareketi incelenmiştir. Bu kapsamda 160 knot seyir hızında farklı hücum açılarında HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen HAD analizleri sonucunda yunuslama momenti katsayısının (C_M) hücum açısına (α) bağlı değişimi incelenmiş, aracın statik kararlılığına bakılmıştır.

Geleneksel su altı araçlarında gövde bölümünden pervanelere doğru gidildikçe daralan bir yapının hâkim olması nedeniyle aracın basınç merkezi ağırlık merkezine kıyasla aracın burnuna daha yakın bir noktada oluşmaktadır. Basınç merkezinin ağırlık merkezine göre daha önde kalması aracın artan hücum açısına bağlı olarak sistem üzerindeki yunuslama momentini arttırmakta ve aracın statik kararsız olmasına neden

olmaktadır. Bu tez kapsamında oluşturulan süperkavite su altı aracı incelendiğinde, aracın roket motorlu itki sistemlerine sahip olması ve motorun maksimum hacme konumlandırılması prensibinden ötürü aracın kış kısmına gidildikçe form üzerinde herhangi bir daralma yer almamaktadır. Aksine süperkavite su altı aracı burun bölümünde kavitatöre doğru gidildikçe daralan bir yapıya sahiptir. Bu iki nedenden ötürü bu tez kapsamında kullanılan süperkavite su altı aracının statik kararlı olması beklenmektedir.

Yunuslama momenti katsayısı incelenirken aracın üzerinde herhangi bir kavitatör veya ufki dümen sapma açısı olmadığı varsayılmıştır. Şekil 8.1’de süperkavite su altı aracının yunuslama momenti katsayısının hücum açısına bağlı değişimi verilmiştir. Doğrusal statik kararlılığın incelenmesi kapsamında hidrodinamik katsayılar lineerleştirilerek incelenmiştir.



Şekil 8.1: Hücum açısına bağlı lineerleştirilmiş yunuslama momenti ifadesi.

Şekil 8.1 incelendiğinde, süperkavite su altı aracının basınç merkezinin ağırlık merkezine göre daha geride çıktığı ve bu sebeple artan hücum açısına bağlı olarak süperkavite su altı aracının oluşan etkiyi sönmüleyecek şekilde ters yönde bir yunuslama momenti oluşturduğu gözlemlenmektedir. Bu nedenden ötürü süperkavite su altı aracının yunuslama momenti katsayısı-hücum açısı grafiğinin eğimi sıfırdan küçük çıkmakta ve süperkavite su altı aracı doğrusal statik kararlı olma koşulunu

sağlamaktadır. Yani süperkavite su altı aracının seyri esnasında herhangi bir bozuntu faktörüne maruz kalması durumunda değişen hücum açısını sönmüleyebilecek bir yunuslama momenti oluşturabilmektedir. Sistemin statik kararlılık derecesi aracın sönmüleyebileceği maksimum bozuntu değerini ifade etmektedir.

Denklem 8.1’de birimsizleştirilmiş yunuslama momenti ifade edilmiştir [57, 58].

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V^2 l^3} \quad (8.1)$$

$$\frac{\partial C_M}{\partial \alpha_{\text{Süperkavite su altı aracı}}} = -4E - 05 < 0 \rightarrow \text{Doğrusal Statik Kararlı}$$

Sistemin doğrusal statik kararlı çıkması, bu tez kapsamında incelenen süperkavite su altı aracını diğer geleneksel su altı araçlarından ayırmaktadır.

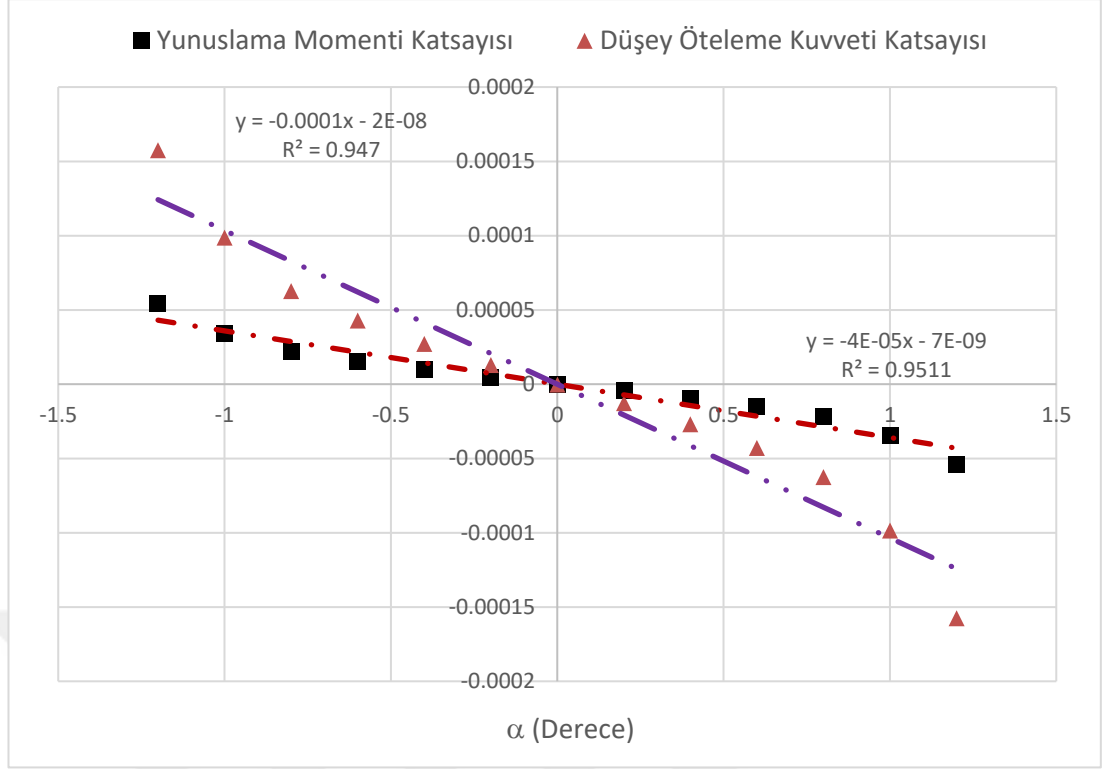
Süperkavite su altı aracının hücum açılı seyir yaptığı durumlarda aracın basınç merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki mesafenin mertebesinin belirlenmesi amacıyla sistemin stabilite marjını incelenmiştir. Stabilite marjını incelemek için bir aracın hücum açılı seyri esnasında araç üzerinde oluşan düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti katsayılarının hücum açısına bağlı olarak değişiminin oranına bakılmalıdır [57, 58]. Denklem 8.2’de stabilite marjını ifadesi verilmiştir.

$$\text{Stabilite Marjını} \rightarrow \frac{M'_{\alpha}}{Z'_{\alpha}} = \frac{X_{HM} - X_{CG}}{l} \quad (8.2)$$

Denklemde verilen X_{HM} ifadesi hidrodinamik moment merkezinin burundan eksenel yönde uzaklığını, X_{CG} ifadesi süperkavite su altı aracının ağırlık merkezinin burundan eksenel yönde uzaklığını ve l ifadesi de aracın uzunluğunu ifade etmektedir.

Stabilite marjının incelenebilmesi amacıyla süperkavite aracı üzerinde herhangi bir sapma açısının bulunmadığı yalnızca hücum açısının bulunduğu durum için gerçekleştirilen HAD analizleri referans alınmıştır. Gerçekleştirilen HAD analizleri sonucunda elde edilen düşey öteleme kuvveti katsayısı ve yunuslama momenti katsayısının hücum açısına bağlı değişimi Şekil 8.2’de verilmiştir.

Şekil 8.2 incelendiğinde düşey öteleme kuvveti katsayısının eğiminin -0.0001, yunuslama momenti katsayısının eğiminin ise -4E-05 olduğu görülmektedir. Şekil 8.2’den yararlanılarak stabilite marjını hesabı denklem 8.3’te verilmiştir.



Şekil 8.2: Lineerleştirilmiş düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti katsayısı.

$$Stabilite\ Marjını \rightarrow \frac{M'_{\alpha}}{Z'_{\alpha}} = \frac{4E-05}{0.0001} = 0.4\ metre \quad (8.3)$$

Denklem 8.2’de verilen stabilite marjını hesabından ve denklem 8.3’de verilen stabilite marjını değerinden yararlanılarak süperkavite su altı aracının doğrusal eksenindeki hidrodinamik merkezi hesaplanabilir. Bu kapsamda hesaplanan süperkavite su altının hidrodinamik merkezi Denklem 8.4’teki gibidir.

$$Stabilite\ Marjını \rightarrow 0.4 = \frac{X_{HM} - 1.0788}{2} \rightarrow X_{HM} = 1.8788\ metre \quad (8.4)$$

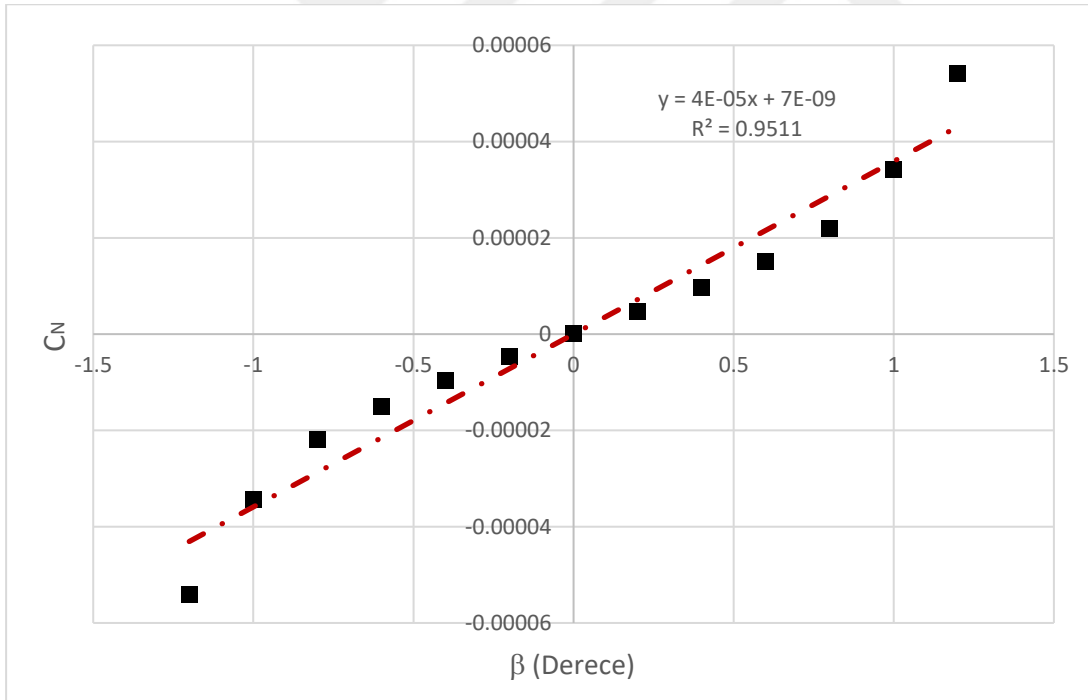
Stabilite marjınının sıfırdan büyük olması sistemin statik kararlı olduğunun sıfırdan küçük olması ise sistemin statik kararsız olduğunun bir göstergesidir. Denklem 8.4 referans alındığında aracın statik kararlı olmasından ötürü ağırlık merkezi hidrodinamik merkezin önünde çıkmaktadır. Bu kapsamda süperkavite su altı aracının hidrodinamik merkezi burundan 1.8788 metre uzaklıkta çıkmaktadır. Ayrıca aracın hidrodinamik merkezi ağırlık merkezinin 0.8 metre gerisindedir.

Bu bölümde yapılan çalışmalar kapsamında süperkavite su altı aracının doğrusal statik kararlı olduğu ve aynı ekseninde stabilite marjınının sıfırdan büyük çıktığı gözlemlenmiştir.

8.1.2. Yatay statik kararlılığın incelenmesi

Süperkavite su altı aracının yatay statik kararlılığının belirlenebilmesi için su altı aracının kayma düzlemindeki hareketi incelenmiştir. Bu kapsamında 160 knot seyir hızında farklı kayma açılarında HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen HAD analizleri sonucunda sapma momenti katsayısının (C_N) hücum açısına (β) bağlı değişimi incelenmiş, aracın statik kararlılığına bakılmıştır. Tez kapsamında kullanılan süperkavite su altı aracında da olduğu gibi X-eksenine göre eksenel simetrik su altı araçlarında sapma momenti katsayısı yunuslama momenti katsayısının -1 ile çarpılmış haline eşittir.

Sapma momenti katsayısı incelenirken aracın üzerinde herhangi bir kavitatör veya amudi dümen sapma açısı olmadığı varsayılmıştır. Şekil 8.3'te süperkavite su altı aracının sapma momenti katsayısının hücum açısına bağlı değişimi verilmiştir. Yatay statik kararlılığın incelenmesi kapsamında da hidrodinamik katsayılar lineerleştirilmiştir.



Şekil 8.3: Sapma açısına bağlı lineerleştirilmiş sapma momenti ifadesi.

Şekil 8.3 incelendiğinde, artan sapma açısına bağlı olarak süperkavite su altı aracının üzerinde oluşan sapma momentinin de doğru orantılı bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Bir sistemin yatay statik kararlı olabilmesi için sapma momenti katsayısının sapma açısına bağlı olarak eğiminin pozitif olması gerekmektedir [61, 62].

Bu çalışmada da süperkavite su altı aracının sapma momenti katsayısının kayma açısına bağlı eğimi sıfırdan büyük çıkmakta ve bu sayede süperkavite su altı aracı yatay statik kararlı olma koşulunu sağlamaktadır.

Denklem 8.5’te birimsizleştirilmiş sapma momenti ifade edilmiştir [61, 62].

$$C_N = \frac{N}{\frac{1}{2}\rho V^2 l^3} \quad (8.5)$$

$$\frac{\partial C_N}{\partial \beta}_{\text{süperkavite su altı aracı}} = 4E - 05 > 0 \rightarrow \text{Yatay Statik Kararlı}$$

Sistemin yatay statik kararlı çıkması, bu tez kapsamında incelenen süperkavite su altı aracını diğer geleneksel su altı araçlarından ayırmaktadır.

Bir sistemin statik kararsızlığının indirgenebilmesi için bu tez kapsamında kullanılan süperkavite su altı aracında da yapıldığı gibi kuyruk bölümünün eğimi azaltılabilir, hidrodinamik merkez olabildiğince arkaya taşınabilir. Hidrodinamik merkezin arkaya taşınmasına yardımcı olacak bir diğer durum da su altı aracı üzerindeki sabit kanatların yüzey alanlarının artırılmasıdır. Bu sayede oluşan kuvvet dengesine bağlı olarak sistemin hidrodinamik merkezi daha geriye kayacaktır.

Bir sistemin statik kararlı olması sisteme belirli ölçülerdeki bozuntulara karşı direnç gösterebilme kabiliyeti sağlamaktadır. Ancak statik kararlı sistemler de belirli seviyelerin üzerindeki bozuntulara karşı yeterli direnci gösteremeyeceklerdir. Süperkavite su altı araçları düşük manevra kabiliyetine sahip olmakla birlikte herhangi bir manevra durumunda kavitasyon zarfının ve süperkavite su altı aracının kavitasyon zarfı içerisindeki konumunun değişmesine bağlı olarak ıslak alan dengesinin bozulmasından ötürü yüksek mertebede bir bozuntuya maruz kalırlar. Bu nedenle süperkavite su altı araçlarının statik kararlı olmalarının dışında dinamik olarak da kararlı olmaları manevra esnasındaki kontrolün sağlanabilmesi için gereklidir. Bu nedenle tez kapsamında oluşturulan süperkavite su altı aracının dinamik kararlılığının incelenmesi gerekmektedir.

8.2. Dinamik Kararlılığın İncelenmesi

Bu bölümde süperkavite su altı aracı için çıkarılan hidrodinamik denklem seti ve elde edilen katsayılar referans alınarak aracın dinamik kararlılığı incelenmiştir. Süperkavite su altı aracının dinamik kararlılığı yapılacak olan kontrolcü tasarımına girdi olacaktır.

Dinamik kararlılık, durağan veya seyir esnasında bir aracın herhangi bir bozuntu faktörüne maruz kalması durumunda denge konumunu sahip olduğu kontrol yüzeylerini kullanarak koruma isteğidir. Dinamik olarak kararlı bir sistem üzerinde oluşacak bozuntuları kontrol yüzeylerini kullanarak sönümleyebilmektedir. Dinamik olarak kararsız sistemler iste eğer statik olarak da kararsızlarsa üzerlerinde oluşan bir bozuntu durumunda denge durumundan uzaklaşacaklardır. Dinamik olarak kararsız ancak statik olarak kararlı sistemlerde de araç belirli bir bozuntuya kadar oluşacak momentleri sönümleyebilecek kabiliyette olacaktır. Genel olarak statik olarak kararsız bir sistemin dinamik olarak kararlı olması sistemin kararlı olması için yeterli olmakla birlikte sistemin statik olarak kararlı olup dinamik olarak kararsız olması sistemi kararlı olarak nitelendirebilmek için yeterli değildir.

Geleneksel su altı araçlarında aracın üzerinde oluşacak bozuntuları engelleyebilecek dümenleri bulunmaktadır. Süperkavite su altı araçlarında da bozuntuyu sönümleyecek dümenlerin yanı sıra sistemin dinamik kararlılığını arttırabilecek kavitatörü de bulunmaktadır. Bu nedenle tez kapsamında oluşturulan süperkavite su altı aracının dinamik kararlılığı incelenirken aracın kavitatörü de dikkate alınmıştır, hidrodinamik denklem setine kavitatörü içeren katsayılar da eklenmiştir.

Süperkavite su altı aracının eksenel simetrik bir geometriye sahip olmasından ötürü bu tez kapsamında statik kararlılığın incelenmesinde olduğu gibi yalnızca yatay ve düşey dinamik kararlılık durumları incelenmiştir.

Yatay ve düşey dinamik kararlılığın incelenmesi amacıyla süperkavite su altı araçları için oluşturulan hidrodinamik denklem setinden faydalanılmış, lineer manevra katsayıları kullanılmıştır. Bu kapsamda HAD analizleri ile elde edilen sayısal veriler kullanılmış, bu verilerden ve hidrodinamik modelden yola çıkılarak sistemin dinamik kararlılık koşulları incelenmiştir.

8.2.1. Yatay dinamik kararlılığın incelenmesi

Yatay dinamik kararlılığının incelenmesi kapsamında ilk olarak sapma kuvvetini ve sapma momentini ifade eden denklem seti çıkarılmıştır. Bu kapsamda süperkavite su altı aracının manevrası boyunca gövde üzerinde herhangi bir ıslak alan oluşmadığı hız rejimi incelenmiştir. Denklem seti çıkarılırken yalnızca lineer manevra katsayıları kullanılmıştır. Bu nedenle Taylor Serisi yalnızca birinci dereceden türevleri içerecek seviyede açılmıştır. Sonrasında kararlılığın incelenmesi amacıyla üzerinde herhangi

bir ivmelenme olmadan hareket eden süperkavite su altı aracının R dönüş yarıçapında bir manevra yaptığı ve bu manevra süresince $-\delta_r$ ve $+\delta_{cy}$ kontrol yüzeyi komutları ile $+r$ açısal hızında seyir ettiğini varsayalım. İki kontrol yüzeyinin farklı sapma açılarında seçilmesinin nedeni iki kontrol yüzeyinin zıt işaretli sapmalarında aynı yönde sapma kuvveti oluşturmalarıdır. Süperkavite su altı aracının sapma manevrası sırasında denge koşullarını sağlaması gereken lineerleştirilmiş sapma kuvveti ve sapma momenti denklemleri sırasıyla Denklem 8.6'daki ve 8.7'deki gibidir.

$$Y_v v + Y_{\delta_r} \delta_r + Y_{\delta_{cy}} \delta_{cy} + Y_r r = m(u_0 r) \quad (8.6)$$

$$N_v v + N_{\delta_r} \delta_r + N_{\delta_{cy}} \delta_{cy} + N_r r = 0 \quad (8.7)$$

Süperkavite su altı aracının sapma açısal hızının etkisindeki hareketi incelendiğinde aracın $+\delta_r$ dümen sapmasında ve $+\delta_{cy}$ kavitatör sapma açısında $+N$ momentlerini oluşturduğu görülmektedir. Ek olarak $+\delta_r$ dümen sapması için $-Y$ kuvveti, $+\delta_{cy}$ kavitatör sapma açısı için de $+Y$ kuvveti oluşturduğu görülmektedir. Amudi dümen ve kavitatör sapma açılarında kuvvet yönünün ters çıkmasına rağmen moment yönlerinin aynı çıkmasının nedeni amudi dümen kuvvet merkezinin ağırlık merkezinin gerisinde, kavitatör kuvvet merkezinin ise ağırlık merkezinin önünde yer almasındandır. Bu durum süperkavite su altı araçlarını geleneksel su altı araçlarından ayırmaktadır.

Süperkavite su altı aracının yatay dinamik kararlılığı iki adet kontrolcüye sahip olmasından ötürü ilk olarak amudi dümenler için incelenmiş, sonrasında ise aynı işlemler kavitatör sapması için tekrarlanmıştır. Bu kapsamda ilk olarak amudi dümenlerin sapma düzlemindeki dinamik kararlık koşulunu sağlayıp sağlamadığına bakılmıştır. Denklem 8.6'da ve denklem 8.7'de verilen denklem setinden yararlanılarak kavitatör sapma açısının 0 olduğu durum için $\frac{r}{\delta_r}$ ifadesine denklem 8.8'deki gibi ulaşılabilir.

$$\frac{r}{\delta_r} = -\frac{Y_v N_{\delta_r} - N_v Y_{\delta_r}}{Y_r N_r - N_v (Y_r - m u_0)} \quad (8.8)$$

Süperkavite su altı aracının sapma manevrasını gerçekleştirebilmesi için $-\delta_r$ kontrol yüzeyi sapmasında $+r$ sapma açısal hızında seyir etmesi gerekmektedir. Bu nedenle $\frac{r}{\delta_r}$ ifadesinin negatif çıkması gerekmektedir.

Süperkavite su altı araçları için sapma düzlemindeki hidrodinamik katsayılar incelendiğinde katsayıların işaretlerinin geleneksel su altı araçlarından farklı davranış sergilediği görülmektedir.

$$N_{\delta_r} > 0, \quad N_v > 0, \quad Y_{\delta_r} < 0, \quad Y_v < 0$$

Bu tez kapsamındaki süperkavite su altı aracı için elde edilen lineerleştirilmiş hidrodinamik katsayılar kullanılarak $-(Y_v N_{\delta_r} - N_v Y_{\delta_r})$ ifadesinin her zaman sıfırdan küçük çıktığı gözlemlenmiştir ($-3.72E08$). Bu durum dikkate alındığında, sistemin yatay düzlemde dinamik kararlılığından söz edebilmemiz için $Y_r N_r - N_v (Y_r - m u_0)$ ifadesinin de sıfırdan büyük olması gerekmektedir.

Süperkavite su altı araçlarının farklı davranış sergilemesinin nedenleri, iki adet kontrolcüye sahip olmaları ve değişen operasyon koşullarına bağlı olarak kavitasyon zarfının değişmesiyle birlikte ıslak alan etkilerinin farklılaşmasıdır. Denklem 8.9'da süperkavite su altı aracı için yatay dinamik kararlılık koşulu verilmiştir.

$$Yatay\ Dinamik\ Kararlılık\ Koşulu \rightarrow Y_r N_r - N_v (Y_r - m u_0) > 0 \quad (8.9)$$

Süperkavite su altı aracının 160 knot seyir hızında farklı amudi dümen sapma açılarında ve farklı sapma açısal hızlarında HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda süperkavite su altı aracının lineerleştirilmiş denklem seti için hidrodinamik katsayıları çıkarılmıştır. Bu kapsamda $Y_r = -118.439 (N.s/rad)$, $N_r = 103.384 (Nm.s/rad)$, $Y_v = -80970 (N.s/m)$ ve $N_v = 69630 (N.s)$ olarak belirlenmiştir. Süperkavite su altı aracının yaptığı sapma manevrası boyunca sahip olduğu kayma açısının (β) küçük değerlere sahip olduğu ve bu nedenle $U = u_0 \cos \beta$ yerine $U = u_0$ eşitliğinin kullanılabileceği varsayılmıştır. Elde edilen bilgilerden yararlanılarak sistemin yalnızca amudi dümen sapmasının etkisindeki yatay dinamik kararlılık koşulu incelendiğinde Denklem 8.10'a ulaşılmıştır.

$$Y_r N_r - N_v(Y_r - mu_0) = 3.61E08 > 0 \quad (8.10)$$

Amudi dümenlerin dinamik kararlılığa olan etkisinin incelenmesinin ardından kavitatör sapma açısının sapma düzlemindeki dinamik kararlık koşulunu sağlayıp sağlamadığına bakılmıştır. Denklem 8.6'de ve denklem 8.7'de verilen denklem setinden yararlanılarak amudi dümen sapma açısının 0 olduğu durum için $\frac{r}{\delta_{cy}}$ ifadesine denklem 8.11'deki gibi ulaşılabilir.

$$\frac{r}{\delta_{cy}} = -\frac{Y_v N_{\delta_{cy}} - N_v Y_{\delta_{cy}}}{Y_r N_r - N_v(Y_r - mu_0)} \quad (8.11)$$

Süperkavite su altı aracının sapma manevrasını gerçekleştirebilmesi için $+\delta_{cy}$ kontrol yüzeyi sapmasında $+r$ sapma açısı hızında seyir etmesi gerekmektedir. Bu nedenle $\frac{r}{\delta_{cy}}$ ifadesinin pozitif çıkması gerekmektedir.

Süperkavite su altı araçları için sapma düzlemindeki kavitatör kaynaklı hidrodinamik katsayılar incelendiğinde katsayıların davranışlarının geleneksel su altı araçlarından farklı olduğu görülmektedir.

$$N_{\delta_{cy}} > 0, Y_{\delta_{cy}} > 0$$

Bu tez kapsamındaki süperkavite su altı aracı için elde edilen lineerleştirilmiş hidrodinamik katsayılar kullanılarak $-(Y_v N_{\delta_{cy}} - N_v Y_{\delta_{cy}})$ ifadesinin her zaman sıfırdan büyük çıktığı gözlemlenmiştir (8.95E08). Bu durum dikkate alındığında, sistemin kavitatör etkisindeyken yatay düzlemdeki dinamik kararlılığından söz edebilmemiz için $Y_r N_r - N_v(Y_r - mu_0)$ ifadesinin de sıfırdan büyük olması gerekmektedir. Denklem 10.9'da verilen yatay dinamik kararlılık koşulu kavitatör etkisindeki dinamik kararlılığı da incelerken kullanılabilir. Buradaki ifadelerin kontrol yüzeyine bağlı olmamasından ötürü sapma düzlemi için elde edilen sonuç değişmeyecektir. $Y_r N_r - N_v(Y_r - mu_0)$ ifadesi denklem 8.10'daki gibi pozitif çıkacak ve sistem yatay düzlemde statik kararlı olacaktır.

Bu iki inceleme süperkavite su altı aracının amudi ve kavitatör sapma açısının etkisinde yatay düzlemde dinamik kararlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

8.2.2. Düşey dinamik kararlılığın incelenmesi

Düşey dinamik kararlılığının incelenmesi kapsamında ilk olarak düşey öteleme kuvvetini ve yunuslama momentini ifade eden denklem seti çıkarılmıştır. Bu kapsamda süperkavite su altı aracının manevrası boyunca gövde üzerinde herhangi bir ıslak alan oluşmadığı hız rejimi incelenmiştir. Denklem seti çıkarılırken yalnızca lineer manevra katsayıları kullanılmıştır. Bu nedenle Taylor Serisi yalnızca birinci dereceden türevleri içerecek seviyede açılmıştır. Sonrasında kararlılığın incelenmesi amacıyla üzerinde herhangi bir ivmelenme olmadan hareket eden süperkavite su altı aracının R dönüş yarıçapında bir manevra yaptığı ve bu manevra süresince $+\delta_e$ ve $-\delta_{cp}$ kontrol yüzeyi komutları ile q açisal hızında seyir ettiğini varsayalım. İki kontrol yüzeyinin farklı açılarında seçilmesinin nedeni iki kontrol yüzeyinin de zıt işaretli sapmalarında aynı yönde düşey öteleme kuvveti oluşturmalarıdır. Süperkavite su altı aracının sapma manevrası sırasında denge koşullarını sağlaması gereken lineerleştirilmiş düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti denklemleri sırasıyla denklem 8.12'deki ve 8.13'teki gibidir.

$$Z_w w + Z_{\delta_e} \delta_e + Z_{\delta_{cp}} \delta_{cp} + Z_q q = -m(u_0 r) \quad (8.12)$$

$$M_w w + M_{\delta_e} \delta_e + M_{\delta_{cp}} \delta_{cp} + M_q q = 0 \quad (8.13)$$

Süperkavite su altı aracının sapma açisal hızının etkisindeki hareketi incelendiğinde aracın $-\delta_e$ dümen sapmasında ve $-\delta_{cp}$ kavitatör yunuslama açısında $+M$ momentlerini oluşturduğu görülmektedir. Ek olarak $-\delta_e$ dümen sapması için $+Z$ kuvveti, $-\delta_{cy}$ kavitatör sapma açısı için de $-Z$ kuvveti oluşturduğu görülmektedir. Ufki dümen ve kavitatör yunuslama açılarında kuvvet yönünün ters çıkmasına rağmen moment yönlerinin aynı çıkmasının nedeni ufki dümen kuvvet merkezinin ağırlık merkezinin gerisinde, kavitatör kuvvet merkezinin ise ağırlık merkezinin önünde yer almasındandır. Bu durum süperkavite su altı araçlarını geleneksel su altı araçlarından ayırmaktadır.

Süperkavite su altı aracının düşey dinamik kararlılığı iki adet kontrolcüye sahip olmasından ötürü ilk olarak ufki dümenler için incelenmiş, sonrasında ise aynı işlemler kavitatör yunuslama açısı için tekrarlanmıştır. Bu kapsamda ilk olarak ufki dümenlerin sapma düzlemindeki dinamik kararlık koşulunu sağlayıp sağlamadığına bakılmıştır.

Denklem 8.12’de ve denklem 8.13’te verilen denklem setinden yararlanılarak kavitatör yunuslama açısının 0 olduğu durum için $\frac{q}{\delta_e}$ ifadesine denklem 8.14’teki gibi ulaşılabilir.

$$\frac{q}{\delta_e} = -\frac{Z_w M_{\delta_e} - M_w Z_{\delta_e}}{Z_w M_q - M_w (Z_q + m u_0)} \quad (8.14)$$

Süperkavite su altı aracının sapma manevrasını gerçekleştirebilmesi için $+\delta_e$ kontrol yüzeyi sapmasında $+q$ sapma açısal hızında seyir etmesi gerekmektedir. Bu nedenle $\frac{q}{\delta_e}$ ifadesinin pozitif çıkması gerekmektedir. Bu durum geleneksel su altı araçlarına göre farklılık göstermektedir. Aynı şekilde süperkavite su altı araçları için sapma düzlemindeki hidrodinamik katsayılar incelendiğinde de katsayıların işaretlerinin geleneksel su altı araçlarından farklı davranış sergilediği görülmektedir.

$$M_{\delta_e} < 0, \quad M_w < 0, \quad Z_{\delta_e} < 0, \quad Z_w < 0$$

Bu tez kapsamındaki süperkavite su altı aracı için elde edilen lineerleştirilmiş hidrodinamik katsayılar kullanılarak $-(Z_w M_{\delta_e} - M_w Z_{\delta_e})$ ifadesinin her zaman sıfırdan büyük çıktığı gözlemlenmiştir (3.72E08). Bu durum dikkate alındığında, sistemin yatay düzlemde dinamik kararlılığından söz edebilmemiz için $Z_w M_q - M_w (Z_q + m u_0)$ ifadesinin sıfırdan büyük olması gerekmektedir. Denklem 8.15’te süperkavite su altı aracı için yatay dinamik kararlılık koşulu verilmiştir.

$$\text{Düşey Dinamik Kararlılık Koşulu} \rightarrow Z_w M_q - M_w (Z_q + m u_0) > 0 \quad (8.15)$$

Süperkavite su altı aracının 160 knot seyir hızında farklı amudi dümen sapma açılarında ve farklı sapma açısal hızlarında HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda süperkavite su altı aracının lineerleştirilmiş denklem seti için hidrodinamik katsayıları çıkarılmıştır. Bu kapsamda $Z_q = 118.439 \text{ (N.s/rad)}$, $M_q = 103.384 \text{ (Nm.s/rad)}$, $Z_w = -80970 \text{ (N.s/m)}$ ve $M_w = -69630 \text{ (N.s)}$ olarak belirlenmiştir. Süperkavite su altı aracının yaptığı sapma manevrası boyunca sahip olduğu kayma açısının (β) küçük değerlere sahip olduğu ve bu nedenle $U = u_0 \cos \beta$ yerine $U = u_0$ eşitliğinin kullanılabileceği varsayılmıştır. Elde edilen bilgilerden yararlanılarak sistemin yalnızca ufki dümen sapmasının

etkisindeki yatay dinamik kararlılık koşulu incelendiğinde denklem 8.16'ya ulaşılmıştır.

$$Z_w M_q - M_w (Z_q + m u_0) = 3.61E08 > 0 \quad (8.16)$$

Ufki dümenlerin dinamik kararlılığa olan etkisinin incelenmesinin ardından kavitatör yunuslama açısının yunuslama düzlemindeki dinamik kararlık koşulunu sağlayıp sağlamadığına bakılmıştır. Denklem 10.13'deki ve denklem 10.14'deki denklem setinden yararlanılarak ufki dümen sapma açısının 0 olduğu durum için $\frac{q}{\delta_{cp}}$ ifadesine denklem 8.17'deki gibi ulaşılabilir.

$$\frac{q}{\delta_e} = - \frac{Z_w M_{\delta_{cp}} - M_w Z_{\delta_{cp}}}{Z_w M_q - M_w (Z_q + m u_0)} \quad (8.17)$$

Süperkavite su altı aracının sapma manevrasını gerçekleştirebilmesi için $-\delta_{cp}$ kontrol yüzeyi saptasında $+q$ sapma açısal hızında seyir etmesi gerekmektedir. Bu nedenle $\frac{q}{\delta_{cp}}$ ifadesinin negatif çıkması gerekmektedir. Süperkavite su altı araçları için yunuslama düzlemindeki kavitatör kaynaklı hidrodinamik katsayılar incelendiğinde katsayıların davranışlarının geleneksel su altı araçlarından farklı olduğu görülmektedir.

$$M_{\delta_{cp}} < 0, \quad Z_{\delta_{cp}} > 0$$

Bu tez kapsamındaki süperkavite su altı aracı için elde edilen lineerleştirilmiş hidrodinamik katsayılar kullanılarak $-(Z_w M_{\delta_{cp}} - M_w Z_{\delta_{cp}})$ ifadesinin her zaman sıfırdan küçük çıktığı gözlemlenmiştir ($-8.95E08$). Bu durum dikkate alındığında, sistemin kavitatör etkisindeyken düşey düzlemdeki dinamik kararlılığından söz edebilmemiz için $Z_w M_q - M_w (Z_q + m u_0)$ ifadesinin pozitif olması gerekmektedir. Denklem 10.9'da verilen yatay dinamik kararlılık koşulu kavitatör etkisindeki dinamik kararlılığı da incelerken kullanılabilir. Buradaki ifadelerin kontrol yüzeyine bağlı olmamasından ötürü yunuslama düzlemi için elde edilen sonuç değişmeyecektir. $Z_w M_q - M_w (Z_q + m u_0)$ ifadesi denklem 8.16'daki gibi pozitif çıkacak ve sistem düşey düzlemde statik kararlı olacaktır.

Bu iki inceleme süperkavite su altı aracının amudi ve kavitatör sapma açısının etkisinde yatay düzlemde dinamik kararlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

8.3. Dönüş Yarıçapının İncelenmesi

Süperkavite su altı aracının kararlılığının incelenmesinin ardından iki kontrol yüzeyinin de etkin olduğu durum için sistemin sapma manevrasının performansı incelenebilir. Bu kapsamda süperkavite su altı aracının zamandan bağımsız bir şekilde hareket ettiği varsayılarak sapma düzlemindeki dönüş yarıçapı hesaplanmıştır. Dönüş yarıçapı hesaplanırken sistemin üzerinde herhangi bir bozuntu faktörünün olmadığı varsayılmıştır. Yapılacak performans inceleme çalışması ile sistemin manevra kabiliyeti gözlemlenebilecektir. Sapma manevrasının incelenecek olmasından ötürü hidrostatik bileşenlerin sistemin performans hesaplaması üzerine bir etkisi olmayacaktır. Dönüş yarıçapı hesaplanırken denklem 8.6'daki ve denklem 8.7'deki ifadelerden yararlanılmıştır.

$$Y_v v + Y_{\delta_r} \delta_r + Y_{\delta_{cy}} \delta_{cy} + Y_r r = m(u_0 r) \quad (8.6)$$

$$N_v v + N_{\delta_r} \delta_r + N_{\delta_{cy}} \delta_{cy} + N_r r = 0 \quad (8.7)$$

Süperkavite su altı aracının minimum dönüş yarıçapında hareket edebilmesi için su altı aracının $+\delta_{cy}$ kavitatör sapma açısında, $-\delta_r$ amudi dümen sapma açısında sapma manevrası yapması gerekmektedir. Bu durumda dönüş yarıçapı minimum değerini alacak ve dönüş yarıçapı pozitif çıkacaktır. Bu kapsamda süperkavite su altı aracının kavitatör sapma açısı ve amudi dümen sapma açısı limitleri referans alınmıştır. Kavitatör sapma açısı 0.2618 rad , amudi dümen sapma açısı ise -0.10472 rad olacak şekilde seçilmiştir. Süperkavite su altı aracının sapma manevrası boyunca doğrusal hızının 160 knot olduğu ve bu esnada araç üzerindeki kayma açısının ihmal edilebilir seviyede kaldığı varsayılmıştır. Bu bilgiler kullanılarak denklem 8.6 ve denklem 8.7 yeniden düzenlenirse denklem 8.20'ye ve denklem 8.21'ee ulaşılabilir.

$$69630.4v + 103.38r = -398.3181 \quad (8.20)$$

$$-80970v - 5303.59r = -3475.03 \quad (8.21)$$

Denklem 10.16 ve denklem 10.17 çözüldüğünde r değeri 0.759778 rad/s olarak, v değeri ise -0.0068485 m/s olarak belirlenmiştir. Değerler incelendiğinde sistemin

üzerindeki kayma hızının ihmal edilebilir seviyelerde kaldığı görülmektedir. Ayrıca sapma açısal hızından ve sistemin sahip olduğu doğrusal hızdan faydalanılarak sistemin dönüş yarıçapı da denklem 8.22'deki olacaktır.

$$\text{Dönüş Yarıçapı } (R) = \frac{\text{Seyir Hızı } (U)}{\text{Sapma Açısal Hızı } (r)} = \frac{82.304 \text{ m/s}}{0.759778 \text{ rad/s}} = 108.32 \text{ m} \quad (8.22)$$

Tez kapsamında bu bölümde bir takım varsayımlardan ve sama düzlemindeki lineerleştirilmiş hidrodinamik denklem setinden yararlanılarak kavitatör sapma açısının ve amudi dümen sapma açısının etkin olduğu durum için süperkavite su altı aracının minimum dönüş manevrası yarıçapı hesaplanmıştır. Elde edilen değer incelendiğinde, 108.32 metre değerinin iki adet aktif kontrolcü kullanılarak elde edilmesine rağmen yüksek mertebelerde kaldığı bu durumun süperkavite su altı aracının yüksek hızlarda düşük manevra kabiliyetiyle seyir yapmasından kaynaklı olduğu bilinmektedir.

8.4. Kontrol Etkinliğinin İncelenmesi

Süperkavite su altı araçlarının manevra kabiliyetlerinin belirlenmesi ve sistemin hidrodinamik performansının incelenmesi amacıyla kontrol etkinliği incelenmiştir. Süperkavite su altı araçlarının geleneksel su altı araçlarından farklı olarak kavitatör geometrisine sahip olması ve bu kavitatör geometrisinin yunuslama ve sapma düzleminde sapabilme kabiliyetine sahip olmasından ötürü kontrol etkinliği incelenirken amudi ve ufki dümenlere ek olarak kavitatör geometrisinin kontrol kabiliyeti de incelenmiştir. Kontrol etkinliğinin incelenmesi kapsamında süperkavite su altı aracının yalnızca yunuslama düzlemindeki hareketi incelenmiştir. Sapma düzlemindeki hareketin incelenmemesinin nedeni süperkavite su altı aracının eksenel simetrik bir geometriye sahip olması ve sistemin kontrol yüzeyi kabiliyetlerinin eksenlere göre değişmemesi kaynaklıdır. Bu kapsamda ilk olarak süperkavite su altı aracının kavitatör geometrisinin $[0, 20^\circ]$ kavitatör yunuslama açısı aralığında hücum açısı taraması yapılmıştır. Sonrasında ise ufki dümenlerin $[-6^\circ, 6^\circ]$ sapma açısı aralığında hücum açısı taraması yapılmıştır. Farklı hücum açılarında yapılan kontrol yüzeyi taramaları sonucunda aracın düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti

değerleri incelenmiştir. Düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti için $\delta_{cp}(\alpha)$, ve $\delta_e(\alpha)$ kontrol etkinlikleri incelenmiştir.

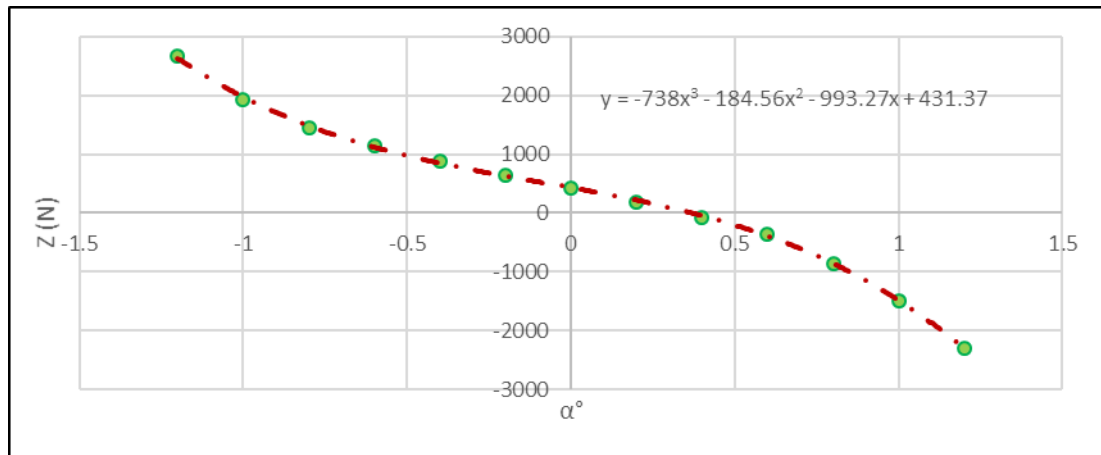
8.4.1. $\alpha - \delta_{cp}$ kontrol etkinliği

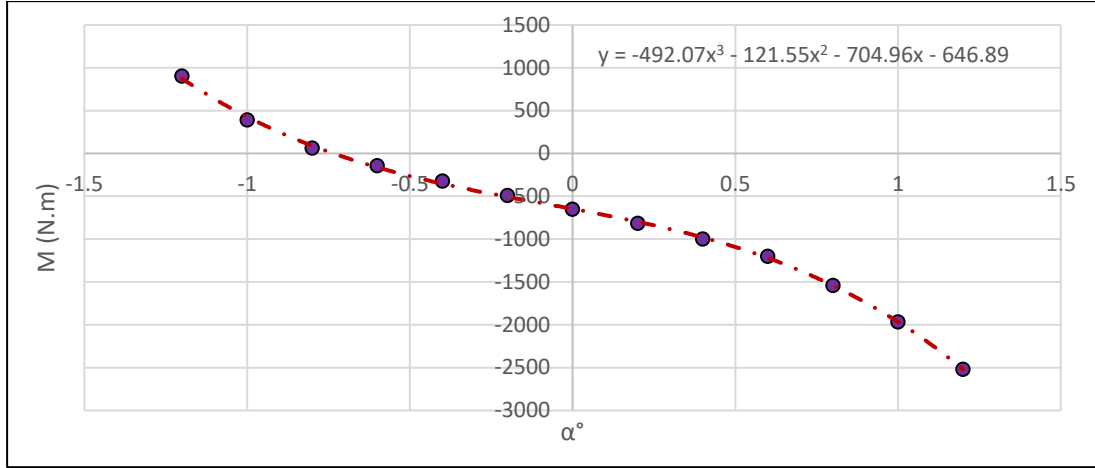
Kavitatör geometrisinin yunuslama düzlemindeki kontrol etkinliğinin incelenebilmesi için aracın farklı kavitatör yunuslama açılarında hücum açısı taraması gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda 15 farklı hücum açısında ve 5 farklı kavitatör yunuslama açısında toplamda 75 adet HAD analizi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 8.1’de yunuslama düzlemindeki kavitatör kontrol etkinliğinin incelenmesi amacıyla oluşturulan analiz matrisi verilmiştir.

Çizelge 8.1 : Kavitatör kontrol etkinliğinin belirlenmesi kapsamında incelenen HAD analiz noktaları.

Seyir Hızı (U_∞)	[160 knot]
Hücum Açısı (α)	[-1.4°, -1.2°, -1°, -0.8°, -0.6°, -0.4°, -0.2°, 0°, 0.2°, 0.4°, 0.6°, 0.8°, 1.0°, 1.2°, 1.4°]
Kavitatör Yunuslama Açısı (δ_{cp})	[0°, 5°, 10°, 15°, 20°]

Çizelge 8.1’de verilen 75 tane analiz noktasında süperkavite su altı aracının düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti incelenmiştir. Bu kapsamda farklı kavitatör yunuslama açılarında hücum açısı taramaları gerçekleştirilmiş, her kavitatör yunuslama açısı için düşey öteleme kuvvetini ve yunuslama momentini “0” yapan hücum açıları incelenmiştir. Şekil 8.4’te 5° kavitatör yunuslama açısında gerçekleştirilen hücum açısı taraması sonucunda elde edilen düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti değerleri verilmiştir.

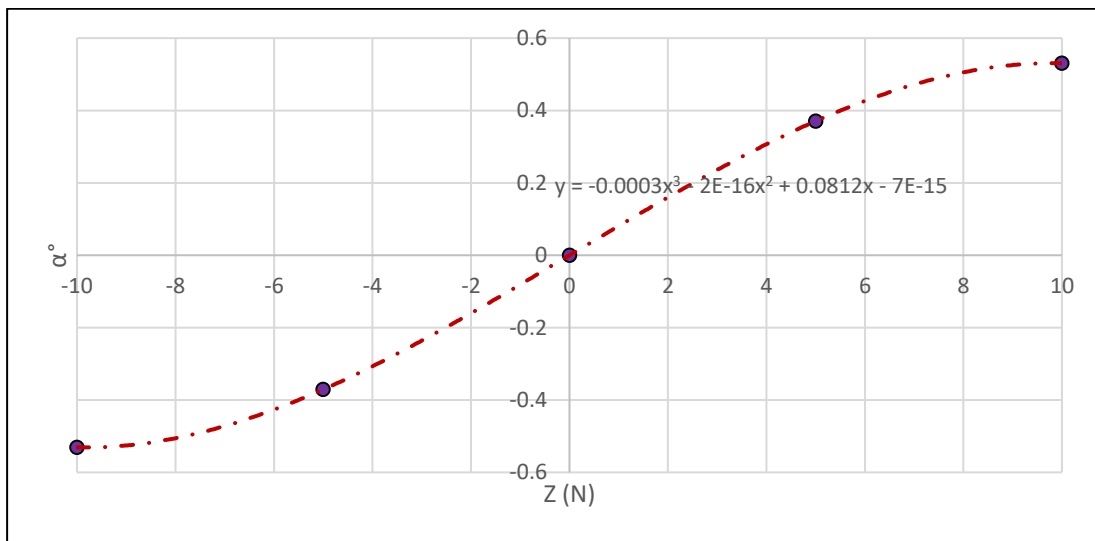




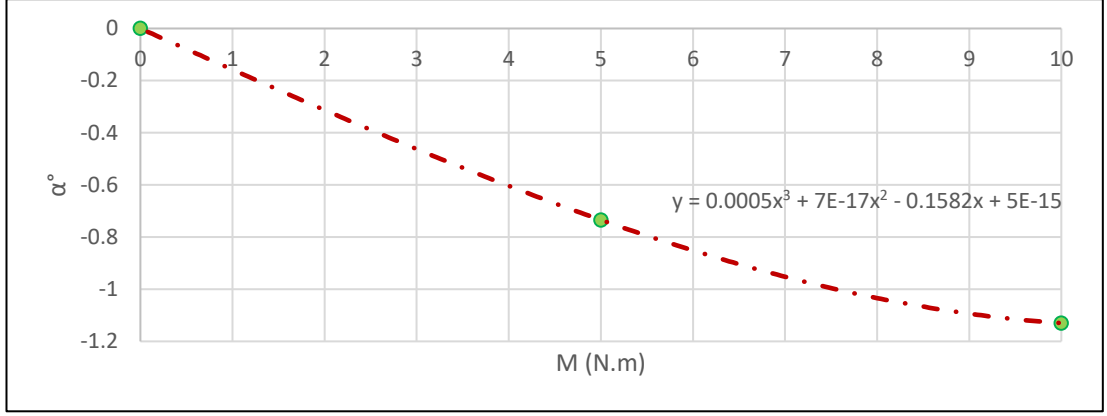
Şekil 8.4: HAD analizleri yapılarak 5° kavitatör yunuslama açısında gerçekleştirilen hücum açısı taraması sonuçları.

Şekil 8.4'te oluşturulan üçüncü dereceden denklemler incelendiğinde süperkavite su altı aracının 5° kavitatör yunuslama açısında oluşturduğu düşey öteleme kuvvetini dengelemek için 0.3708453° hücum açısına, yunuslama momenti dengelemek için de -0.7342664° derece hücum açısına sahip olması gerektiği gözlemlenmiştir.

Şekil 8.4'te olduğu gibi 10°, 15° ve 20° kavitatör yunuslama açısı için de hücum açısı taraması gerçekleştirilmiş ve süperkavite su altı aracının hücum açısına bağlı olarak yunuslama düzlemindeki denge koşulları incelenmiştir. Gerçekleştirilen HAD analizleri ve belirlenen denge koşullarından yararlanılarak süperkavite su altı aracının kavitatör geometrisinin kontrol etkinliği belirlenmiştir. Bu kapsamda Şekil 8.5'te aracın düşey öteleme kuvveti için kontrol etkinliği, Şekil 8.6'da ise aracın yunuslama momenti için kontrol etkinliği gösterilmiştir.



Şekil 8.5: Düşey öteleme kuvveti için $\delta_{cp}(\alpha)$ kontrol etkinliği.



Şekil 8.6: Yunuslama momenti için $\delta_{cp}(\alpha)$ kontrol etkinliği.

Şekil 8.5 ve Şekil 8.6 incelendiğinde süperkavite su altı aracının belirlenen limitler çerçevesinde üzerindeki hücum açısını kavitatör sapma açısıyla dengeleyebildiği görülmektedir. Süperkavite su altı aracının kavitatör kontrol etkinliği aracın seyir performansının incelenmesinde bir girdi parametresi olarak kullanılacaktır. Süperkavite su altı araçlarının yüksek hızlarda seyir yapmalarından ve bu hızlarda etrafındaki kavitasyon zarfının içerisinde hareket etmeleri gerekliliğinden ötürü manevra kabiliyetleri sınırlanmaktadır. Süperkavite su altı aracının kavitatör geometrisinin yunuslama ve sapma düzleminde hareket edebilme kabiliyetine sahip olmasıyla aracın hem manevra kabiliyetini hem de kontrol etkinliğini arttırmaktadır. Bu durum süperkavite su altı aracının kavitasyon zarfı içerisinde seyir edebilme kabiliyetini arttırmaktadır.

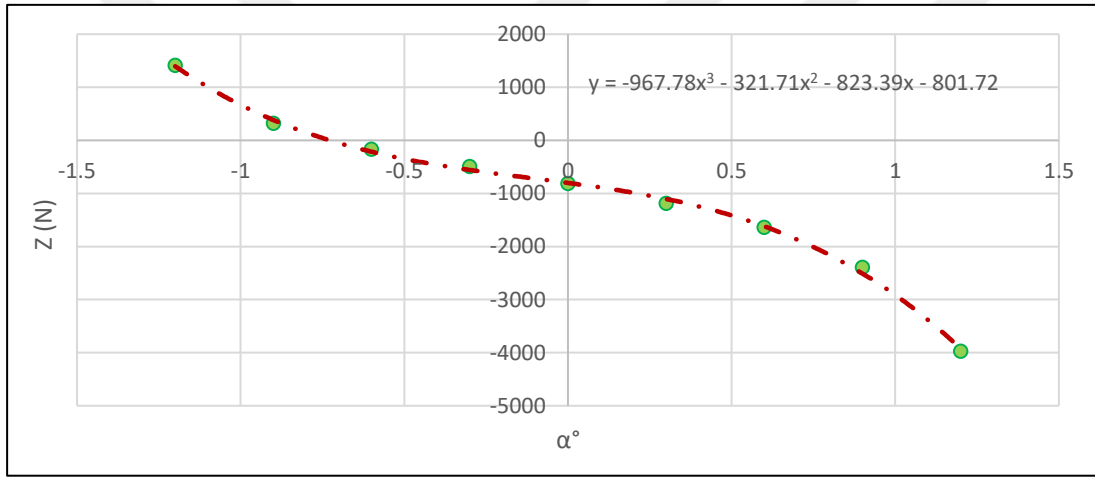
8.4.2. $\alpha - \delta_e$ kontrol etkinliği

Ufki dümen sapmasının yunuslama düzlemindeki kontrol etkinliğinin incelenmesi amacıyla süperkavite su altı aracının farklı ufki dümen sapma açılarında hücum açısı taraması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 9 farklı hücum açısında ve 5 farklı kavitatör yunuslama açısında toplamda 45 adet HAD analizi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 8.2’de yunuslama düzlemindeki ufki dümen kontrol etkinliğinin incelenmesi amacıyla oluşturulan analiz matrisi verilmiştir.

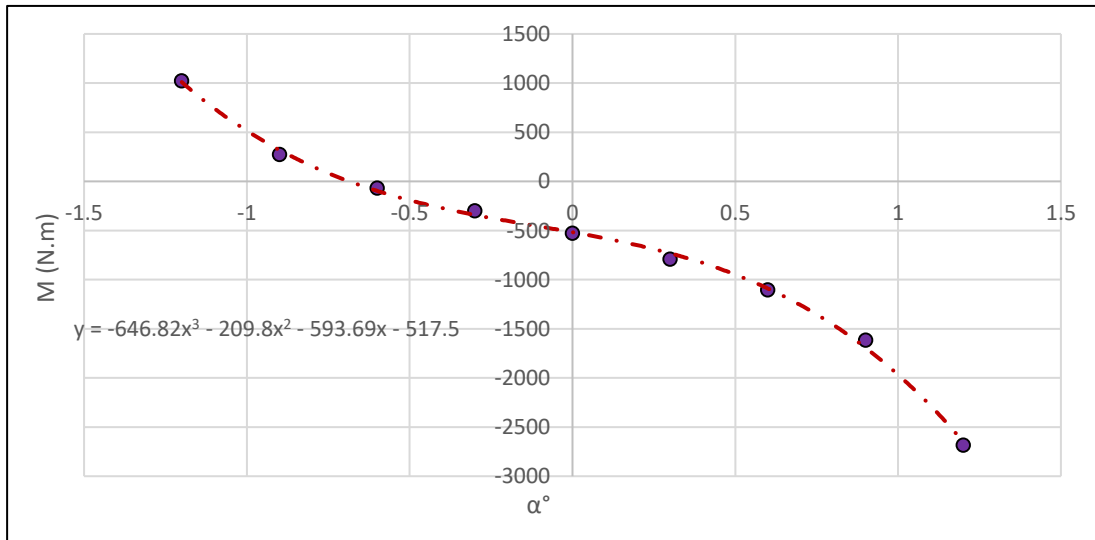
Çizelge 8.2 : Ufki dümen kontrol etkinliğinin belirlenmesi kapsamında incelenen HAD analiz noktaları.

Seyir Hızı (U_∞)	[160 knot]
Hücum Açısı (α)	[-1.2°, -0.9°, -0.6°, -0.3°, 0°, 0.3°, 0.6°, 0.9°, 1.2°]
Kavitatör Yunuslama Açısı (δ_{cp})	[0°, 5°, 10°, 15°, 20°]

Çizelge 8.2’de verilen 45 tane analiz noktasında süperkavite su altı aracının düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti incelenmiştir. Bu kapsamda farklı ufki dümen sapma açılarında hücum açısı taramaları gerçekleştirilmiş, her kavitatör yunuslama açısı için düşey öteleme kuvvetini ve yunuslama momentini “0” yapan hücum açıları incelenmiştir. Şekil 8.7’de ve Şekil 8.8’de 2° kavitatör yunuslama açısında gerçekleştirilen hücum açısı taraması sonucunda sırasıyla elde edilen düşey öteleme kuvveti ve yunuslama momenti değerleri verilmiştir. Şekillerde oluşturulan üçüncü dereceden denklemler incelendiğinde süperkavite su altı aracının 2° ufki dümen sapmasında oluşturduğu düşey öteleme kuvvetini dengelemek için -0.7276811° hücum açısına ve yunuslama momenti dengelemek için de -0.686121° derece hücum açısına sahip olması gerektiği gözlemlenmiştir.

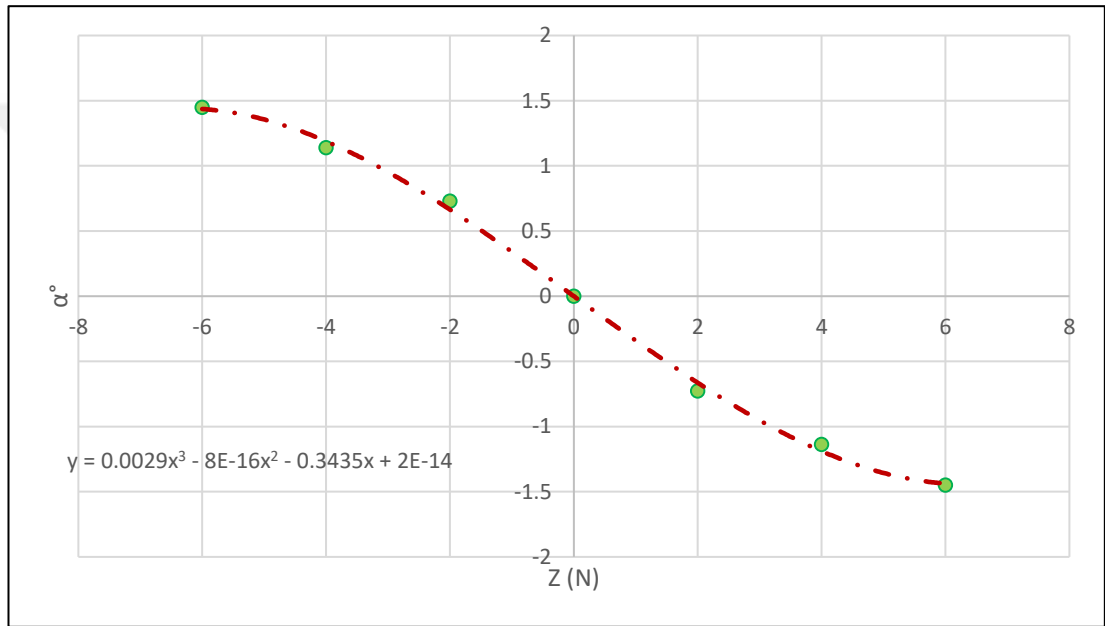


Şekil 8.7: HAD analizleri yapılarak 2° ufki dümen sapma açısında gerçekleştirilen hücum açısı taraması sonuçları – Düşey Öteleme Kuvveti.

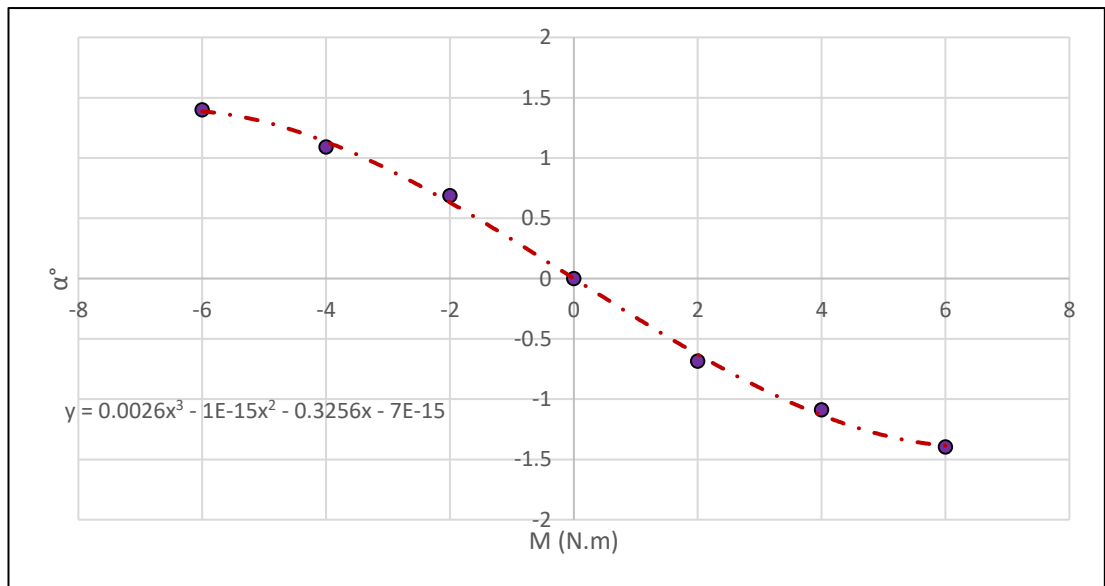


Şekil 8.8: HAD analizleri yapılarak 2° ufki dümen sapma açısında gerçekleştirilen hücum açısı taraması sonuçları – Yunuslama Momenti.

Şekil 8.7 ve Şekil 8.8’de olduğu gibi 10° , 15° ve 20° ufki dümen sapması için de hücum açısı taraması gerçekleştirilmiş ve süperkavite su altı aracının hücum açısına bağlı olarak yunuslama düzlemindeki denge koşulları incelenmiştir. Gerçekleştirilen HAD analizleri ve belirlenen denge koşullarından yararlanılarak süperkavite su altı aracının ufki dümen kontrol etkinliği belirlenmiştir. Bu kapsamda Şekil 8.9’da aracın düşey öteleme kuvveti için kontrol etkinliği, Şekil 8.10’da ise aracın yunuslama momenti için kontrol etkinliği gösterilmiştir. Süperkavite su altı aracının eksenel simetrik olmasından ve ters akış etkilerine maruz kalmamasından ötürü ufki dümen kontrol etkinliği amudi dümenlerin kontrol etkinliğinin belirlenmesinde kullanılabilir.



Şekil 8.9: Düşey öteleme kuvveti için $\delta e(\alpha)$ kontrol etkinliği.



Şekil 8.10: Yunuslama momenti için $\delta e(\alpha)$ kontrol etkinliği.

Şekil 8.9 ve Şekil 8.10 incelendiğinde yunuslama düzleminde seyir eden süperkavite su altı aracının belirlenen limitler çerçevesinde üzerindeki hücum açısını ufki dümen sapma açısıyla dengeleyebildiği görülmektedir. Süperkavite su altı aracının dümenlerinin kontrol etkinliği aracın seyir performansının incelenmesinde bir girdi parametresi olarak kullanılacaktır.

Süperkavite su altı araçlarının kavitatör ve dümenler olmak üzere iki adet kontrolcüye sahip olması aracın bu kontrolcülerini kullanarak hücum açısından bağımsız bir şekilde denge koşullarını sağlayabilmesine olanak sağlamaktadır. Geleneksel su altı araçlarının kontrolcü olarak yalnızca dümenlere sahip olmasından ötürü sistemi denge koşuluna getirecek yalnızca bir adet sapma açısı-hücum açısı ikilisi bulunmaktadır. Ancak süperkavite su altı araçlarında kavitatör olmak üzere ekstra bir kontrolcünün yer alması sistemin serbestliğini arttırmakta ve süperkavite su altı aracının kabiliyetleri çerçevesinde kavitatör yunuslama açısı, ufki dümen sapma açısı veya hücum açısı üçlüsünden birinin istenen değerlerde tutulabilmesine olanak sağlamaktadır.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Su altı araçlarına yönelik bilgi birikiminin artması ve su altında araçların yüksek hızlarda operasyon yapılabilmesi ihtiyacı süperkavite su altı araçlarını ortaya çıkarmıştır. Süperkavite su altı araçları sahip oldukları özelleşmiş alt sistemleri sayesinde 160 knot gibi yüksek hızlara çıkabilmektedirler. Su altında yüksek hızlarla operasyon yapabilmeleriyle öne çıkan süperkavite su altı araçları hedeflerini 2 dakika gibi kısa bir sürede imha edebilme kabiliyetine sahiptirler. Süperkavite su altı araçları bu kabiliyetini gövde bölümünde bulunan roket motorlu itki sistemleri ve burun bölümünde bulunan kavitasyon başlıkları sayesinde elde ederler. En genelinde bu iki özelleşmiş sistem sayesinde süperkavite su altı araçları geleneksel su altı araçlarından farklılaşmaktadırlar.

Süperkavite su altı araçlarının sahip olduğu alt sistemler bu araçların seyir dinamiğini geleneksel su altı araçlarına göre farklı etkilemektedir. Bu sebepten ötürü süperkavite bir su altı aracının kavramsal tasarımı yapılırken geleneksel metotların dışına çıkmıştır. Bu kapsamda ilk olarak süperkavite su altı aracının yüksek hızlarda seyir yapabilmesi için burun bölümünde kavitatör adı verilen özelleşmiş bir alt sisteme ihtiyaç ortaya çıkmıştır. Kavitatör geometrisinin amacı süperkavite su altı aracının kavitasyon üretmesine yardımcı olmak ve bu sayede sistem üzerinde oluşacak direnci minimuma indirmektedir. Süperkavite su altı aracının kavitatör geometrisinin sağlaması gereken kavitasyon tipi bilinen kavitasyon tiplerinden farklılık göstermektedir. Normal koşullarda ani basınç düşüşü kaynaklı oluşan bu kavitasyon baloncukları kararlı bir yapıya sahip olmamasından ötürü sisteme vermektedir. Ancak, süperkavite su altı araçlarının kavitatör geometrileri tarafından üretilen kavitasyon, düzenli ve sürekli haldeki kavitasyon baloncuklarından oluşmaktadır. Kararlı bir yapıya sahip olan bu kavitasyon tipi de süperkavitasyon olarak adlandırılmıştır. Süperkavitasyon olgusunun etkisi ile oluşan kavitasyon baloncukları süperkavite su altı aracının etrafını sarabilecek bir kabiliyete sahip olmaktadır. Süperkavite su altı aracının etrafını saran kavitasyon baloncukları da kavitasyon zarfı olarak adlandırılmaktadır. Süperkavitasyon olgusunun etkisinde kavitasyon baloncuklarından oluşan bu kavitasyon zarfı süperkavite su altı aracının etrafını

sarabilecek bir potansiyele sahip olmakla birlikte gerekli kavitasyon sayısı koşullarının sağlanması durumunda da düzenli ve sürekli bir yapıya sahip olmaktadır.

Kavitasyon zarfı geometrisi süperkavite su altı aracının yüksek seyir hızlarında operasyon yapabilmeleri için sahip olması gereken birincil kısıttır. Süperkavite su altı aracının hidrodinamik form tasarımı sürecinde aracın istenen kavitasyon zarfını oluşturabilecek kabiliyete sahip olması ve aynı zamanda bu kavitasyon zarfı içerisinde seyrini kontrollü bir şekilde sürdürebilmesi beklenmektedir. Kavitasyon zarfı üretebilme ve kavitasyon zarfı içerisinde seyir yapabilme gereksinimleri süperkavite su altı araçlarını geleneksel su altı araçlarından ayıran önemli farklılıklardandır. Bu farklılıklardan bir diğeri ise süperkavite su altı araçlarının kavitasyon başlığı alt sistemine sahip olması ve kavitasyon başlığı alt sistemi sayesinde doğal yollarla elde edilen kavitasyon zarfının genişletilmesine ve istenen kavitasyon zarfı formunun elde edilmesine olanak sağlanmasıdır. Normal koşullarda süperkavite su altı aracının etrafını sarması gereken kavitasyon zarfının doğal koşullarla elde edilmesi oldukça zordur. Bunun nedeni de roket motorlu itki sistemlerinde birim zamanda üretilen itki miktarının gereksinimleri karşılayamamasıdır. İstenilen itki seviyelerine doğal yollar ile ulaşılabilmesi kavitasyon başlığına olan ihtiyacı doğurmaktadır. Kavitasyon başlığı alt sistemi kavitasyon sayısının doğal koşullarla istenen seviyelere düşürülebilmesi durumunda kavitasyon zarfı içerisinde gaz basılarak kavitasyon zarfı iç basıncının artırılmasından ve dolayısıyla dış ortam ile kavitasyon zarfı iç basıncı arasındaki basınç farkının azaltılarak kavitasyon sayısının yapay bir yol ile daha düşük mertebelere çekilmesinde görevlidir. Bu sayede belirlenen süperkavite su altı aracının yüksek hız gereksiniminin elde edilebileceği kavitasyon sayısına ulaşılabilir ve bu süreçte kavitasyon zarfı süperkavite su altı aracının etrafını sarabilecektir.

Süperkavite su altı araçlarının geleneksel su altı araçlarına göre farklı dinamiklere ve farklı gereksinimlere sahip olmasının bir diğer nedeni de bu araçların roket motorlu itki sistemlerine sahip olmalarıdır. Süperkavite su altı araçları roket motorlu itki sistemleri, kavitatör geometrileri ve kavitasyon başlıkları sayesinde yüksek hızlarda seyir edebilirler. Bu süreçte süperkavite su altı araçları sahip oldukları kavitatör geometrilerini ve kavitasyon başlıklarını kullanarak kavitasyon zarfını oluşturabilecek ve aynı zamanda bu kavitasyon zarfının sürekliliğini ve kararlılığını koruyabilecek bir kabiliyete sahip olurlar. Ancak, kavitatör ve kavitasyon başlığının görevlerini yerine getirebilmeleri için süperkavite su altı aracı bir itki kuvvetine ihtiyaç duymaktadır. İhtiyaç duyulan bu itki kuvveti seviyesi elektrik motorları kullanılarak

sağlanamamaktadır. Bu durum roket motorlarına olan ihtiyacı doğurmuştur. Süperkavite su altı araçları da sahip oldukları roket motorları ile ihtiyaç duyulan itki kuvvetini üretebilmektedir. Özelleşmiş alt sistemleri ile ürettikleri kavitasyon zarfı sayesinde su altı aracının etrafında bir gaz balonu oluşur. Gaz balonunun etkisi ile süperkavite su altı aracı maruz kaldığı su fazından ayrılarak gaz fazı içerisinde seyrine devam eder. Bu sayede süperkavite su altı aracı üzerinde oluşan ıslak alan etkisi minimize edilir. Islak alan etkilerinin minimize edilmesi ile birlikte aracın maruz kalacağı direnç kuvveti azalır, aracın yüksek hızlarda seyir yapabilme kabiliyeti artar. Süperkavite su altı aracının etrafı kavitasyon zarfı ile sarılırken aracın kontrol yüzeylerinin (amudi ve ufki dümenler) kavitasyon baloncuklarının etkilerine minimum düzeyde maruz kalmaları gerekmektedir. Bu durumun nedeni sistemin kavitasyon zarfı etkilerine maruz kalması durumunda herhangi bir kontrol etkinliğine sahip olamamasıdır. Diğer taraftan süperkavite su altı aracının stabilite, kontrol ve manevra kabiliyetlerinin artırılması kapsamında araç bir kontrol etkinliğine ihtiyaç duymaktadır. Bu kapsamda kontrol etkinliğinin maksimize edilmesi maksadıyla kontrol yüzeyleri üzerinde kavitasyon oluşumuna müsaade edilmeyen bir hidrodinamik tasarım yapılmalıdır. Bu amaçla süperkavite su altı aracı tasarlanırken bir ok açısı ve dümen geometrileri düşük yarım açılı bir konik kavitatör geometrisi referans alınarak tasarım yapılmıştır. Bu form tasarımı sayesinde de ıslak alan etkileri artırılmış ve bu ıslak alanlar etkisinde kontrol etkinliği maksimize edilmiştir.

Süperkavite su altı araçlarının manevra kabiliyetleri incelendiğinde geleneksel su altı araçlarına göre düşük manevra kabiliyetlerine sahip oldukları görülmektedir. Süperkavite su araçları sahip oldukları düşük manevra kabiliyetlerini kullanarak kavitasyon zarfı içerisinde dengeli bir şekilde hareket ederler. Aynı zamanda dümenlerin ve kavitatörün etkisiyle düşük seviyelerde bir yönelim sağlayabilirler. Süperkavite su altı aracının manevra kabiliyetleri kavitasyon zarfında bozuntuya sebep olmayacak şekilde incelenebilir. Bu durumun nedeni süperkavite su altı aracının seyrine devam edebilmesi için kavitasyon zarfının sürekliliğine ve kararlılığına ihtiyaç duymasıdır. Süperkavite su altı aracının performans limitleri belirlenirken de süperkavite su altı aracının etrafındaki kavitasyon zarfının bozulmaması referans alınabilir. Tez kapsamında süperkavite su altı aracının hücum açısı limitleri, kavitatör sapma ve yunuslama açısı limitleri ile amudi ve ufki dümen sapma açısı limitleri bu kapsamda belirlenmiş ve belirlenen limitler arasında bir tasarım uzayı oluşturulmuştur. Süperkavite su altı aracının açısı limitleri sistemin hidrodinamik denklem setinin

oluşturulması sürecinde bir girdi parametresi olarak değerlendirilmiş, bu girdilerden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek süperkavite su altı aracının performans hesaplamaları yapılmıştır.

Süperkavite su altı araçlarının hidrodinamik form tasarımının mekanik kısıtlar ve performans gereksinimlerinden yararlanılarak tamamlanmasının ardından, süperkavite su altı aracı için 5 serbestlik derecesinde hidrodinamik denklem seti oluşturulmuştur. 5 serbestlik derecesinde hidrodinamik denklem setinin oluşturulmasının nedeni süperkavite su altı aracının üzerinde normal koşullarda herhangi bir yuvarlanma etkisinin oluşmamasıdır. Ancak, sistemin herhangi bir bozuntu faktörüne maruz kalması durumunda yuvarlanma momenti oluşacağı için yuvarlanma momenti ifadesi de ilerleyen çalışmalarda incelenebilir. Ancak yuvarlanma momenti ifade bu tez kapsamı dışındadır. Denklem seti oluşturulurken süperkavite su altı araçlarına yönelik literatür verilerinin kısır kalmasından ötürü geleneksel su altı araçları için 6 serbestlik derecesinde oluşturulan hidrodinamik denklem setinden yararlanılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak geleneksel su altı hareket denklemleri incelenmiş, hidrodinamik ve hidrostatik katsayılar kullanılarak hareket denklemleri ifade edilmiştir. Sonrasında ise süperkavite su altı aracı için bir takım değerlendirmeler yapılarak denklem seti revize edilmiştir. Bu değerlendirmeler genel olarak süperkavite su altı aracının asimetrik bir geometriye sahip olmaması, pervaneli bir itki sistemine sahip olmaması, üzerinde herhangi bir akupple etkinin ve ters akışın etkin olmamasıdır.

Süperkavite su altı aracının hidrodinamik katsayıların belirlenmesi kapsamında gerçekleştirilen HAD analizleri incelendiğinde süperkavite su altı araçlarında geleneksel çözümden farklı olarak üçüncü dereceden terimlere ihtiyaç duyulabileceği gözlemlenmiştir. Bu kapsamda üçüncü dereceden katsayılar sisteme eklendiğinde süperkavite su altı aracının hareket denklemlerinin yüksek sadakatle temsil edilebildiği görülmüştür. Yapılan HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak sistem tanılaması yapılmış, bu kapsamda süperkavite su altı aracının hidrodinamik denklemler seti oluşturulmuştur. Bir su altı aracının hidrodinamik denklem setinin oluşturulabilmesi için su altı aracının hidrodinamik formuna ihtiyaç duyulmaktadır. Hidrodinamik form kullanılarak belirlenen mekanik kısıtlamaları da dikkate alarak HAD analizleri gerçekleştirilir. Gerçekleştirilen HAD analizlerinden elde edilen kuvvet ve moment çıktıları kullanılarak süperkavite su altı aracı için hidrodinamik denklem seti oluşturulur. Hidrodinamik denklem setinin oluşturulmasının amacı aracın performans hesaplamalarının ve sonrasında aracı istenilen rotada tutacak bir kontrolcü

tasarımının yapılabilmesidir. Bu kapsamda hidrodinamik denklem seti oluşturulan süperkavite su altı aracı için tez kapsamında bir takım performans hesaplamaları yapılmıştır. Süperkavite su altı aracının performans limitlerinin belirlenmesi amacıyla aracın statik ve dinamik kararlılığı ile kavitatör ve dümenlerin kontrol etkinlikleri incelenebilmiştir.

Süperkavite su altı araçlarını geleneksel su altı araçlarından ayıran durumlardan biri de bu araçların statik olarak kararlı olmalarıdır. Statik kararlı olmasından kaynaklı süperkavite su altı araçlarının manevra kabiliyetleri düşük çıkmaktadır. Ancak, yapılan HAD analizleri incelendiğinde süperkavite su altı araçlarının statik kararlı olmalarından ötürü aracın herhangi bir bozuntu momentine maruz kalması durumunda kavitasyon zarfı içerisinde kalma eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Geleneksel su altı araçlarının kuyruk bölümünün daralan bir geometriye sahip olmasından ötürü aracın basınç merkezinin ağırlık merkezinin önünde çıkmakta ve araç statik kararsız olmaktadır. Diğer taraftan süperkavite su altı araçlarının burun bölümünün daralan bir geometriye sahip olmasından ötürü bu araçlar da statik olarak kararlı olmaktadır. Yapılan performans hesaplamaları sonucunda statik olarak kararlılıklarından bağımsız olarak geleneksel su altı araçları da süperkavite su altı araçları da dinamik olarak kararlı bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Süperkavite su altı araçları sahip oldukları dümenlere ek olarak kavitatör geometrisinden kaynaklı ekstra bir kontrol yüzeyine sahiptir. Ekstra bir kontrol yüzeyine sahip olması süperkavite su altı aracının kendi içerisinde manevra kabiliyetlerini iyileştirirken aynı zamanda süperkavite su altı aracı için birden çok denge koşulunun oluşturulabilmesi potansiyelini ortaya çıkarmıştır.

Bu tez kapsamında hidrodinamik form tasarımı bilinen bir süperkavite su altı aracının hidrodinamik veri tabanı HAD metotlarından yararlanılarak çıkarılmıştır. HAD analizleri yapılırken elde edilen sonuçların kabul edilebilir olduğunu ispatlamak için süperkavitasyon rejimine özgü bir HAD analiz modeli doğrulama modeli oluşturulmuştur. Elde edilen HAD sonuçlarından yararlanılarak süperkavite su altı aracının hidrodinamik katsayıları çıkarılmış ve 5 serbestlik derecesinde hidrodinamik denklem seti ortaya çıkartılmıştır. Son olarak da hidrodinamik denklem seti bilinen süperkavite su altı aracı için kararlılık ve performans hesaplamaları yapılmış, sistemin kontrol etkinliği incelenmiştir.

Bu tez kapsamı dışında kalan ancak ileriki çalışmalarda süperkavitasyon olgusunun incelenmesi ve akış karakteristiğinin çözümlenmesi ile bir süperkavite su altı aracının oluşturulması amacıyla ele alınabilecek bir takım konulara aşağıda değinilmiştir.

- Farklı kavitatör tasarımlarının yapılarak kavitatör tasarımının akış karakteristiği üzerine etkilerinin incelenmesi.
- Süperkavite su altı araçlarının manevra kabiliyetlerini maksimize ederken aynı zamanda kavitasyon zarfı içerisinde denge koşullarında seyir edebileceği bir kontrol yüzeyi tasarımının yapılması.
- Yapay kavitasyon karakteristiğinin ve kavitasyon zarfı içerisine basılan gazların kütleli debi katsayısına bağlı olarak kavitasyon zarfı geometrisindeki değişimlerin incelenmesi.
- Süperkavite su altı araçları üzerindeki yuvarlanma momenti ifadesinin incelenmesi ve 6 serbestlik derecesinde hidrodinamik denklem setinin oluşturulması.
- 6 serbestlik derecesinde modellenen süperkavite su altı aracının MATLAB Simulink yazılımı kullanılarak bilgisayar ortamında modellenmesi ve simülasyonunun yapılarak sistem performansının incelenmesi.

KAYNAKLAR

- [1] **Reichardt, H.** (1946). The Laws of Cavitation Bubbles at Axially Symmetrical Bodies in a Flow, Reports and Translations 766, ONR.
- [2] **Efros, D.** (1946). Hydrodynamic Theory of Two-Dimensional Flow With Cavitation, Dokl Akad Nauk SSSR.
- [3] **Rouse, H. ve McNown, S. J.** (1948). Cavitation and Pressure Distribution Head Form at Zero Angle of Yaw, The State University of Iowa, Iowa City.
- [4] **Tulin, M. P.** (1953). Steady Two-Dimensional Cavity Flows About Slender Bodies, CalTech. Hydrodyn. Lab. Rep. E-73.4.
- [5] **Self, M. W. ve Ripken, J. F.** (1946). Steady-State Cavity Studies in a Free Jet Water Tunnel, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota.
- [6] **Waid, R. L.** (1957). Cavity Shapes For Circular Disks at Angle of Attack, Hydrodynamic Laboratory-California Institute of Technology, California.
- [7] **Tulin, M. P.** (1964). Small Perturbation Theory, J Ship Res.
- [8] **Cuthbert, J. ve Street, R.** (1964). An Approximate Theory for Supercavitating Flow About Slender Bodies of Revolution, Sunnyvale (CA): Lockheed Missiles and Space Company.
- [9] **Klose, J. ve Acosta, A. J.** (1965). Some New Measurements on the Drag of Cavitating Disks, J. Ship Res. 9.
- [10] **Brennan, C.** (1969). A Numerical Solution of Axisymmetric Cavity Flows, J. Fluid Mech.
- [11] **Chou, Y. S.** (1974). Axisymmetric Cavity Flows Past Slender bodies of Revolution, J Hydronautics.
- [12] **Aitchison, J. M.** (1984). The Numerical Solution of Planar and Axisymmetric Cavitation Flow Problems, Comput & Fluids.
- [13] **Uhlman, J. S.** (1989). The Surface Singularity or Boundary Integral Method Applied to Supercavitating Hydrofoils, J Ship Res.
- [14] **Vorus, W. S.** (1991). A Theoretical Study of the Use of Sepercavitation/Ventilation for Underwater Body Drag Reduction, Vorus & Associates, Inc., Gregory, MI.
- [15] **Kuria, I. M., Kirschner, I. N., Varghese, A. N. ve Uhlman, J. S.** (1997). Compressible Cavity Flows Past Slender Non-Lifting Bodies of Revolution, Proceedings of the ASME & JSME Fluids Engineering Annual Conference & Exhibition , Cavitation and Multiphase Flow Forum, Vancouver, BC.
- [16] **Varghese, A. N., Uhlman, J. S. ve Kirschen, I. N.** (1997). Axisymmetric Slender-Body Analysis of Supercavitating High-Speed Bodies in Subsonic Flow,

- [17] **Kirschen, I. N., Uhlman, J. S., Varghese, A. N. ve Kuria, I. M.** (1995). Supercavitating Projectiles in Axisymmetric Subsonic Liquid Flows, Proceedings of ASME & JSME Fluids Engineering Annual Conference & Exhibition, Cavitation and Multiphase Flow Forum, Hilton Head Island, SC.
- [18] **Uhlman, J. S., Varghese, A. N. ve Kirschner, I. N.** (1998). Boundary Element Modelling of Axisymmetric Supercavitating Bodies, Proceeding of the 1st Symposium on Marine Applications of Computational Fluid Dynamics, Hydrodynamics/Hydroacoustic Technology Center, McLean, VA.
- [19] **Kinnas, S. A. ve Savineau, M. S.** (1995). Computer Application of optimization techniques to the design of cavitating hydrofoils and wings, Present at the International Symposium on Cavitation Deauville, France, 2-5 May.
- [20] **Mishima, S. ve Kinnas, S. A.** (1995). A Numerical Optimization Technique Applied to the Design of Two-Dimensional Cavitating Hydrofoil Sections, J Ship Res, September.
- [21] **Mishima, S.** (1996). Design of Cavitating Propeller Blades in Non-Uniform Flow by Numerical Optimization, For the Degree of Doctor of Philosophy at the Massachusetts Institute of Technology, June.
- [22] **Hase, P. M.** (2003). Interior Source Methods for Planar and Axisymmetric Supercavitating Flows, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, May.
- [23] **Vergheese, A. N., Uhlman, J. S. ve Kirschner, I. N.** (2005). Numerical Analysis of High-Speed Bodies in Partially Cavitation Axisymmetric Flow, Transactions of ASME, J Eng.
- [24] **Alyanak, E., Venkayya, V., Grandhi R. ve Penmetsa, R.** (2004). Variable Shape Cavitator Design for a Supercavitating Torpedo, *10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, 30 August - 1 September.
- [25] **Alyanak, E., Grandhi, R. ve Penmetsa, R.** (2006). Optimum Design of a Supercavitating Torpedo Considering Overall Size, Shape, and Structural Configuration, *International Journal of Solids and Structures*, p. 642–657.
- [26] **Choi, J., Penmetsa, R. C. ve Grandhi, R. V.** (2005). Shape Optimization of The Cavitator For a Supercavitating Torpedo, *Struct Multidisc Optim* 29, p. 159–167.
- [27] **Shafaghat, R., Hosseinalipour, S. M. ve Shariatifard, A.** (2007). Numerical Analysis of a Two Dimensional Bounded Supercavitation Flow, 15th Annual Conferences of the CFD Society of Canada, Canada.
- [28] **Url-1** <<http://navalpost.com/a-gamechanger-weapon-supercavitating-torpedo/>>, erişim tarihi 01.06.21.

- [29] **Ceccio, S. L.** (2010). Friction Drag Reduction of External Flows With Bubble and Gas Injection, *Annual Review Fluid Mechanics* 9 (4).
- [30] **Url-2** <<http://nationalinterest.org/blog/reboot/russias-200-knot-torpedo-us-navy-cant-match-it-sorry-179481>>, erişim tarihi 01.06.21.
- [31] **Url-3** <[https://en.m.wikipedia.org/wiki/Hoot_\(torpedo\)](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Hoot_(torpedo))>, erişim tarihi 01.06.21.
- [32] **Url-4** <<https://amp.topwar.ru/175609-superkavitirujuschaja-torpedo-shikval-jeto-jeffektno-no-nejeffektivno.html>>, erişim tarihi 01.06.21.
- [33] **May, A.** (1975). Water Entry and The Cavity-running Behavior of Missiles, White Oak: NAVSEA Hydroballistics Advisory Committee.
- [34] **Semenenko, V. N.** (2001). Artificial Supercavitation Physics and Calculation, National Academy of Sciences - Institute of Hydromechanics, Kyiv, Ukraine.
- [35] **Oversmith, R.H.** (1959). Some Observations on Cavitating Flows, Convair. Eng. Dept. Rept.
- [36] **O'Neill, J. P.** (1954). Flow Around Bodies with Attached Open Cavities,» CIT Hyd. Rept.
- [37] **Kiceniuk, T.** (1954). An Experimental Study of the Hydrodynamic Force Acting on a Family of Cavity-Producing Conical Bodies of Revolution Inclined to the Flow, CIT Hyd. Rept.
- [38] **Cox, R. N. ve Maccoll, J. W.** (1956). Recent Contributions to Basic Hydroballistics, *Naval Symp.*
- [39] **Eisenberg, P. ve Pond, H. L.** (1948). Water Tunnel Investigation of Steady State Cavities,» DTMB Rept. 668.
- [40] **Garabedian, P. R.** (1956). Calculation of Axially Symmetric Cavities and Jets, *Pacific Journal of Mathematics*, pp. 611-684.
- [41] **Dawson, V. C. D. ve Seigel, A. E.** (1970). The Steady-State Drag Coefficients of Various Cavitating Head Forms, NOLTR.
- [42] **Hsu, E. Y. ve Perry, B.** (1954). Water Tunnel Experiments on Spheres in Cavity Flow, CIT Hyd. Rept. E-24.
- [43] **Garabedian, P. R.** (1956). Calculation of Axially Symmetric Cavities and Jets, *Pacific Journal of Mathematics*, cilt 6, pp. 611-684.
- [44] **Lagvinovich, G. V.** (1973). Hydrodynamics of Flows with Free Boundaries, Halsted Press.
- [45] **Epshtein, L. A.** (1971). Methods of Theory of Dimensionality and Similarity in Problems of Ship Hydromechanics, Sudostroenie Publishing House, Leningrad.
- [46] **Münzer, H. ve Reichardt, H.** (1950). Rotational Symmetrical Source-Sink Bodies with Predominantly Constant Pressure Distributions, A.R.E Trans. 1/50.

- [47] **Lane, W. R. ve Green, H. L.** (1956). The Mechanics of Drops and Bubbles, Cambridge University Press, London/New York.
- [48] **Birkhoff, G.** (1963). Hydrodynamics, Methods, Facts and Similarity (in Russian), Inostrannoi Literatury, Moscow: Izdatelstvo.
- [49] **Savchenko, Y. N. ve Savchenko, G. Y.** (2011). Gas Flows in Ventilated Supercavities, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [50] **Sertaç, A.** (2013). Su Altı Araçları İçin Yeni Geliştirilen Hidrodinamik Modelleme Yöntemleri Kullanılarak Otonom Bir Su Altı Aracının Hidrodinamik Karakteristiğinin İncelenmesi, İTÜ, İstanbul.
- [51] **Yechout, T. R., Morris, S. L., Bossert, D. E. ve Anderson, B.** (2002). Introduction to Aircraft Flight Mechanics, AIAA Education Series.
- [52] **Gertler, M.** (1950). Resistance Experiments on a Systematic Series of Streamlined Bodies of Revolution for Application to the Design of High Speed Submarines, David Taylor Model Basin, Navy Department, Washington.
- [53] **Gertler, M. ve Hagen, G. R.** (1967). Standard Equations of Motion for Submarine Simulation, Naval Ship Research and Development Center, U. S. Navy.
- [54] **Morse, P. M. ve Feshbach, H.** (1953). Derivatives of Analytic Functions, Taylor and Laurent Series, *Methods of Theoretical Physics, Part I*, New York, McGraw-Hill, pp. 374-398.
- [55] **Johnson, C. D.** (1982). A Coning Motion Apparatus for Hydrodynamic Model Testing In A Non-Planar Cross-Flow, Massachusetts Institute of Technology.
- [56] **Goel, A.** (2002). Control Strategies For Supercavitating Vehicles, University of Florida.
- [57] **Prestero, T.** (1994). Verification of Six Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle, Master of Science in Ocean Engineering and Master of Science in Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- [58] **Fossen, T. I.** (1994). Guidance and Control of Ocean Vehicles, England: John Wiley & Sons Ltd.
- [59] **Yuan, X. ve Xing, T.** (2016). Hydrodynamic Characteristics of a Supercavitating Vehicle's Aftbody, *Ocean Engineering*, cilt 114, pp. 37-46.
- [60] **ANSYS®** Fluent, Release 19.1, Help System, Theory Guide, Cavitation Models, ANSYS, Inc.
- [61] **Etkin, B. ve Reid, L. D.** (1994). Dynamics of Flight Stability and Control, Canada: Third Edition.
- [62] **Raymer, D. P.** (2004). Aircraft Design: A Conceptual Approach, Washington: AIAA Education Series.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad

: Sezer KEFELİ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, İTÜ, Uçak ve Uzay Mühendisliği Fakültesi, Uçak Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- **2017 Ağustos – 2018 Nisan:** TUSAŞ – Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A. Ş. (TAI) – Aerodinamik Modelleme ve Kontrol Mühendisi (Yarı Zamanlı)
- **2018 Eylül:** ROKETSAN A. Ş. – Hidrodinamik Mühendisi