

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İZE UYUMLU DENİZALTI PERVANESİ TASARIMININ
HESAPLAMALI VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinan BURUNSUZ

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Programı

ARALIK 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İZE UYUMLU DENİZALTI PERVANESİ TASARIMININ
HESAPLAMALI VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Öğrenci Sinan BURUNSUZ
(508131107)**

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İsmail Hakkı HELVACIOĞLU

ARALIK 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508131107 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Sinan BURUNSUZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “İZE UYUMLU DENİZALTI PERVANESİ TASARIMININ HESAPLAMALI VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. İsmail Hakkı HELVACIOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Abdi KÜKNER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç Dr. Serhan GÖKÇAY
Piri Reis Üniversitesi

Teslim Tarihi : 17 Kasım 2017
Savunma Tarihi : 18 Aralık 2017





Aileme,



ÖNSÖZ

Pervaneler bir çok su üstü araç için olduğu gibi denizaltılar açısından da en önemli parametrelerden biridir. Pervanelerin tüm özelliklerinin bilinmesi çok büyük bir önem arz etmektedir. Bu nedenle denizaltı pervanesi üzerine yapılan bu tez çalışmasında bana yardımlarını sunan Danışman Hocam Prof. Dr İsmail Hakkı HELVACIOĞLU'na teşekkürler ederim.

Münir Cansın ÖZDEN'in ve Yasemin ARIKAN ÖZDEN'in doktora tezinde kullandıkları denizaltı modelini ortak kullanıma açmalarından ve tezim için yapılan deneylerdeki tüm yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezde kullanılan deney düzeneklerinin tasarımı ve üretimi konusunda Sertaç KURDOĞLU, Bülent FIRAT ve Ersin DEMİR'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu süreçte maddi ve manevi olarak her an yanımda olan eşim Eda BURUNSUZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Kasım 2017

Sinan BURUNSUZ
(Gemi ve Deniz Teknojileri Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	1
SUMMARY	3
1. GİRİŞ	5
1.1 Tezin Amacı	5
1.2 Literatür Özeti	7
2. TEORİ.....	9
2.1 Deneysel Yöntemler	9
2.1.1 Pervane model deneyleri	9
2.1.2 Denizaltı deneyleri	18
2.1.2.1 Denizaltı deney sistemleri	18
2.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemleri	28
2.2.1 Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde kullanılan ana denklemler.....	28
2.2.1.1 Kütlenin korunumu denklemi	29
2.2.1.2 Momentumun korunumu denklemi.....	29
2.2.2 Türbülans modelleme.....	30
2.2.2.1 SST k- ϵ model.....	30
2.2.2.2 SST k- ω model.....	31
2.2.3. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği teknikleri.....	32
2.2.3.1. Yönetici denklemlerin ayrıklaştırılması-sonlu hacimler yöntemi.....	32
2.2.3.2.Denklemelerin sayısal çözümleri	34
3. DENİZALTI VE PERVANE GEOMETRİLERİ	39
3.1 INSEAN E1619 Denizaltı Pervanesi.....	39
3.2 DARPA Suboff Denizaltısı	41
4. YÖNTEMLER	45
4.1 Sayısal Yöntemler ve Akış Çözücü.....	45
4.2 Sevk Koşullarının Belirlenmesi	45
4.3 Dört Kadran İçin Veri Hazırlama	47
4.4 Yöntemlerin Doğrulanması	48
4.4.1 Pervanenin açık su karakteristiğinin doğrulanması	48
4.4.2. Pervane sevk noktasının deneysel olarak bulunması	50
4.4.3 Deney düzeneğinin tasarımı.....	50
4.4.4 Deneyde kullanılan ekipmanlar	51
5. HESAPLAMA PROSEDÜRLERİ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	57
5.1 Hesaplama Yöntemleri	57
5.1.1 Sabit devirde hesaplanan beta (β) değerleri	57

5.1.2 Doğrusal azalan devir ve değişken hıza göre beta(β) değerleri	59
5.1.3 Değişken hız ve devre göre beta (β) değerleri	61
5.2 Deneylerin Değerlendirilmesi	64
5.2.1 İleri yönlü deney ve HAD kıyası.....	64
5.2.2 Tornistan durumunda deney ve HAD kıyası.....	65
5.2.3 Katsayıların Hesaplanması	65
5.2.4 Dört kadran grafiğinin çizdirilmesi	67
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	69
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ	75



KISALTMALAR

AFF8	: Anechoic Flow Facility
AUV	: Autonomous Underwater Vehicle
BEM	: Direct Numerical Simulations
CFD	: Computational Fluid Dynamics
DAD	: Deneysel Akışkanlar Dinamiği
DARPA	: Defence Advanced Research Projects Agency
DES	: Detached Eddy Simulations
DHP	: Delivered Horse Power (Çıkış Beygir Gücü)
DNS	: Direct Numerical Simulations
FB	: Centre of buoyancy (Sephaye Merkezi)
FVM	: Finite Volume Method
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
INSEAN	: Studi ve Esperienze di Architettura Navale için Istituto Nazionale
ITTC	: International Towing Tank Conference
KTN	: Kendinden Tahrik Noktası
LDV	: Laser Doppler Velocimetry
LES	: Large Eddy Simulation
LOA	: Length Overall
LPP	: Length Between Perpendiculars
PD	: Propeller Diameter
PISO	: Pressure With Splitting of Operators
PMM	: Planar Motion Mechanism
PRESTO	: Pressure Staggering Option
QUICK	: Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics
RANS	: Reynolds-Averaged Navier-Stokes
RMAX	: Maximum Hull Radius Centre of Buoyancy
SIMPLE	: Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SPP	: Self Propulsion Point
SST	: Shear-Stress Transport
SWA	: Wetted Surface
SVA	: Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam
THP	: Thrust Horse Power (İtme Beygir Gücü)



SEMBOLLER

A	: Alan
C_Q	: Torque coefficient
C_T	: Thrust coefficient
C_p	: Güç yükü katsayısı
D	: Pervane çapı
D_m	: Model çapı
D_s	: Gerçek çap
F_{nm}	: Model Froude sayısı
F_{ns}	: Gerçek Froude sayısı
G_k	: Ortalama hız gradyenlerinden dolayı türbülanslı kinetik enerji üretimi
G_ω	: ω 'nin üretimi
J	: İlerleme katsayısı
k	: Türbülans kinetik enerji
K_T	: İtme katsayısı
K_Q	: Tork katsayısı
m	: Model indisi
n	: Devir (rpm)
n_m	: Model devir sayısı
n_s	: Gerçek devir sayısı
p	: Statik basınç
P'	: Düzeltme basınç alanı
p^*	: Başlangıç basınç alanı
Q	: Pervane torku
Rn	: Reynolds sayısı
R_{nm}	: Model Reynolds sayısı (Model)
R_{ns}	: Gerçek Reynolds sayısı (Gerçek)
s	: Gerçek pervane indisi
T	: İtme
u	: Flow velocity
V_A	: Pervaneye gelen suyun hızı
V_r	: Bağıl hız
β	: Adım açısı
ε	: Türbülans kinetik enerjisinin dağılma oranı
ω	: Türbülans kinetik enerjisinin spesifik enerji kayıp oranı
g	: Yer çekimi ivmesi
λ	: Benzerlik oranı
ν	: Kinematik viskozite
ν_m	: Viskozite (Model)
ν_s	: Viskozite (Gerçek)
σ	: Kavitasyon sayısı
ρ	: Sıvı yoğunluğu
p_0	: İlk basınç

η_0	: Açık su verimliliği
μ	: Viskozite
τ	: Kayma gerilmesi
∇	: Deplasman hacmi



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: INSEAN E1619 denizaltı pervanesinin ana özellikleri	40
Çizelge 3.2: DARPA Suboff AFF8 modelinin ana özellikleri	42
Çizelge 4.1: Tam ölçekli ve model denizaltının uzunlukları ve hızları	46
Çizelge 4.2: Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nın havuz boyutları.	50
Çizelge 4.3: Model pervane ve denizaltıya ait boyutları.	50
Çizelge 5.1: β açılara göre sabit devirde elde edilen hızlar.	58
Çizelge 5.2: Doğrusal azalan devir ve değişken hıza göre örnek 4 kadran verileri...	60
Çizelge 5.3: Dört kadran aralıklarına göre şaft devrinin ve ileri hızın hesaplanma koşulları.....	62
Çizelge 5.4: Pervane dönüş hızı ve ileri yönlü hızlar için dört kadranlı hesaplama koşulları.....	66



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Çekme havuzunda açık su pervanesi deney düzeneği	11
Şekil 2.2: Kavitasyon tankı	12
Şekil 2.3: Wageningen B4-70 pervane serisinin açık su karakteristiği	13
Şekil 2.4: 4 Kadranın koordinat gösterimi	16
Şekil 2.5: B4-70 pervane serisinin 4 kadran için açık su test sonuçları	17
Şekil 2.6: Morton Gertler tarafından hazırlanan deney düzeneği	19
Şekil 2.7: Temsili payanda (strut) düzenlemesi	20
Şekil 2.8: Rüzgar tüneli (ABD)	20
Şekil 2.9: Rüzgar tünelinde denizaltı deneyi (ABD)	21
Şekil 2.10: Rüzgar tünelinde pitot tüpleriyle ölçüm yapılması (Kanada)	21
Şekil 2.11: NASA'da rüzgar tüneli kullanımı	22
Şekil 2.12: Krylov Enstitüsü'nde rüzgar tüneli kullanımı (Rusya)	22
Şekil 2.13: Denizaltılar için Çubuğa Monteli ve Dinamik Test sistemi (Denizcilik Dinamikleri Enstitüsü, Kanada)	23
Şekil 2.14: Denizaltılar için çubuğa monteli ve dinamik test sistemi (Denizcilik Dinamikleri Enstitüsü, Kanada)	23
Şekil 2.15: Düzlemsel hareket mekanizması - QinetiQ, UK	24
Şekil 2.16: Düzlemsel hareket mekanizması SVA Potsdam, Almanya	24
Şekil 2.17: Kore'de kullanılan düzlemsel hareket mekanizması	25
Şekil 2.18: Denizaltı modelinin yanal öteleme için DHM cihazıyla yönlendirilmesi ve kuvvet/momentlerinin hesaplanması	25
Şekil 2.19: Serbest akış içinde model karakteristiğini bulmak için yapılan bir çalışma, SVA Potsdam	26
Şekil 2.20: Serbest akış içinde model karakteristiğini bulmak için yapılan bir çalışma, SVA Potsdam	26
Şekil 2.21: Serbest akış içinde model karakteristiğini bulmak için yapılan bir çalışma, SVA Potsdam	26
Şekil 2.22: MARIN test sistemleri, Hollanda	27
Şekil 2.23: MARIN test sistemleri, Hollanda	27
Şekil 2.24: P noktası için bir boyutlu hacmin sonlu hacimler yöntemine göre gösterimi	33
Şekil 3.1: INSEAN E1619 pervanesinin 3D görüntüleri	39
Şekil 3.2: INSEAN E1619 için ayrıntılı hassas çözüm ağı (fine mesh)	40
Şekil 3.3: INSEAN E1619 hassas çözüm ağı analizinde oluşan akım hatları	41
Şekil 3.4: E1619 pervanesinin DARPA Suboff AFF8 ile gösterimi	42
Şekil 3.5: DARPA Suboff'un etki alanı (domain) hesabı	42
Şekil 3.6: DARPA Suboff'un kesitin çözüm ağı görünümü	43
Şekil 3.7: DARPA Suboff'a farklı kesitlerde etkiyen hız değerleri	43
Şekil 4.1: İleri yönlü hız için sevk noktasının yakınsama grafiği	46
Şekil 4.2: Geri yönlü hız için sevk noktasının yakınsama grafiği	47
Şekil 4.3: HAD değerlerinin yakınsaması ve hassas çözüm ağından kaba çözüm ağına deney sonuçlarının karşılaştırılması	49

Şekil 4.4: E1619 için açık su karakteristiği hesaplamasının ve Di Felice vd. ile deney sonuçlarının karşılaştırılması	49
Şekil 4.5: DARPA Suboff denizaltı test düzeneği.	51
Şekil 4.6: Pervanenin işleneceği ham kütüğü.	52
Şekil 4.7: Pervanenin CNC'de işlenmesi.	52
Şekil 4.8: Kompozit destek ve işlenmiş formda pervane.....	53
Şekil 4.9: Denizaltının yelkeni, dümenleri ve gövdesi.	54
Şekil 4.10: Sevk dinamometresi.	54
Şekil 4. 11: Yük hücresi (Loadcell).	55
Şekil 5.1: Açılara göre sabit devirde hesaplanan hızların gösterdiği değişim.....	59
Şekil 5.2: Doğrusal azalan devir ve değişken hıza göre örnek 4 kadran grafiği	61
Şekil 5.3: Suboff için oluşturulan değişken hız ve devirli 4 kadran hesaplama koşulları.	63
Şekil 5.4: İleri yönlü durumda sevk itme deneyinin HAD sonuçlarıyla kıyaslanması	64
Şekil 5.5: Tornistan durumunda sevki itme deneyinin HAD sonuçlarıyla kıyaslanması.	65
Şekil 5.6: β' ya karşı C_T ve $-10 C_Q$ değerleri.	67

İZE UYUMLU DENİZALTI PERVANESİ TASARIMININ HESAPLAMALI VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Denizaltı çalışmalarında DARPA Suboff modeli ve INSEAN E1619 pervanelerinin birlikte kullanımı çok karşılaşılan bir senaryodur. Ancak bu konudaki çalışmalar genellikle sadece ileri yönlü olarak yapılmaktadır. Pervanelerin çalışma şartları ise gerçekte tek yönlü olarak değil dört yönlü olarak meydana gelir. Bunlar; ileri giderken pervanenin ileri ve geri itme üretmesi, tornistan durumunda ileri ve geri itme üretmesi olarak açıklanabilir.

Bu dört kadranlı çalışma, manevra simülasyonları için büyük bir önem arzeder ve daha önce ize uyumlu bir pervane ile denizaltı üzerinde gerçekleştirilmemiştir. Daha önce üzerine çalışılmamış bu konuyla ilgili eksiği gidermek adına bu tezin oluşturulmasına karar verilmiştir.

Denizaltı manevra simülasyonlarında kullanılmak üzere dört kadrان grafiğini çıkarmak için öncelikle hız ve devirlere ihtiyaç bulunmaktadır. Hız ve devre bağlı olarak hesaplanan hidrodinamik adım açısı (β) 0-360° aralığında dört kadrana ayrılmış olarak incelenecektir. Fakat bu aralıkta (β) değerleri her zaman deneyleri yapılabilecek hız ve devir büyüklüklerinde kalmamaktadır. Denizaltı ve pervaneye ait operasyon koşulları içinde kalan değerlerin hesaplanmasıyla ilgili literatürde herhangi bir çalışma bulunamamıştır. Bu noktada yeni bir yöntem oluşturarak uygun hız ve devir değerleri elde edilmiştir.

Bu yöntem tezin yenilikçi yanı olarak da değerlendirilebilir. Çünkü hidrodinamik adım açısının hesaplanması için denizaltının maksimum ileri ve tornistan hızları hesaba katılmıştır. Böylece aracın başına gelebilecek tüm operasyon koşulları sağlanmış olur. İleri ve tornistan hızları incelenirken birbiri arasında geçiş yapılmış ve bu geçiş esnasında ileri giderken ani durma, tornistan seyrinde ani durma manevraları da incelenmiştir.

Bahsedilen bu dört farklı kadrان üzerinde analiz yapabilmek için modele ve pervaneye farklı hassaslıklarda çözüm ağları oluşturulmuştur. Daha sonra çözüm ağları hazır olan modelin ve pervanenin elde edilen hızlara ve devirlere göre akış analizleri yapılmıştır.

Sonuç olarak tezde ize uyumlu pervanenin dört kadranda performans eğrileri ve Fourier katsayıları çıkarılmıştır. Analizlerle bulunan maksimum hızlardaki sevk noktalarının doğrulanması için deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Pervane, Denizaltı, Pervane İzi, Dört Kadrان, Sevk Deneyleri, Model Pervane



EXAMINATION OF WAKE ADAPTED SUBMARINE PROPELLER DESIGN USING COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL METHODS

SUMMARY

The use of DARPA Suboff model and INSEAN E1619 propellers in submarine studies is a very common scenario. However, studies in this area are generally conducted with forward motion only. The working conditions of the propellers are actually in four directions rather than one direction. These are; clockwise and counter clockwise rotation of the the propeller during both the forward motion and the backward motion.

This four-quadrant study is of great importance for maneuvering simulations and has not previously been performed on a submarine with a wake adapted propeller. It has been decided to create this thesis in order to make up for the lack of interest in this subject that has not been studied before.

In order to use four quadrants to be used in submarine maneuver simulations, speed and rpm values are needed first. The hydrodynamic step angle (β) calculated in accordance with the speed and the rpm will be examined in four quadrants in the range of 0-360°. However, in this range (β) values do not always remain at the speed and cycle magnitudes at which experiments can be performed. No studies have been found in the literature regarding the calculation of the values within the submarine and propeller operating conditions. By creating a new method at this point, appropriate speed and rpm values are obtained.

This method can also be considered as an innovative aspect of the thesis. Because in order to calculate the hydrodynamic step angle, the maximum forward and backwards speeds of the submarine have been added to the calculations. This will ensure all the operational conditions that may occur on the vessel. When forwards and backwards speeds were examined, the transition was made between each other, and during this transition, crash ahead and crash back maneuvers were examined in the course of the turn.

In order to analyze these four different quadrants, fine, medium and coarse meshes were created on the model and the propeller. Flow analysis was then carried out according to the speeds and rpm values of the model and the propeller.

Key Words: Propeller, Submarine, Adapted Propeller, Four Quadrant, Model Propeller, Propulsion Tests



1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) Suboff jenerik denizaltı modeli ve INSEAN (Istituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale) E1619 jenerik denizaltı pervanesi, denizaltı sevki ile ilgili nümerik çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak pervane etkisinin manevra simülasyonlarında kullanması için performansı, sadece ileri yönlü olarak bilmek yetmemekte tüm pervane çalışma şartlarındaki pervane itme ve tork özelliklerini bilmek gerekmektedir. Pervanenin tüm çalışma şartları, dört farklı kombinasyonda gerçekleşmektedir; gemi ileri yönde hıza sahipken pervanenin ileri veya geri yönde itme yaratacak şekilde çalışıyor olması ve geminin tornistan seyri halindeyken pervanenin ileri veya geri yönde itme yaratacak şekilde çalışıyor olması. Bu dört durumdaki performansın bir arada görülebildiği gösterime dört kadranlı pervane performans verisi denilmektedir. Dört kadranda pervane performansının belirlenebilmesi için pervanenin kavitasyon tüneline veya deney havuzunda farklı akış hızı ve pervane devirlerinde test edilmesi gerekmektedir. Bu hız ve devir değerlerinde ilerleme katsayısı J 'nin dört kadranda incelenebilmesi için 360 dereceyi taramalıdır. Bu basamak ise hidrodinamik adım açısı β 'yı 0-360 derece aralığında olarak gerçekleştirilir. Ancak bu testlerin hangi devirler ve hangi hızlar için yapılacağının belirlenmesi önemlidir. Sadece hidrodinamik adım açısını istenilen açı değerinde tutarak testleri gerçekleştirmek pervanenin veya geminin asla karşılaşmayacağı hız ve devir değerlerinde çalıştırılması anlamına gelmektedir. Yapılan literatür araştırmasında, bu devir ve hız değerlerinin belirlenmesinde geminin ve pervanenin çalıştığı koşulların dışına çıkmadan uygun β değerlerini sağlayacak bir yöntemle rastlanmamıştır. Bu tez kapsamında, E1619 pervanesinin dizayn dışı koşullardaki performans özelliklerini, gemi ve pervanenin çalışma koşullarını gözönünde bulundurarak belirleyebilmek için bir yöntem geliştirilmiştir.

Bu yöntemde; kritik hidrodinamik adım açısı (β) değerleri; pervanelerin gerçek tasarım koşulları, ileri giderken ani durma, tornistan giderken ani durma, ileri ve



tornistan durumundaki sevk noktası gibi en önemli noktaları ele alarak belirlenir. Yöntemin uygulandığı bu tezde, deney vrilerei bulunan açık su eğrisi değerlerinde hesapların doğrulaması ve bağımsız çözüm ağı (mesh independence) çalışmaları dahil olmak üzere birçok hesaplamanın ardından, sözkonusu ize uyumlu denizaltı pervanesinin dört kadranda performans eğrisi ve ilgili Fourier katsayıları çıkarılmıştır. Uygulanan hesap yönteminde gerekli olan ileri ve tornistan maksimum hızlarındaki sevk noktası değerlerinin önem arzemesi nedeniyle bu noktaların hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri ile bulunan sevk noktalarının doğrulanması için deneysel çalışmalar da ortaya konmuştur. İze uyumlu E1619 pervanesi DARPA Suboff denizaltı modeline takılarak, direnç ve ileri - tornistan durumunda sevk deneyleri yapılmıştır.

1.2 Literatür Özeti

Bir geminin ön tasarım aşamasında gemi pervanesi hidrodinamik performansının bilinmesi çok önemlidir. Pervanenin açık su eğrileri güç gereksinimi hesaplamaları için genellikle yeterlidir. Ama yine de açık su eğrilerinin yanında manevra simülasyonu ve tornistan koşulları için dört kadrana (bölge) veri gerekmektedir. Yapılan çalışmalardan [1-3], en fazla tercih edilen açık su pervane serilerinden biri olan Wageningen B-serisi verilerine ulaşılabilir. Ayrıca bu pervane serisi denizaltı manevra simülasyonları için de kullanılabilir.

Bir pervanenin hidrodinamik özellikleri tasarım dışı durumlar için iki adım halinde incelenmelidir. İlk adım uygun operasyon koşulları için boyutsuzlaştırılmış hidrodinamik adım açısının (β) hesaplanmasıdır. İkinci adım ise pervanenin kuvvet ve moment değerlerini bulabilmektir. Bu da bilgisayarla veya deneylerle akışkanlar dinamiği temellerine dayanan yöntemler sayesinde çözülebilir ya da ölçülebilir [4].

Kawamura ve diğerleri konvansiyonel bir pervanenin açık su karakteristiği tanımlayabilmek için farklı türbülans modellerini analiz etmiştir [5]. Li [6] $k-\omega$ türbülans modelini ve deneysel verilerle doğrulanmış çalışmaları kullanarak, yüksek çalkılı bir model pervanenin açık su özelliklerini hesaplamıştır. Gao ve diğerleri [7] otonom bir sualtı aracını, etrafında kararsız bir viskoz akış varken sayısal olarak simüle etmiştir. Bu simülasyon için değişken meshlere dayalı (Pressure with Splitting of Operators- PISO) algoritma ve kayma gerilmesi yönteminde (shear-stress transport-SST) $k-\omega$ modeli ile birlikte Reynolds-ortalama Navier-Stokes (Reynolds-

averaged Navier-Stokes-RANS) denklemleri kullanılmıştır. Bir otonom sualtı aracı'nın (AUV) pervaneyle birlikte direnç, basınç ve hız gibi hidrodinamik karakteristikleri, AUV'nin gerçek ortam akış alanına yansıtılmıştır. Sonrasında SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) algoritması sabit viskoz akış alanını hesaplamak için kullanılmıştır. Sayısal hesaplar deneysel verilerle karşılaştırılmış ve iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum sayısal yöntemin, bir pervanenin hidrodinamik performansı hakkında yüksek doğruluk payına sahip olduğunu göstermiştir [7].

Pervanelerin açık su performansının tahmini ile ilgili ayrıntılı bir literatür taraması, 28. ITTC'de bulunabilir [8]. E1619 ile DARPA Suboff AFF8, sevk noktasının özelliklerini [9-10], döngüden döngüye kanat yüklemesini [11], gövde etkileşimlerini [12], ve hidro-akustik özelliklerini [13] incelemek için çeşitli araştırmacılar tarafından çalışmalar yapılmıştır.

İlk olarak, E1619 jenerik denizaltı pervanesinin açık su hidrodinamik karakteristikleri için bir doğrulama çalışması yapılmış ve Di Felice vd. tarafından yayınlanan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır [14]. Suboff hesaplamaları, hem tornistan durumunda hem de ileri yönlü durumda sevk analizi aracılığıyla yapılmıştır. Listelenen hesaplamalarla birlikte, kritik hidrodinamik adım açısı (β) değerleri, pervanelerin, ileri giderken ani durma, tornistan giderken ani durma, ileri yön ve tornistan durumunda sevk noktası gibi en önemli noktaları kapsayan gerçek tasarım koşullarının duyarlılığı ile belirlenir. Dört kadran üzerinde itme ve tork katsayılarının değişimi grafiklendirilmiş ve pervane verilerinin Fourier katsayılarının 30 harmoniği sunulmuştur.

2. TEORİ

2.1 Deneysel Yöntemler

2.1.1 Pervane model deneyleri

Pervanelerin özellikleri üzerine tahmin yapabilmek için açık su pervane deneyleri yapılmaktadır. Pervane itme, tork ve verimi üniform (düzenli) akış içinde açık su deneyleri sayesinde tanımlanır. Kullanılan benzerlik kuralları aracılığıyla model ve gerçek pervane arasında bir ilişki kurulur. Gerçek değerler deneylerden elde edilen verilerle hesaplanabilir. Farklı durumlarda kullanılan benzerlik kanunları şöyle gösterilebilir [15]:

- Geometrik benzerlik
- Kinematik benzerlik
- Dinamik benzerlik

Geometrik benzerlik üç boyutlu şekil benzerliği olarak görülebilir. Pervane kanatlarının uçları normalde çok ince yapılardır. Model ölçeğinde imalat yapılırken boyut küçüldüğünden çok daha ince bir yapı elde etmek gerekir ki bu durum imalat aşamasında çok zorluklara yol açar. Yine de iyi sonuç alabilmek için bu benzerliğin sağlanması gerekir.

Kinematik benzerlikte devir ve ileri hız oranı gerçek pervane ve model arasında sabit olmalıdır.

$$\frac{V_A}{\pi \cdot n \cdot D} = \text{sabit} \quad (2.1)$$

Bu denklemdeki değişkenler;

V_A : Pervane ilerleme hızı (m/s)

N : Devir (rpm)

D : Pervane çapı(m)

Pervane ilerleme katsayısı $J = \frac{V_A}{nD}$ olarak gösterilmektedir.

Dinamik benzerlik şartının sağlanabilmesi için model ve gerçek pervanelere ait Froude ve Reynolds sayıları eşit olmalıdır.

Pervane için Froude sayısı:

$$Fn = \frac{nD}{\sqrt{gD}} \quad (2.2)$$

şeklinde belirtilmiştir.

Froude benzerliğini model (m) ve gerçek pervane (s) için göstermek istersek;

$$F_{nm} = F_{ns} \quad (2.3)$$

$$\frac{n_m D_m}{\sqrt{gD_m}} = \frac{n_s D_s}{\sqrt{gD_s}} \quad (2.4)$$

denklikleri bulunur. Devir sayısını yalnız bırakacak şekilde denklemi tekrar düzenlersek λ benzerlik oranı olmak üzere model-pervane ilişkisi şu şekildedir:

$$n_m = n_s \sqrt{\frac{D_s}{D_m}} = n_s \sqrt{\lambda} \quad (2.5)$$

Bu denklemden, Froude sayısı ile eşitliği kurabilmek için gerçek pervane devir sayısı ile benzerlik oranı karekökü çarpılınca elde edilen n_m sayısında işlem yapılması gerektiği anlaşılır. Reynolds sayısı:

$$Rn = \frac{nD^2}{\nu} \quad (2.6)$$

olarak tanımlanır. Kinematik viskozite ν olarak gösterilir. Reynolds sayısını model-pervane benzerlik oranını kurmak için yazarsak;

$$R_{nm} = R_{ns} \quad (2.7)$$

$$\frac{n_m D_m^2}{v_m} = \frac{n_s D_s^2}{v_s} \quad (2.8)$$

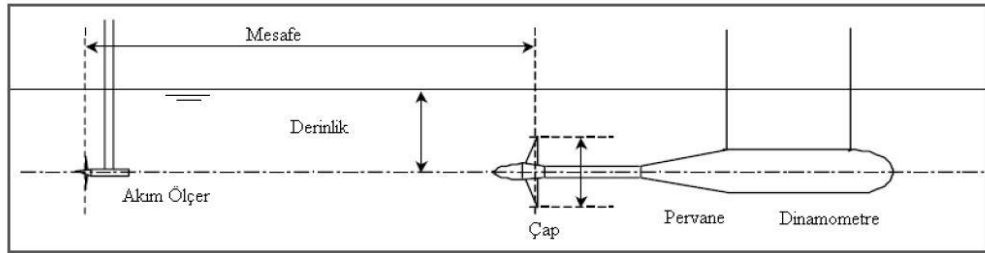
denklemleri kurulur. Eğer modelin ve gerçek pervanenin aynı akışkan ortamında çalışacağı dikkate alınırsa kinematik viskoziteleri de değişmeyecektir($v_m=v_s$). Benzerlik oranı λ için modelin devir sayısı yalnız bırakılırsa aşağıdaki denklem elde edilir;

$$n_m = n_s \left(\frac{D_s}{D_m} \right)^2 = n_s \lambda^2 \quad (2.9)$$

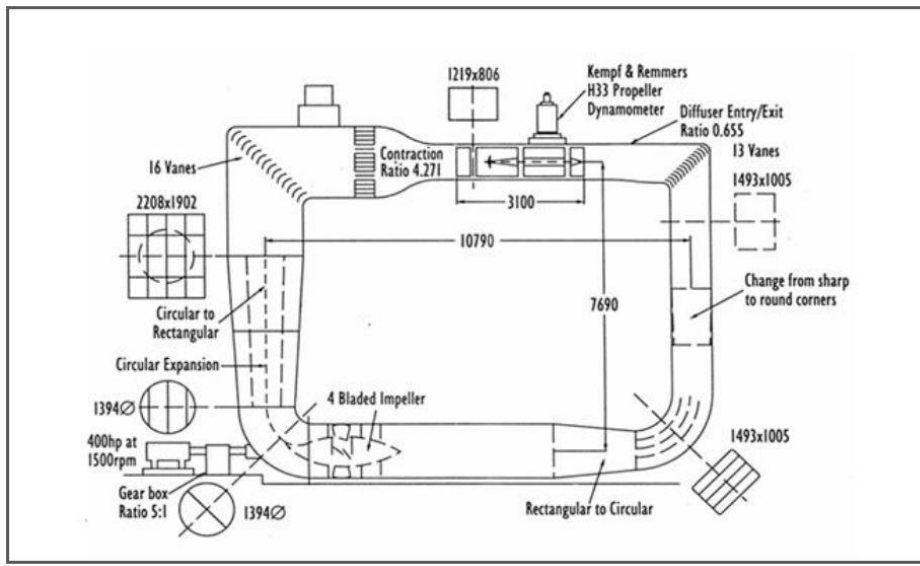
Böyle bir gösterimde ise, gerçek bir pervanenin devir sayısı ile benzerlik oranının karesi ile çarpımı modelin devir sayısına eşit oluyorsa Reynolds benzerliği elde edilmiştir.

Froude yasası temel alındığında ise model pervanenin devir sayısının, gerçek pervane devir sayısının benzerlik oranının karekökü ile çarpımına denk olma şartı sağlanmalıdır. Her iki durum karşılaştırıldığında çıkarılacak sonuç, Froude ve Reynolds sayılarının aynı anda sağlanmasının mümkün olmamasıdır.

Açık su deneyleri hem çekme havuzunda hem de kavitasyon tankında gerçekleştirilebilir. Çekme havuzunda yapılan açık su pervane düzeneği Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Şekil 2.2’de ise kavitasyon tankında gerçekleştirilen bir pervane düzeneği verilmiştir [15].



Şekil 2.1: Çekme havuzunda açık su pervanesi deney düzeneği [15].



Şekil 2.2: Kavitasyon tankı [15].

Pervane tarafından üretilen kuvvetler ve momentler boyutsuz özelliklerin serileri açısından en temel biçimde ifade edilir. Bunlar, belirli bir geometrik yapı için tamamen geneldir. Genel performans özelliklerini ifade etmek için kullanılan boyutsuz terimler aşağıdaki gibidir:

$$\text{İtme Katsayısı } K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$\text{Tork Katsayısı } K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$\text{İlerleme Katsayısı } J = \frac{V_A}{nD} \quad (2.10)$$

$$\text{Kavitasyon Sayısı } \sigma = \frac{p_0 - e}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

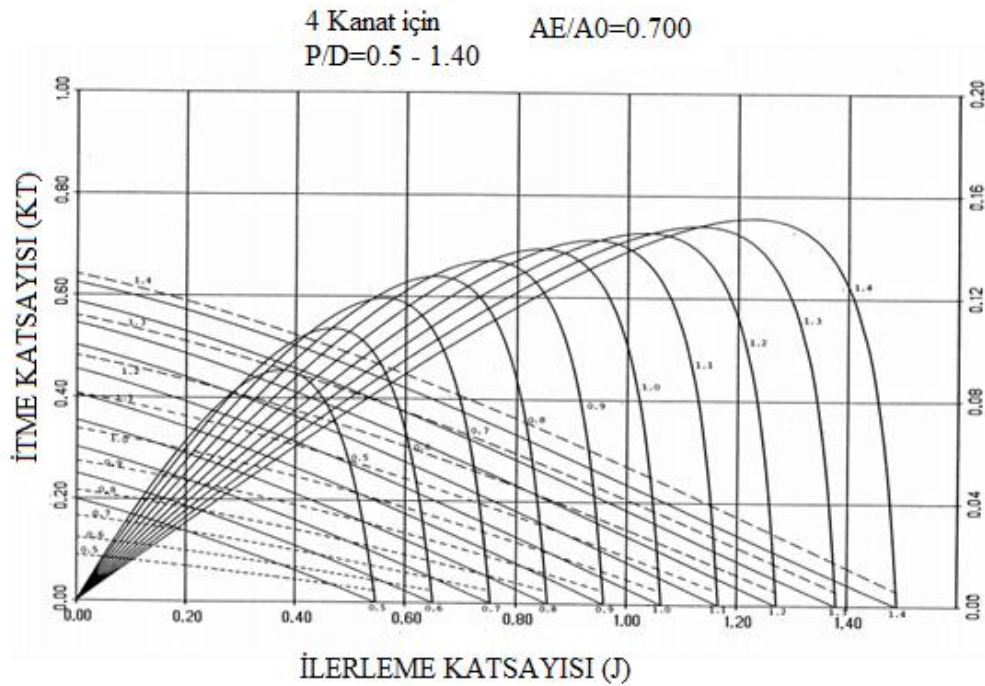
Kavitasyon sayısının açılımındaki V terimi, ya serbest akış ilerleme hızına ya da pervane dönüş hızına bağlı olan temsili bir hız olarak tanımlanabilir. Yaygın olarak açık su çalışmalarında, özellikle de çeki durumunda $V_a = 0$ ve dolayısıyla $\sigma_0 \rightarrow \infty$ olduğu koşullarda istisnai durumlar söz konusu olabilir. Bu sebeple analizde kullanılmak üzere tasarım koşulları ve pervane özelliklerini belirlemek, hız terimini saptayabilmek için bu gibi özel durumlara dikkat edilmelidir.

Yukarıdaki ifadelerde yer alan boyutsuz grupları (denklem 2.10) oluşturmak için geometrik benzer pervanelere boyutsal benzerlik ilkesi uygulanabilir. Bir deniz

pervanesinin itmesinin, yüzey dalgalarına neden olmamak için serbest yüzeyden yeterince uzakta çalışırken aşağıdaki parametrelere bağlı olması beklenebilir:

- (a) D, Çap (m)
- (b) V_a , İlerleme hızı (m/s).
- (c) n, Dönme hızı (rpm).
- (d) ρ , Sıvının yoğunluğu (kg/m^3).
- (e) μ , Sıvının viskozitesi (kg/m.s).
- (f) $(p_0 - e)$, p_0 mutlak sabit basınç, e ise ortam sıcaklığında buhar basıncı (N/m^2).

Kavitasyonsuz bir ortamda ileri yönlü olarak veya pozitif ilerleme katsayısı ile çalışan bir dizi sabit kanatlı pervaneye ait tipik bir açık su diyagramı Şekil 2.3'te gösterilmektedir [16].



Şekil 2.3: Wageningen B4-70 pervane serisinin açık su karakteristiği [32].

Bu şekil, özellikle pervane için, pozitif ilerleme ve dönme hızındaki tüm çalışma koşullarını tanımlar; zira sabit koşullardaki pervane yalnızca P / D hatve oranı ile tanımlanan karakteristik eğri boyunca çalışabilir. Diyagram, genelde ölçek etkilerine bağlı olarak, karakteristik eğrilerin türetildiği geometrik formla aynı olan herhangi bir pervaneye uygulanabilir, ancak söz konusu pervanenin çapı veya ölçek oranı

farklı olabilir ve belirli Reynolds sayı etkilerine tabi olan başka herhangi bir sıvıda çalışabilirler. Bununla birlikte geometrik ölçüleri verilmiş belirli bir pervane için K_T , K_Q ve J diyagramı kullanılır, akışkan yoğunluğu ve çapı sabit olduğundan, K_T , K_Q ve J diyagramının genel tanımlamaları aşağıdaki gibi tork, itme, devir ve ilerleme hızının ilişkisine indirgenir:

$$\left\{ \frac{Q}{n^2}, \frac{T}{n^2} \right\} \text{ karşı } \left(\frac{V_a}{n} \right) \quad (2.11)$$

Dönme hızından ziyade ilerleme hızına dayanan (2.12) ve (2.13) denklemlerinden gelen itme ve tork katsayısının alternatif gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A_0 V_a^2} \quad (2.12)$$

$$C_P = \frac{P_D}{\frac{1}{2} \rho A_0 V_a^3} \quad (2.13)$$

Denklem (2.12) 'den çıkarılacağı gibi, itme yükü ve güç yükü katsayısı, geleneksel itme ve moment katsayısı cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$C_T = \frac{8 K_T}{\pi J^2} \quad (2.14)$$

ve

$$C_P = \frac{8 K_Q}{\pi J^3} \quad (2.15)$$

Bir pervanenin açık su verimliliği (η_0), itme beygir gücünün çıkış beygir gücüne olan oranıdır [16]. İtme beygir gücü $THP=TV_a$; çıkış beygir gücü ise $DHP=2\pi nQ$ olarak tanımlanır ve burada T pervanenin itme kuvvetini; V_a , ilerleme hızını; n , pervanenin dönüş hızını; Q , torku temsil etmektedir. Tanımlamalar yerine yazıldığı zaman aşağıdaki denklem elde edilir. Böylece,

$$\eta_0 = \frac{TV_a}{2\pi nQ} = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi} \quad (2.16)$$

Şimdiye dek bu bölümde pervanelerin ilk kadran performansı tartışıldı. Pozitif dönme hızı ve ileri veya sıfır ilerleme hızı ile çalışan pervaneler içindir. Bu, bir pervaneyi geleneksel şekilde çalıştırmanın açık bir yoludur, ancak manevra durumlarını incelemek veya gemilerin performansını izlemek için başka veriler gereklidir.

Sabit kanatlı pervaneler için ilerleme açısına dayalı olarak dört kadranı tanımlamak mümkündür.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{V_A}{0.7\pi nD} \right) \quad (2.17)$$

Birinci Kadran: İleri Hız – ileri yol

Devir – ileri yol

Buradaki β açısı $0 \leq \beta \leq 90^\circ$ aralığında değişir.

İkinci Kadran: İleri Hız – ileri yol

Devir – tornistan

Bu kısımda ise β açısı $90^\circ < \beta \leq 180^\circ$ aralığında değişir.

Üçüncü Kadran: İleri Hız – tornistan

Devir– tornistan

Bu kısımda β açısı $180^\circ < \beta \leq 270^\circ$ aralığında değişir.

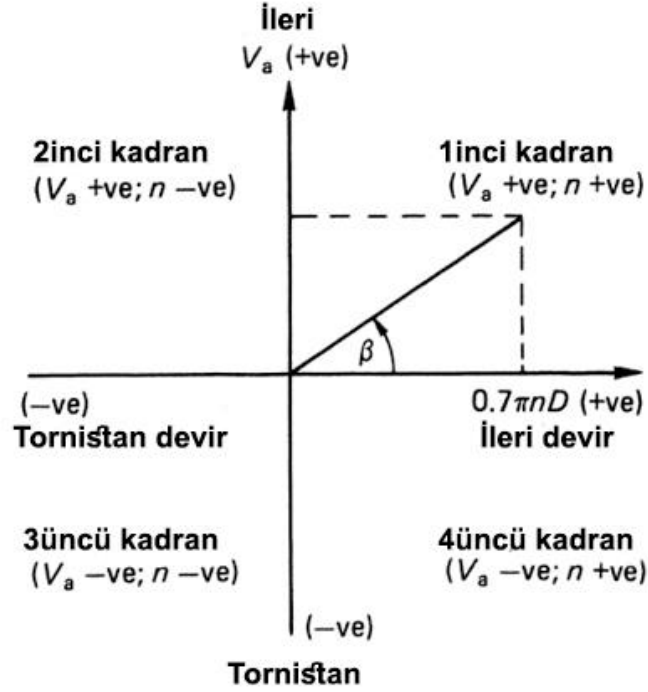
Dördüncü Kadran: İleri Hız – tornistan

Devir– ileri yol

Son kısımda ise β açısı $180^\circ < \beta \leq 270^\circ$ aralığında değişir.

Yeterli deneysel verinin mevcut olması koşuluyla, kadranların her birindeki pervanenin itme ve tork özelliklerini tanımlamak için ilerleme açısı β 'ya dayanan periyodik bir fonksiyon tanımlamak mümkündür. Bu bağlamda, $\beta = 0^\circ$ veya 360° olduğunda ileri yol çeki koşullarına, $\beta = 180^\circ$ olduğunda ise tornistan çeki durumuna

tekabül etmektedir. $\beta = 90^\circ$ ve 270° derecedeki pozisyonlar, pervane dönmüyorken, sırasıyla suyun önünde veya arkasına sürüklendiği durumla alakalıdır. Şekil 2.4, sabit kanatlı pervaneler için bu gösterimi açıklığa kavuşturmaya yardımcı olur.



Şekil 2.4: 4 Kadranın koordinat gösterimi.

Çok kadranlı çalışmalar için ilerleme açısı gösterimi, geleneksel ilerleme katsayısı J 'ye göre çok daha esnek bir ifade sunar; örneğin pervane devri 0 iken, $\beta = 90^\circ$ veya 270° olduğunda, $J \rightarrow \infty$ gider. Yine benzer problemlerin oluşmasını önlemek için itme ve tork katsayılarının modifiye edilmesi gerekir ve aşağıdaki denklemler türetilir [16]:

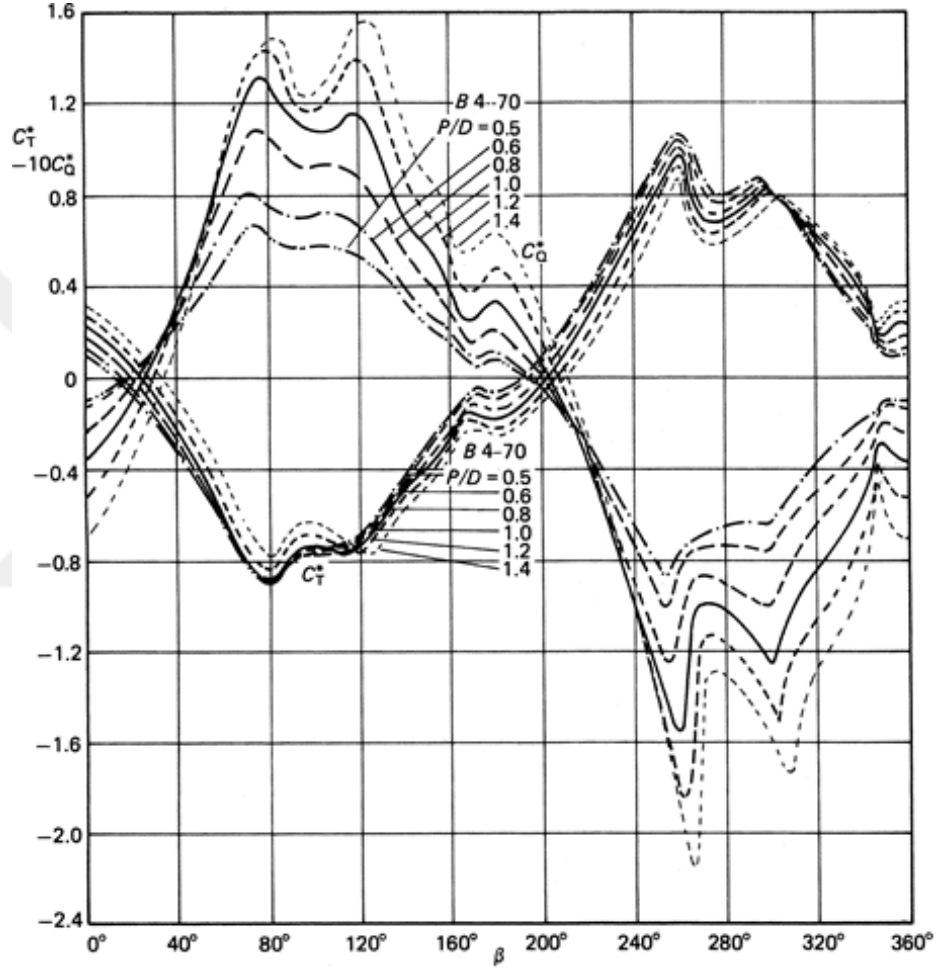
$$C_T^* = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A_o V_r^2} \quad (2.18)$$

$$C_Q^* = \frac{Q}{\frac{1}{2} \rho A_o V_r^2 D} \quad (2.19)$$

İlerleme hızı V_r , pervane kanat çapının $0.7R$ olduğu noktaya göre alınır. Bu nedenle yukarıdaki denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$C_T^* = \frac{T}{(\pi/8)\rho[V_a^2 + (0.7\pi nD)^2]D^2} \quad (2.20)$$

$$C_Q^* = \frac{Q}{(\pi/8)\rho[V_a^2 + (0.7\pi nD)^2]D^3}$$



Şekil 2.5: B4-70 pervane serisinin 4 kadrant için açık su test sonuçları [16].

Denklem 2.20'deki yıldız işaretleri, denklem (2.12) ile (2.13)'te tanımlanan serbest akış hızına dayalı itme ve moment katsayıları C_T ve C_Q ile karışıklığı önlemek için kullanılmaktadır.

Bu katsayıları kullanarak çizilen sonuç, Wageningen B4-70 uskur pervane serisi için Şekil 2.5'te gösterilen formları alır.

Görülebileceği gibi, bu eğriler $0^\circ \leq \beta \leq 360^\circ$ aralığında periyodiktir ve bu nedenle kendilerini kolayca Fourier tipi bir gösterime dönüştürürler. Van Lammeren ve ark. bir form önermektedir [17]:

$$C_T^* = \sum_{k=0}^{20} [A_k \cos(k\beta) + B_k \sin(k\beta)] \quad (2.21)$$

$$C_Q^* = \sum_{k=0}^{20} [A_k \cos(k\beta) + B_k \sin(k\beta)] \quad (2.22)$$

Açık su verileriyle tasarım dışı durumundaki özellikler değerlendirilirken, dikkate alınan tasarıma yakın bir modelden veri bulmaya çalışmak önemlidir. Wageningen verilerinden, pervane kanat alanı oranının, $40^\circ < \beta < 140^\circ$ ve $230^\circ < \beta < 340^\circ$ bölgelerinde C_T^* ve C_Q^* 'ın büyüklüğü üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülür.

Bu bölgelerde, pervane kanat alanı oranı 0.40 - 1.00 aralığında değişen bir model ölçeği için C_Q^* büyüklüğü neredeyse üç katına kadar değişebilir. Benzer şekilde, Şekil 2.3'de görüldüğü gibi, hatve oranı P/D 'nin etkisi, neredeyse tüm β aralığında C_Q^* üzerinde önemli bir etkiye sahip olacaktır. Kanat sayısının, C_T^* ve C_Q^* 'ın büyüklüğü üzerinde hatve oranı ya da açılım alanı oranı kadar etkili değildir. Bu yüzden bu terim daha az etkili bir değişken olarak ele alınabilir.

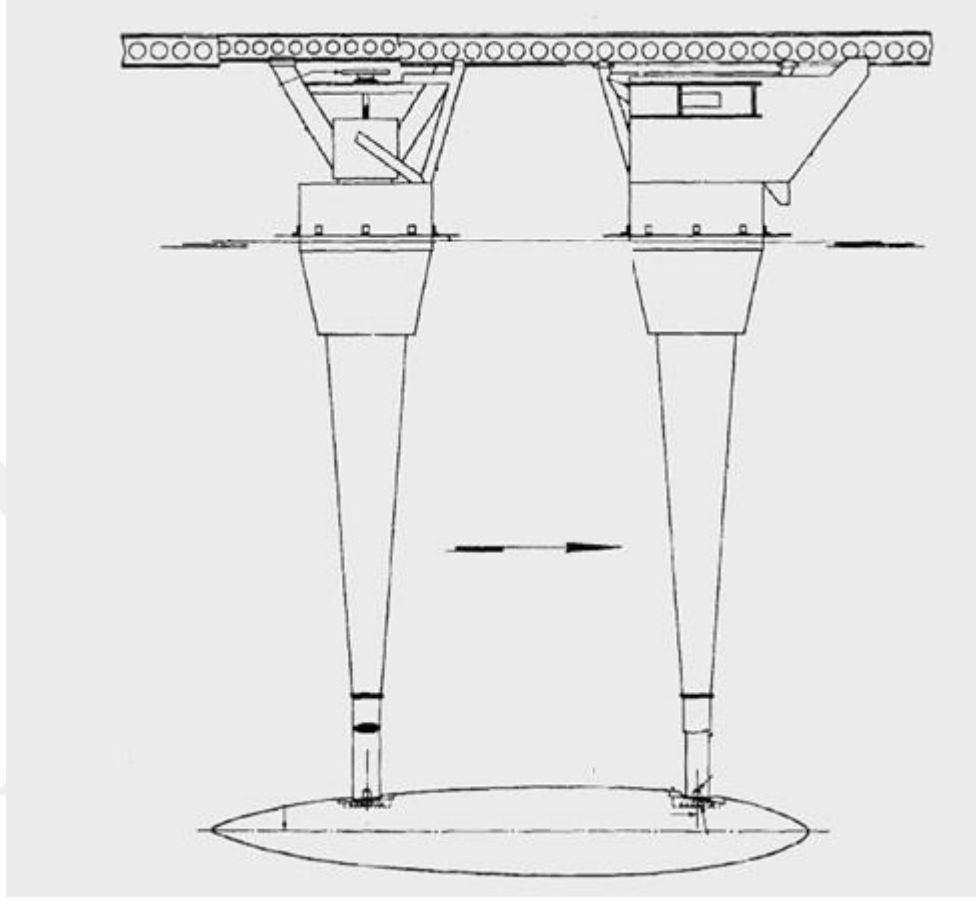
Wageningen B-uskur pervane serisinin yanı sıra, tasarım dışı koşullarında çalışan pervaneler üzerine yıllardır yapılan diğer çalışmalar da vardır. Bunların arasında Conn [18] ve Nordstrom'un [19] çalışmaları gösterilebilir. Ancak sonradan yapılan bu çalışmalar, yukarıda belirtilen Wageningen verilerinden çok daha az kapsamlıdır.

2.1.2 Denizaltı deneyleri

2.1.2.1 Denizaltı deney sistemleri

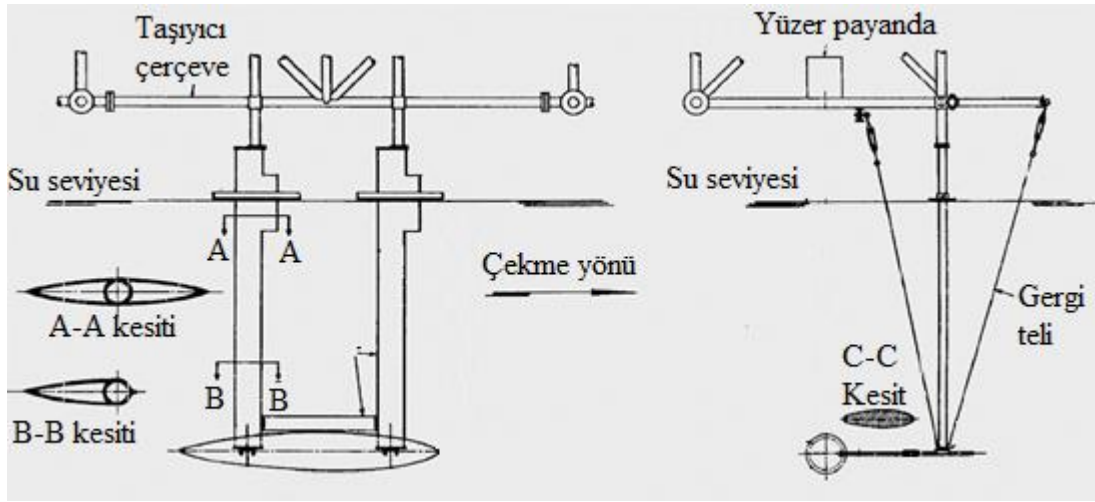
Denizaltı direnciyle ilgili en eski bilinen çalışmalar, 1950'lerde David Taylor Model Havuzunda çalışan bir mühendis olan Morton Gertler tarafından gerçekleştirilmiştir [21]. İlk deney setinde, denizaltı modeli, suyun altında payanda (strut) adı verilen kollarla çekildi (Şekil 2.6). Dinamometre ve diğer cihazlar suyun dışına

yerleştirildiğinden, bu deneylerde direnç sonuçları, hem payandalarının hem de denizaltı modelinin viskoz direncini ve payandaların neden olduğu dalga direncini içerir [20].



Şekil 2.6: Morton Gertler tarafından hazırlanan deney düzeneği [21].

Payandaların, toplam dirençteki payını ve denizaltı modellerinin kesin direncini hesaplamak için temsili bir payanda monte edilir ve direnç bir denizaltı modeli olmadan hesaplanır (Şekil 2.7).

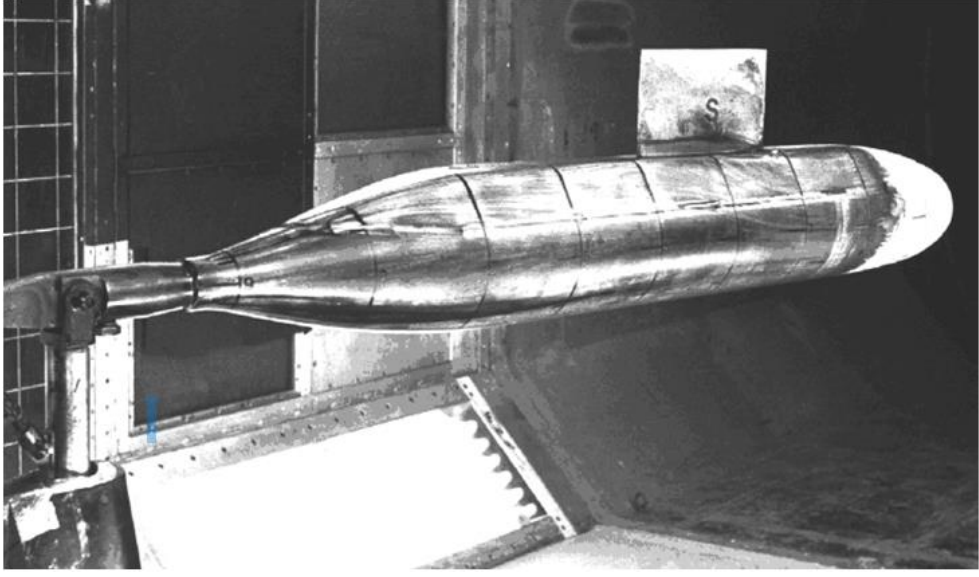


Şekil 2.7: Temsili payanda (strut) düzenlemesi [21].

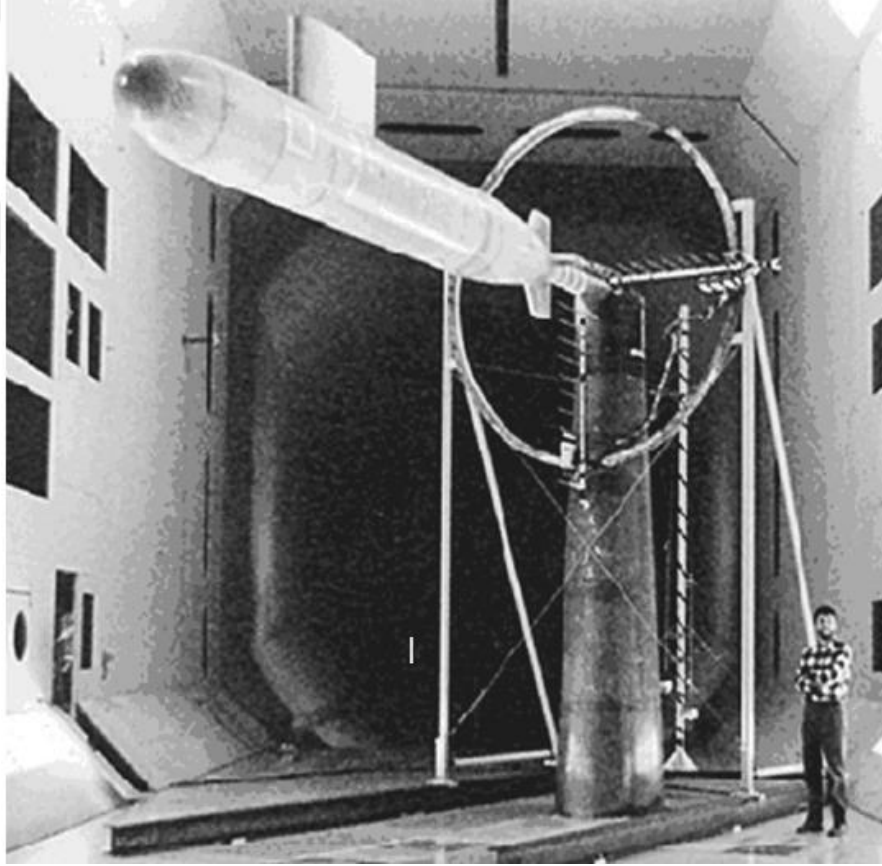
Bunun dışında, denizaltı direncini bulmak için sıklıkla karşılaşılan bir başka yöntem de rüzgar tüneli tesisleridir. Özellikle [4]'te belirtildiği gibi, standart denizaltı modeli çalışmalarının önemli bir kısmı rüzgar tünellerinde gerçekleşti. Ulusal Mühendislik Akademisinin Denizaltı direncinde ve hareket araştırmalarında kullandığı, boyutları 2m x 3m olan rüzgar tünelleri şekil 2.8 ve şekil 2.9'de gösterilmektedir. Kanada'da bulunan Deniz Dinamikleri Rüzgar Tünel Enstitüsüne ait tünelin boyutları ise 9m x 9m'dir ve Şekil 2.10'de gösterilmiştir [22].



Şekil 2.8: Rüzgar tüneli (ABD) [22].



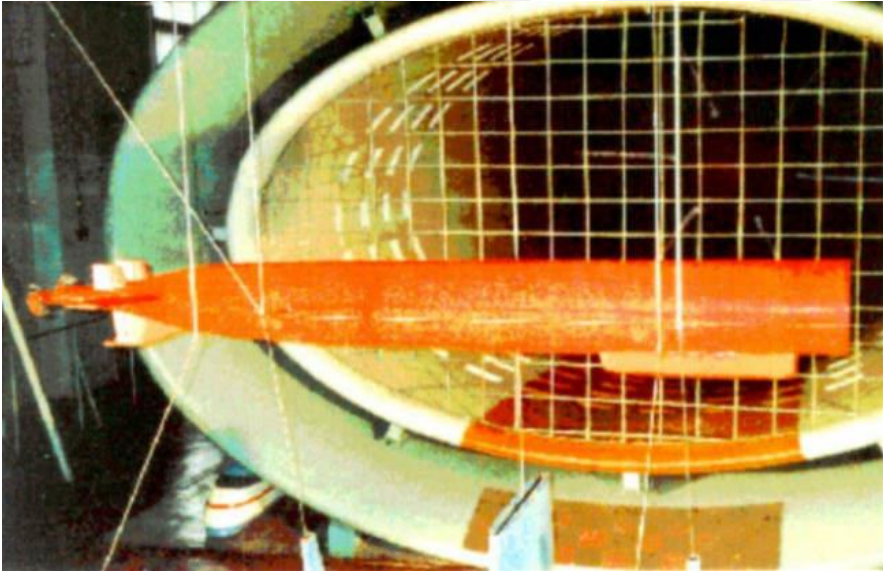
Şekil 2.9: Rüzgar tüneline denizaltı deneyi (ABD) [22].



Şekil 2.10: Rüzgar tüneline pitot tüpleriyle ölçüm yapılması (Kanada) [22].



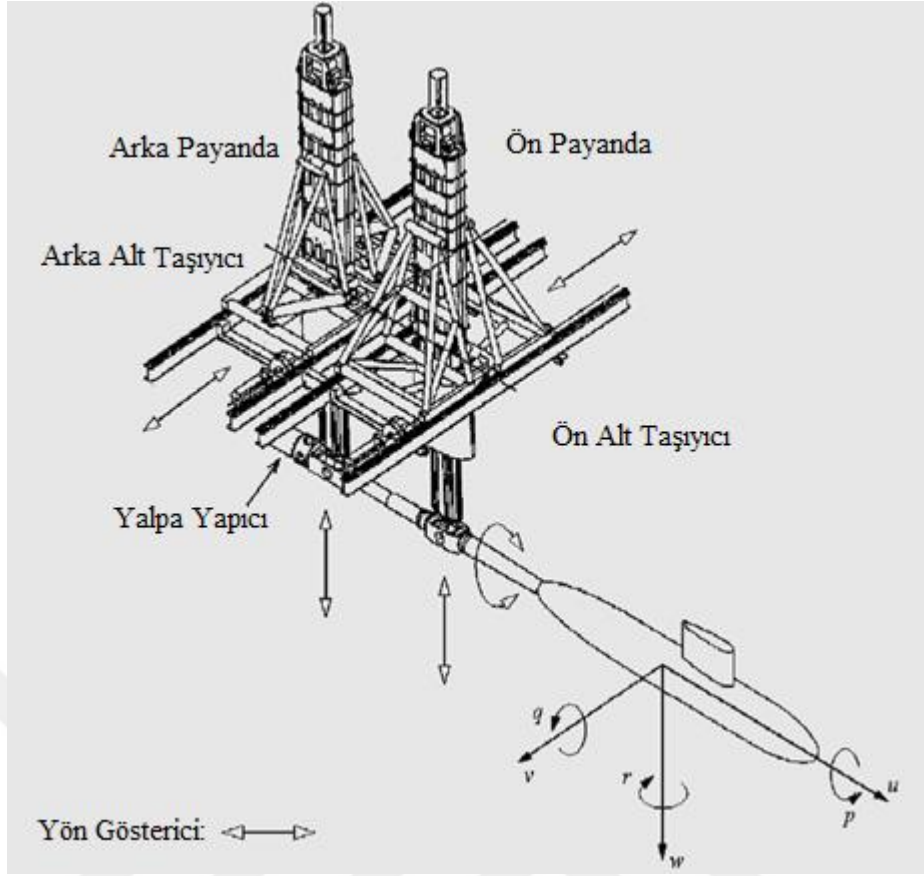
Şekil 2.11: NASA’da rüzgar tüneli kullanımı.



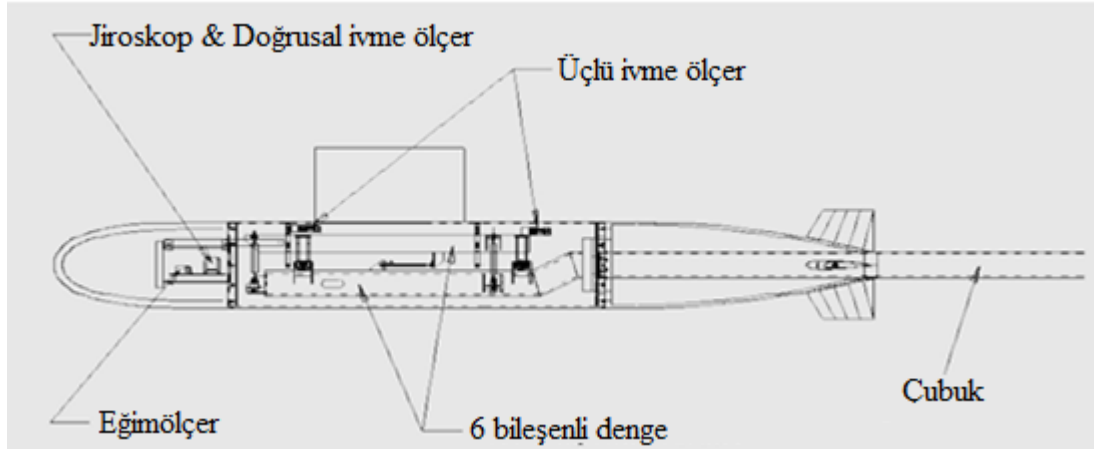
Şekil 2.12: Krylov Enstitüsü’nde rüzgar tüneli kullanımı (Rusya) [23].

Denizaltı çalışmalarında kullanılan bir başka yöntem ise çubuğa monteli olarak adlandırılan, denizaltının kık tarafından monte edildiği sistemdir.

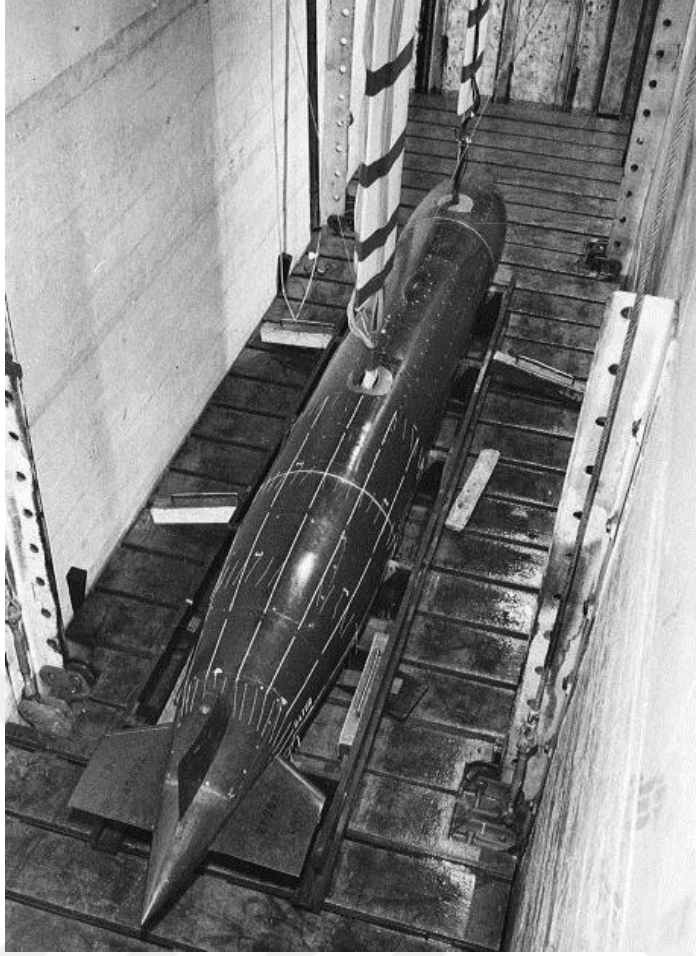
20 dereceden yüksek açılarda, titreşimler çıkan sonuçları net bir şekilde etkilemektedir. O yüzden bu yöntem çok sık kullanılmaz. [20]



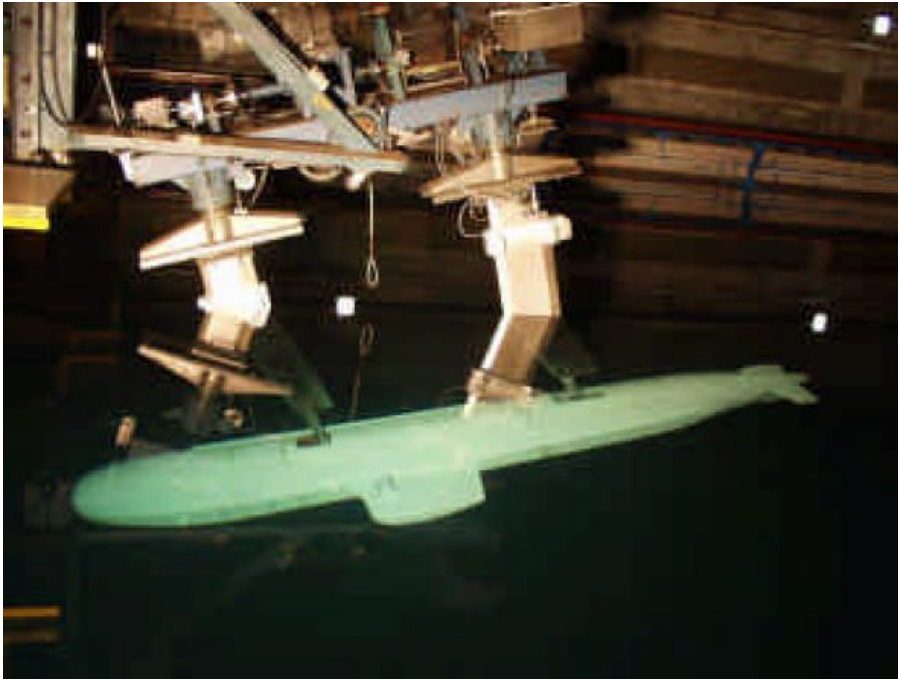
Şekil 2.13: Denizaltılar için Çubuğa Monteli ve Dinamik Test sistemi (Denizcilik Dinamikleri Enstitüsü, Kanada) [22].



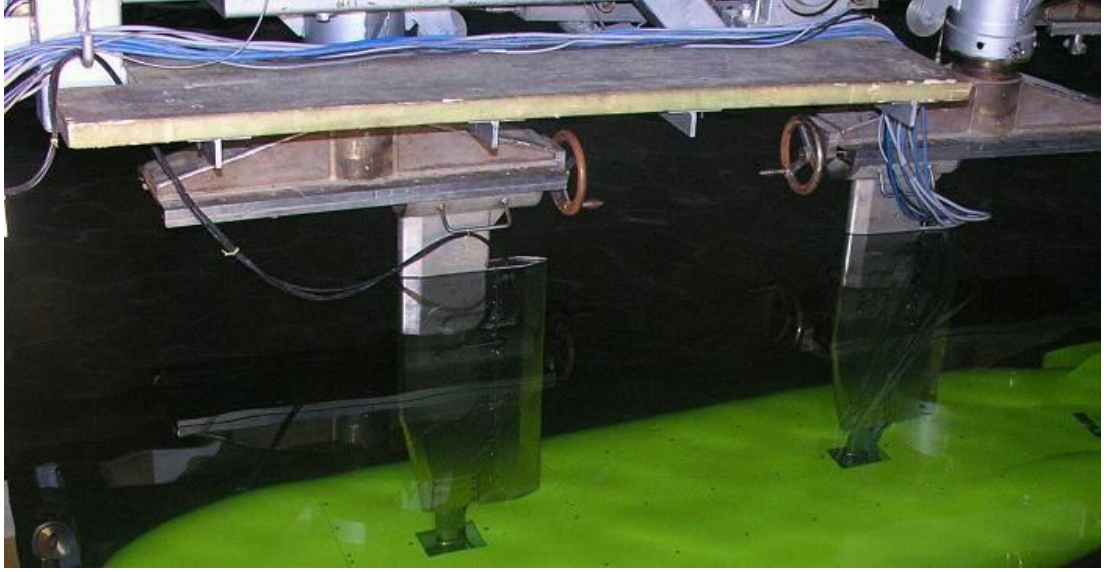
Şekil 2.14: Denizaltılar için çubuğa monteli ve dinamik test sistemi (Denizcilik Dinamikleri Enstitüsü, Kanada) [22].



Şekil 2.15: Düzlemsel hareket mekanizması - QinetiQ, UK [22].



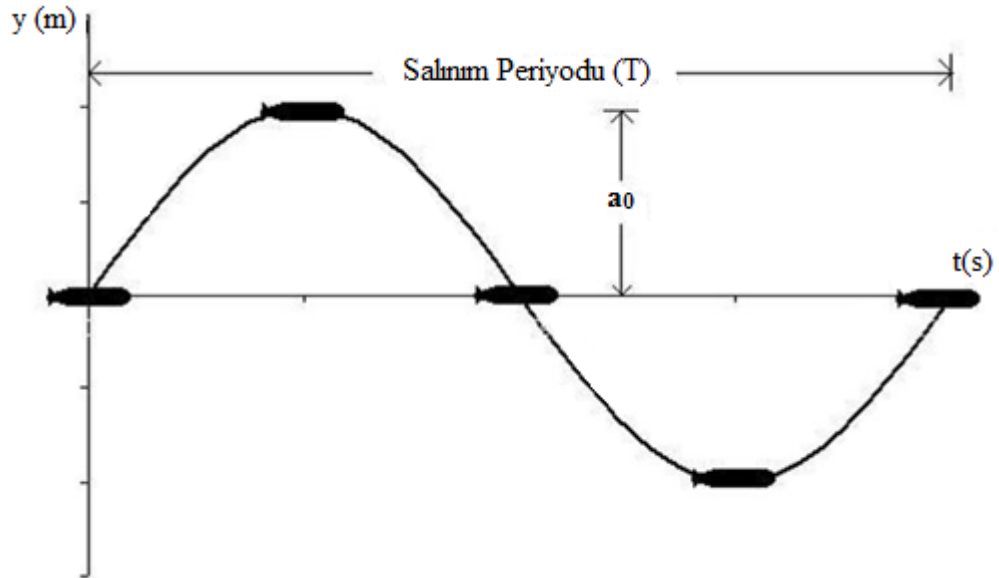
Şekil 2.16: Düzlemsel hareket mekanizması SVA Potsdam, Almanya [24].



Şekil 2.17: Kore’de kullanılan düzlemsel hareket mekanizması [20].

Şekil 2.15, 2.16 ve 2.17’de görülen sistemler, 6 serbestlik derecesi kazandırmak için ters çevrilmiş modele öncülük etmektedir.

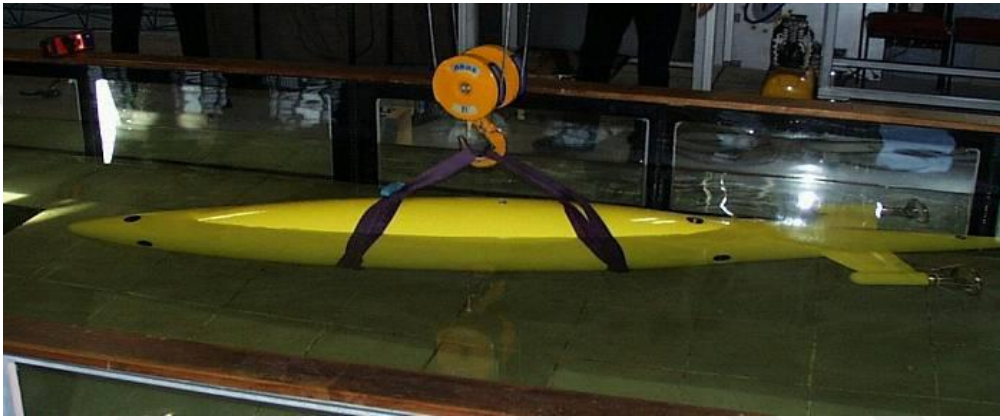
Denizaltıların direnç hesaplamalarına ek olarak , hidrodinamik özellikleri birçok enstitüdeki Düzlemsel Hareket Mekanizması-DHM (Planar Motion Mechanism-PMM) sistemi (manevra türevleri, kuvvetler ve momentler) yardımıyla incelenmektedir. [25]



Şekil 2.18: Denizaltı modelinin yanal öteleme için DHM cihazıyla yönlendirilmesi ve kuvvet/momentlerinin hesaplanması [20].



Şekil 2.19: Serbest akış içinde model karakteristiğini bulmak için yapılan bir çalışma, SVA Potsdam [24].

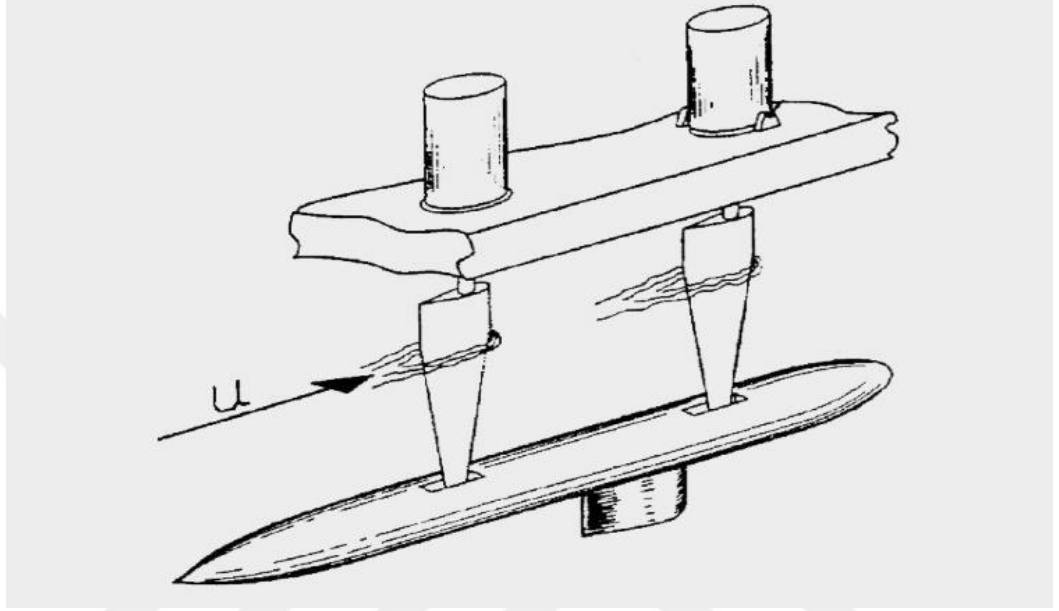


Şekil 2.20: Serbest akış içinde model karakteristiğini bulmak için yapılan bir çalışma, SVA Potsdam [24].

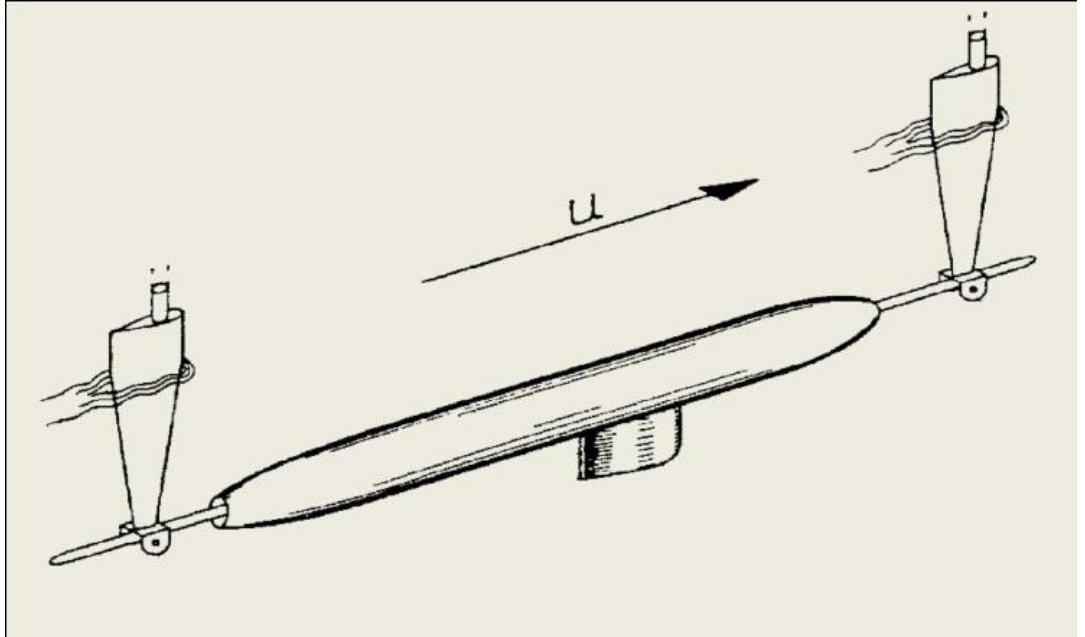


Şekil 2.21: Serbest akış içinde model karakteristiğini bulmak için yapılan bir çalışma, SVA Potsdam [24].

Denizaltının özelliklerini bulmak için kullanılan bir başka yöntem de serbest yüzüş testidir. Su geçirmez bilgisayarlar ve cihazlar burada servis vermektedir. Yazılım tarafından belirlenen pervane dönüşleri ve dümen açısı, denizaltı modelini kontrol eder ve yönlendirir. Denizaltı modelini rotada tutmak için gereken kuvvetler ve momentler hesaplanır.



Şekil 2.22: MARIN test sistemleri, Hollanda [22].



Şekil 2.23: MARIN test sistemleri, Hollanda [22].

Gemi inşa alanındaki deneysel yöntemlerde denizaltı direnci hesaplama yönteminde kullanılan sistemlerden biri Hollanda MARIN’de şekil 2.23’te gösterildiği gibidir. Şekil 2.22’de gösterilen sistem, payandaların bozulmasına maruz kalır, sonuç olarak Şekil 2.23’deki sistem ortaya çıkar.

2.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemleri

Son yıllarda gemi pervanesi analizlerinde, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerinin kullanımı önemli bir hale gelmiştir. HAD yöntemlerinden hem pervane özelliklerinin incelenmesinde hem de kavitasyon analizi uygulamalarında faydalanılmaya başlanmıştır. Bunun yanı sıra model deneylerinin de hala önem arz etmesinin sebebi HAD metodlarında bazı iyileştirmeler olmasına karşın yine de hata yüzdesinin yüksek olmasıdır [15]. Akışkan hareketini inceleyebilmek için HAD yöntemlerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS), LES (Large Eddy Simulation) [14], DES (Detached Eddy Simulations) ve DNS (Direct Numerical Simulations) yöntemleri kavitasyonlu ve kavitasyonsuz gemi pervaneleri üzerindeki akışları incelemek için kullanılmıştır. Böyle yöntemlerin uygulamalama kısıtları bilgisayarın işlem gücüne göre değişmektedir. Bu açıdan bakıldığında RANS yöntemleri daha kısa sürede analiz yapabilmesi sebebi ile daha avantajlı bir kullanım sağlar. RANS denklemlerinin hesaplanmasında sonlu hacimler metoduna başvurulur. Reynolds stres modelleri ve $k-\omega$ türbülans modelleri deneysel çalışmalarla daha iyi bir uyum sağlamaktadır [16].

2.2.1 Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde kullanılan ana denklemler

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde matematiksel hesaplamalar akışkanlar dinamiğinin ana denklemlerinden yola çıkılarak yapılır. Bu eşitlikler fizik yasalarını matematik hesaplamalarla açıklar [26].

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodlarında kullanılan ana denklemler aşağıda iki madde halinde gösterilmiştir:

- Kütlenin Korunumu
- Momentumun Korunumu

Denklemleri aşağıda detaylarıyla verilmiş durumdadır.

2.2.1.1 Kütlenin korunumu denklemi

Süreklilik denklemi ya da farklı bir deyişle kütlenin korunumu denklemi aşağıda formül (2.23)'te gösterildiği gibidir. [26].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.23)$$

Kütlenin korunumu denklemi (2.23) hem sıkıştırılabilir hem de sıkıştırılamayan akış için geçerli olmaktadır.

Üç boyutlu eksenel simetrik geometriler için kütlenin korunumu denklemi aşağıda (2.24) gösterilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = 0 \quad (2.24)$$

Denklemde x eksenel koordinatı, r ise radyal koordinatı temsil etmekte olup eksenel hız v_x , radyal hız ise v_r sembolü ile ifade edilmiştir.

2.2.1.2 Momentumun korunumu denklemi

Atalet referans ekseninde momentumun korunumu denklemi aşağıda gösterildiği gibidir [26].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.25)$$

Denklemde gösterilen $\rho \vec{v}$ yer çekimi kuvvetini, $\vec{F}$ dış kuvvetleri, $\bar{\tau}$ gerilme tensörünü ve p ise statik basıncı ifade etmektedir. Ek olarak $\vec{F}$ modele bağlı kaynak terimlerini de göstermektedir.

Gerilme tensörü $\bar{\tau}$, μ moleküler viskozite, I birim tensör ve $\nabla \vec{v}$ hacimsel genleşme cinsinden (2.26) denklemindeki gibi hesaplanmaktadır.

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (2.26)$$

Radyal ve eksenel momentum korunum denklemleri 2 boyutlu eksenel simetrik geometriler için aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = \\ -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \end{aligned} \quad (2.27)$$

ve

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \frac{v_z^2}{r} + F_r \end{aligned} \quad (2.28)$$

Momentum korunum denklemi için sonuç olarak aşağıdaki ifade elde edilmiştir.

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \quad (2.29)$$

2.2.2 Türbülans modelleme

Tüm mühendislik uygulamaları gerçekte türbülanslı olduğu için türbülans modellemesi çoğu HAD simülasyonunda çok önemli bir konudur. Türbülanslı akış uygulamaları için en fazla kullanılan modellerden ikisi k-ε ve k-ω açıklaması aşağıdaki gibi açıklanabilir.

2.2.2.1 SST k-ε model

K-ε, endüstriyel uygulamalarda kullanılan en yaygın türbülans modellerinden biridir. Öte yandan, daha yüksek basınç gradientleri, güçlü ayrıklaşma, yüksek girdaplı bileşen ve büyük akım hattı eğriliğine sahip akışlar için zayıf bir performans gösterir. Göl ya da nehir ağzı gibi yerlerde akışkanın oluşturduğu girdapların hatalı hesaplanmış yayılma oranına ek olarak, k oluşumu akışkanın ayrılma noktası gibi büyük şekil değiştirme oranına sahip bölgelerde fiziksel değildir. Bu durum hatalı bir model tahminine yol açabilir [26].

Bu model, akışın türbülans özelliklerini ifade etmek için ilave olarak iki tane transport denklemin eşitliğe ilave edilmesiyle elde edilir. İlk ilave edilen değişken,

türbülansdaki enerjiyi tanımlayan türbülans kinetik enerji, k 'dir. Ayrıca, ε türbülans ölçeğini temsil eder. Model transport denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_v \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3l} G_b) - C_{2l} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.31)$$

(2.30) ve (2.31) denklemlerinde, k ve ε , sırasıyla türbülans kinetik enerjiyi ve türbülans kinetik enerjinin dağılım oranını temsil eder. Ayrıca, G_k ve G_b , sırasıyla sephiye nedeniyle ortalama hız gradyentleri ve türbülans kinetik enerjisinin üretilmesine bağlı olarak türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu tanımlamaktadır. Son olarak, μ_t türbülans viskozitesi veya girdap viskozitesi olarak adlandırılır [27].

2.2.2.2 SST k- ω model

SST k- ω de akışın türbülans özelliklerini göstermek için fazladan iki transport eşitliğine sahip iki denklemlili bir modeldir. Bu model türbülans enerjisinin konveksiyonu ve difüzyonu gibi etkilerini açıklamak için iki denklemlili modelin kullanılmasını olası hale getirir. İlk taşınan değişken türbülanslı kinetik enerji k türbülanstaki enerjiyi belirtirken, ikinci değişken ω türbülansın ölçeğini belirleyen spesifik enerji kaybını belirtir [27]. Genel olarak, SST modeli ters basınç gradyanı altındaki ayrışmanın başlangıcını ve boyutunu doğru bir şekilde hesaplar [26]. Model dönüşüm denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega \quad (2.33)$$

Burada;

k : Türbülans kinetik enerjisi

ω : Türbülans kinetik enerjisinin spesifik enerji kayıp oranı

G_k : Ortalama hız gradyenlerinden dolayı türbülanslı kinetik enerji üretimi

G_ω : ω 'nin üretimi

Γ_k : k 'nin efektif difüzyonu

Γ_ω : ω 'nin efektif difüzyonu

Y_k : k 'nin türbülansa bağlı olarak yayılımı

Y_ω : ω 'nin türbülansa bağlı olarak yayılımı

2.2.3. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği teknikleri

2.2.3.1. Yönetici denklemlerin ayrıklaştırılması-sonlu hacimler yöntemi

Sonlu hacimler metodu ilk kez 2 boyutlu zamana bağlı Euler eşitliklerinin çözümü için McDonald (1971), MacCormack ve Paullay (1972) tarafından oluşturulmuştur. Ardından bu yöntemi üç boyutlu hale getirenler Rizzi ve Inouye'dir (1973). Sonlu hacimler yöntemi kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılmakta olup, korunumlu değişkenlerin değerleri kontrol hacmi üzerinde hesaplanmaktadır. Bu yöntemin integral formdaki korunum denklemlerini kontrol hacmi üzerinde ayrıklaştırdığı bilinmektedir. Diverjans içeren terimler hacim integrasyonu sırasında diverjans teoremi ile yüzey integralleri formuna dönüştürülür [15]. Sonrasında diverjans içeren bu terimler her bir sonlu hacmin yüzeylerindeki akılar olarak ele alınır. Bir hacme etki eden akı miktarı, komşu hacimden çıkan akıya denk olduğundan bu metod korunumlu bir metod olarak düşünülür. Sonlu hacimler yöntemi hem yapılandırılmış hem de yapılandırılmamış ağlarla çözüm yapabilir, bunun sebebi metodun kontrol hacimleri ile çalışmasıdır.

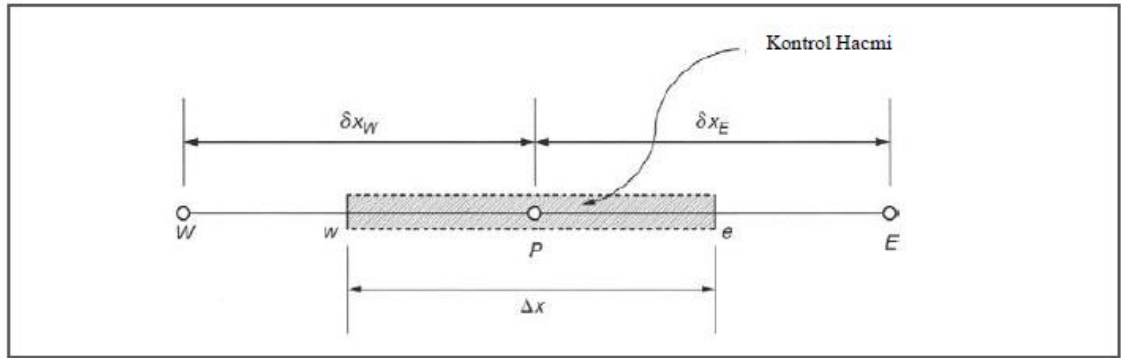
Akışı belirleyen genel korunum denklemi aşağıdaki (2.34) gibi integre edilmektedir:

$$\int_{CV} \text{div}(\rho \Phi \vec{V}) dV = \int_{CV} \text{div}(\gamma \text{grad} \Phi) dV + \int_{CV} \Phi dV \quad (2.34)$$

Diverjans teoremi, (2.34) denklemindeki integrasyon üzerine uygulandığında, bir kontrol hacmindeki akı dengesine ulaşılır.

Eşitliğin sol tarafı net taşınım akısını, sağ tarafı ise net difüzyon akısını ve hacimdeki kaynağını ifade etmektedir. Ardından ayrıklaştırılmış ifadeler bu denklem aracılığıyla elde edilir. Eğer konu bir boyutlu olarak ele alınırsa, eşitliğin kontrol hacmi üzerinde integre edilmesi ve diverjans teoreminin de uygulanması ile denklem aşağıdaki forma dönüşür [15]:

$$\int_A n(\rho u \Phi) dA = \int_A n \left(\gamma \frac{d\Phi}{dx} \right) dA + \int_{CV} f_\Phi dV \quad (2.35)$$



Şekil 2.24: P noktası için bir boyutlu hacmin sonlu hacimler yöntemine göre gösterimi [28].

Tek boyutlu kontrol hacmi gösterimi Şekil 2.24'te yapılmıştır. Kontrol hacmi üzerinde integre edilmiş denklemden yola çıkarak ayrıklaştırma işlemi (2.36) gibi gösterilebilir:

$$(\rho u A \Phi)_{i+\frac{1}{2}} - (\rho u A \Phi)_{i-\frac{1}{2}} = \left(\gamma A \frac{\partial \phi}{\partial k} \right)_{i+\frac{1}{2}} - \left(\gamma A \frac{\partial \phi}{\partial k} \right)_{i-\frac{1}{2}} + f \Delta V \quad (2.36)$$

$A_{i+\frac{1}{2}} = A_{i-\frac{1}{2}} = A$ olarak varsayılp, $\frac{\partial \phi}{\partial k}$ için merkezi fark yaklaşımı kullanılırsa ayrıklaştırılmış denklem aşağıdaki forma gelir:

$$(\rho u \Phi)_{i+\frac{1}{2}} - (\rho u \Phi)_{i-\frac{1}{2}} = \frac{\gamma}{\Delta x} (\phi_{i+1} - \phi_i) - \frac{\gamma}{\Delta x} (\phi_i - \phi_{i-1}) + f_\phi \quad (2.37)$$

Çözüm ağı sınırındaki değerler için (2.38) ve (2.39) denklemlerindeki gibi interpolasyon kullanılabilir:

$$(\Phi)_{i+\frac{1}{2}} = \frac{\phi_i + \phi_{i+1}}{2} \quad (2.38)$$

$$(\Phi)_{i-\frac{1}{2}} = \frac{\phi_{i-1} + \phi_i}{2} \quad (2.39)$$

Bu interpolasyon değerleri ayrıklaştırılmış denklemde (2.37) yerine yazıldığında eşitlik aşağıdaki hale gelir:

$$\begin{aligned} & \frac{\gamma}{\Delta x} \left(2 - \rho \left(\frac{u_{i-1/2} + u_{i+1/2}}{2} \right) \right) \phi_i \\ &= \left(\frac{\gamma}{\Delta x} + \frac{\rho u_{i-1/2}}{2} \right) \phi_{i-1} + \left(\frac{\gamma}{\Delta x} - \frac{\rho u_{i+1/2}}{2} \right) \phi_{i+1} + f_\phi \end{aligned} \quad (2.40)$$

Bunun dışında, 2 ve 3 boyutlu problemlerde ayrıklaştırılmış denklemler yine tek boyutlu koşullara benzer şekilde sürdürülebilir.

2.2.3.2. Denklemlerin sayısal çözümleri

Denklemlerin sayısal çözümleri için bu bölümde, PISO ve SIMPLE algoritmaları anlatılacaktır. Genelleştirilmiş transport denklemlerinin çözümü için genel prosedür aşağıda sıralanmıştır [15]:

1. Geometrinin tanımlanması
2. Sayısal çözüm hacminin kontrol hacimlerine bölünmesi
3. Denklemin her kontrol hacmi için integre edilmesi
4. Çözüm matrisinin oluşturulması
5. Her zaman adımı için işlemlerin tekrarı (opsiyonel)

Navier-Stokes denklemlerinin vektörel notasyonda gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$\nabla \vec{u} = 0 \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} u_x) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u_x \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} u_y) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 u_y \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} u_z) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 u_z \end{aligned} \quad (2.42)$$

Belirtilen momentum eşitliği, bir kaynak teriminden ve difüzyon terimlerinden oluşmaktadır.

Denklemlerin çözümünde karşılaşılan ana problemler:

1. Denklemlerin lineer olmaması, u_x 'i hesaplamak için u terminin de bilinmesinin gerekmesi
2. Kaynak teriminin içeriğinde, p (basınç) bilinmeyen teriminin olması

Navier-Stokes denklemlerini ifade eden yukarıdaki dört eşitliğin hepsi hız teriminin tüm eksenlerdeki bileşenlerini içermekte olup, ilk denklem dışında son üç denklem p (basınç) ifadesini içermektedir. Hızı belirleyebilmek için basıncı bilmemiz gerektiği gibi, basıncı bilmek için de hızı bilmemiz gerekir. Çözümü elde edebilmek için bu iki terimden birine uygun bir değer öngörülüp diğer terim buna bağlı olarak hesaplanmalı, sonrasında bu diğer terim için de başa dönüp bir düzeltme yapılmalıdır. Örneğin hesaplamalara basınç terimi için bir tahmin yaparak başlarsak, hız terimi için yaklaşık bir değer buluruz. Ardından bu tahmini hız değeri ile basıncı hesaplar ve işlemleri bu doğrultuda yürütebiliriz [15].

Bu işlemleri yapabilmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde iki farklı yöntem bulunmaktadır. Bu iki yöntemden birincisi zamana bağlı çözümler için kullanılmakta olup PISO algoritması olarak adlandırılır, ikincisi ise zamandan bağımsız çözümler için kullanılır ve SIMPLE olarak bilinmektedir.

Zamana bağlı çözümler için (2.42) denklemi uygulandığında, p ve u terimleri biliniyorsa PISO algoritması kullanılarak u_x terminin hesaplaması yapılabilir. Basınç değerini hesaplamak için (2.42) ve (2.41) denklemlerine başvurulur.

Akı (hız) için gösterim aşağıdaki gibidir:

$$\nabla \cdot \left[\frac{1}{A} \nabla p \right] = \text{akı terimi} \quad (2.43)$$

(2.43) denkleminde gösterilen akı teriminin süreklilik denklemini (2.41) sağlıyor olması gerekmektedir.

PISO algoritmasının adımları dört madde halinde aşağıda sıralanmıştır:

1. Basınç ve hız terimlerinin tahmin edilmesi, önceki zaman adımından elde edilen veriler, sonraki zaman adımlarında işleme dahil edilir.
2. Üç kordinattaki u_x , u_y , u_z değerlerini hesaplamak için momentum denklemlerine (2.42) başvurulur.
3. P terimini elde etmek için basınç denklemi çözülür.
4. Akı değeri süreklilik denklemini sağlamak için düzeltilir.

İhtiyaç duyulması durumunda 3. ve 4. aşamalar yinelenir. Sonuç olarak yukarıda belirtilen maddeler, çözümü bir zaman adımı ilerletir. Ardından bu dört madde, bir sonraki zaman adımı için yinelenir.

Yukarıda bahsedildiği gibi zamandan bağımsız problemleri çözebilmek için SIMPLE algoritması aracılığıyla çözümleme yapılır. SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) teriminin kısaltması ‘basınç bağlantılı denklemler için yarı-kapalı yöntem’ olarak ifade edilir.

Bu yöntem ilk kez Patankar ve Spalding tarafından ortaya çıkarılmıştır [31]. Çözüm adımları tahmini basınç ile başlayıp sonrasında düzeltilmesine dayalı olarak ilerler.

Navier-Stokes denklemleri zamandan bağımsız çözümler için aşağıdaki gibidir:

$$\nabla \vec{u} = 0 \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\vec{u} u_x) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u_x \\ \nabla \cdot (\vec{u} u_y) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 u_y \end{aligned} \quad (2.45)$$

$$\nabla \cdot (\vec{u}u_z) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 u_z$$

Yukarıda da vurgulandığı gibi Navier-Stokes denklemlerinde, hız ve basınç bilinmeyenlerinden doğan bazı çözüm problemleri ile karşılaşılır.

Bu problemleri çözebilmek için SIMPLE algoritmasında, p^* ve $\vec{u}^*$ değerleri tahmini olarak belirlenir ve bunları düzeltmek için p' ve $\vec{u}'$ terimleri belirlenir.

Bu algoritmada takip edilecek adımlar aşağıda dört madde halinde verilmiştir:

1. İlk olarak p^* basınç terimi tayin edilir.
2. Belirlenen p^* değeri ve (2.45) denklemi aracılığıyla bir $\vec{u}^*$ hız değeri tayin edilir.
3. Basıncı düzeltmek üzere p' değeri bulunur.

$$p^{**} = p^* + p' \quad (2.46)$$

4. Akı değeri süreklilik denklemini sağlamak için düzeltilir.

Hız denklemleri lineer olmadığından dolayı, yukarıdaki adımlar geçerli bir veri elde edilene kadar tekrarlanarak (iterasyon) p ve $\vec{u}$ değerlerine ulaşılır.

Fakat diğer bir taraftan bakıldığında, her itereasyonda kullanılan yeni sonuçlar p^{**} ve $\vec{u}^{**}$ değerleri sebebi ile çözüm kararsız bir hale dönüşebilir. Bu problemi giderebilmek için literatürde alt gevşeme (underrelaxation) olarak adlandırılan bir yöntem uygulanır.

Her bir tekrarlamada yenilenen basınç değeri için;

$$p^{n+1} = \alpha p^{**} + (1 - \alpha)p^n \quad (2.47)$$

Bu formülde α ifadesi underrelaxation parametresini karşılamaktadır. Yapılan iterasyonun her tekrarında, hesaplamaadaki hata oranı gittikçe azalmaktadır.

Çözümleme yapılırken aynı zamanda sınır koşullarının da belirlenmesi gerekir. Hesaplamalara için, akışkanın içindeki her noktada başlangıç koşullarındaki p ve $\vec{u}$ 'nin değerleri belirlenmiş olmalıdır. Genellikle akışkan problemleri parabolik ya da hiperbolik özelliktedir. Dolayısıyla akışkan bölge için belirlenmiş başlangıç şartları, t anındaki bir çözüm için gereklilik göstermektedir. Problem çözümüne başlarken bu

başlangıç koşullarının belirlenmiş olması gerekir, yani p ve u terimleri için bir değer verilmelidir. İlk durumda tüm hacim için u 'nun sıfır olarak alınması örnek verilebilir.

Normalde zamandan bağımsız viskoz akımlar eliptik karakterde olur ve hesaplamalar için başlangıç şartlarına gerek yoktur. Fakat SIMPLE algoritmasında durum böyle olmayıp başlangıç değerlerinin belirlenmesi gerektiği gibi, belirlenen değerlerin de doğru olması sonucun yakınsayıp yakınsamamasına etki eder.

Bunun yanında bir de sınır koşulları belirlenmelidir. Çünkü sınır koşulları birinci dereceden hesaplamasının sonucunu oluşturmaktadır. Duvar (wall), giriş (inlet) ve çıkış (outlet) olmak üzere tanımlanan 3 farklı sınır koşulu vardır.

Bu sınır koşulları laminar akış durumu için aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- Duvar: Duvar sınır koşulu, bu koşulda duvar yüzeyindeki akış hızı sıfır olarak kabul edilir.
- Giriş: Giriş sınır koşulu, akışkan giriş hızı - u tanımlanır.
- Çıkış: Çıkış sınır koşulu, akışkan çıkış hızı - u tanımlanır.

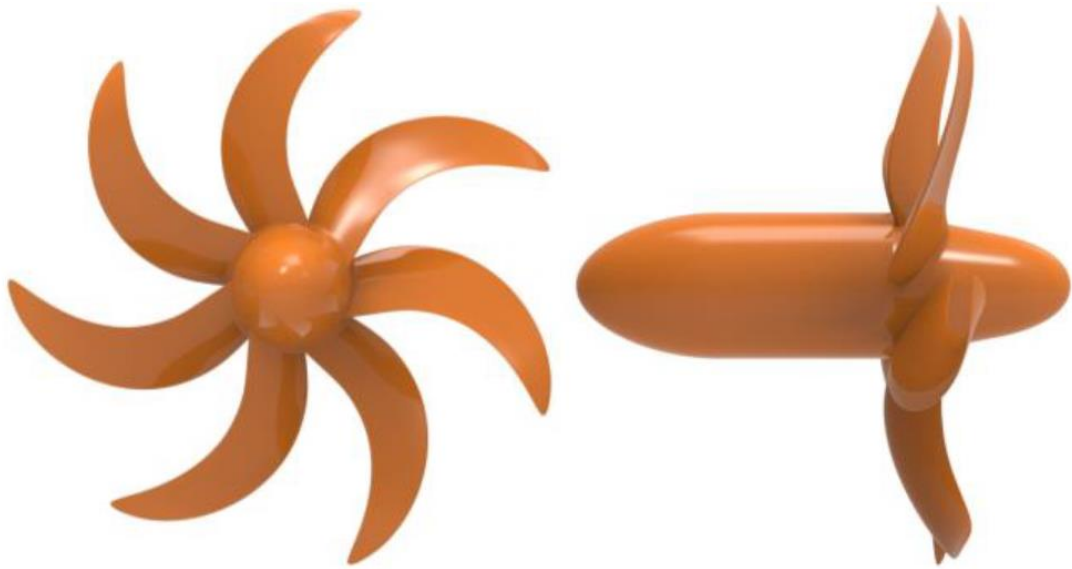
Tekrar vurgulamak gerekir ki sınır koşullarının doğru bir şekilde belirlenmesi çözümün doğru sonuca ulaşabilmesi için çok önemli bir rol oynamaktadır.

3. DENİZALTI VE PERVANE GEOMETRİLERİ

INSEAN E-1619 pervanesinin detayları ve DARPA Suboff jenerik denizaltısının geometrisi bu bölümde anlatılmıştır.

3.1 INSEAN E1619 Denizaltı Pervanesi

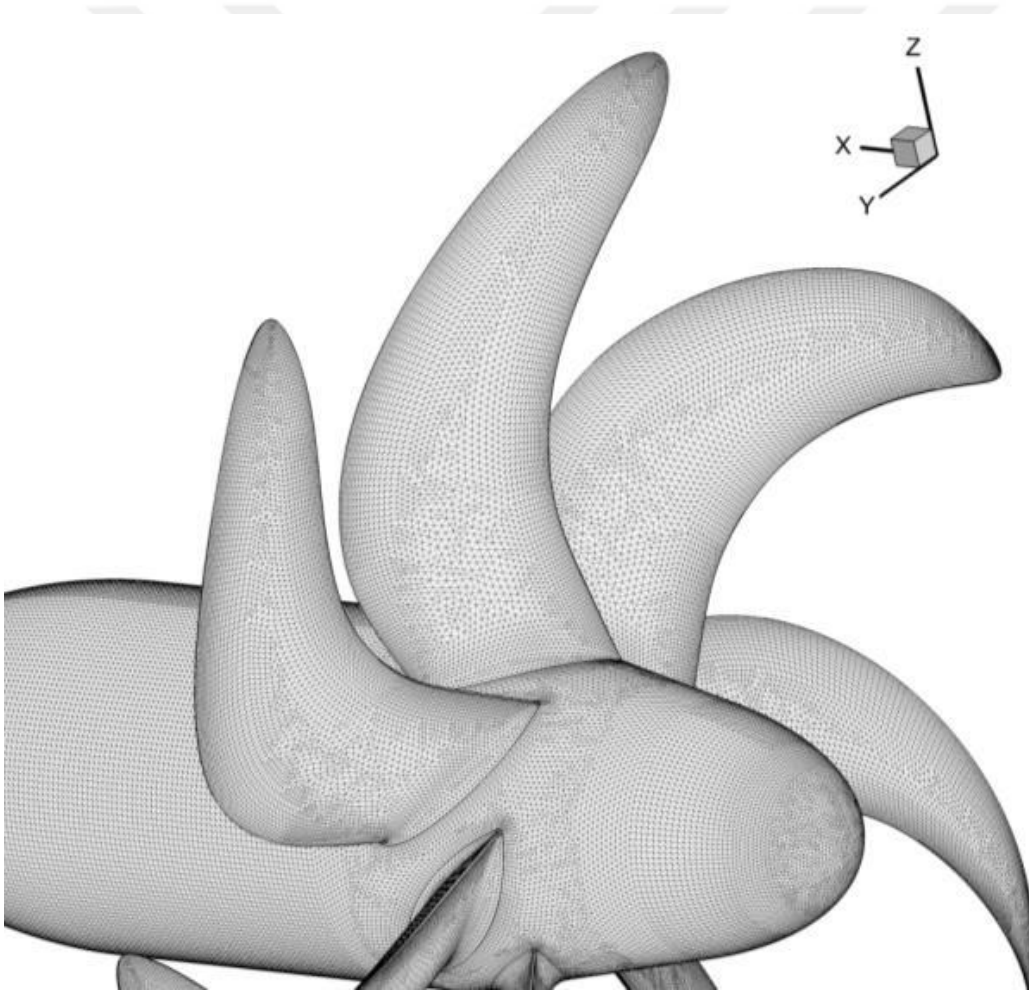
Çalışmada kullanılan pervane INSEAN E1619 jenerik denizaltı pervanesidir. INSEAN E1619 yedi kanatlı, yüksek çalıklı bir denizaltı pervanesidir. Pervanenin yüksüz kanat tasarımı ve ana özellikleri çizelge 3.1’de gösterilmiştir [14]. Bu pervane kendinden tahrikli DARPA Suboff AFF8 koşullarında ve dört kadrant olarak analiz edilmiştir. Açık su deneyleri INSEAN çekme tankında, iz hızı ölçümleri ise Laser Doppler Velocimetry (LDV) sistemi ile INSEAN’ın sirkülasyon kanalında yapılmıştır. Sonuçlar Di Felice ve diğerleri [14] tarafından sunulmuştur. E1619 denizaltı pervanesinin 3 boyutlu görüntüleri şekil 3.1’de gösterilmiştir. Şekil 3.2’de ise çalışma için yapılan detaylı hassas çözüm ağını gösterilmiştir.



Şekil 3.1: INSEAN E1619 pervanesinin 3D görüntüleri.

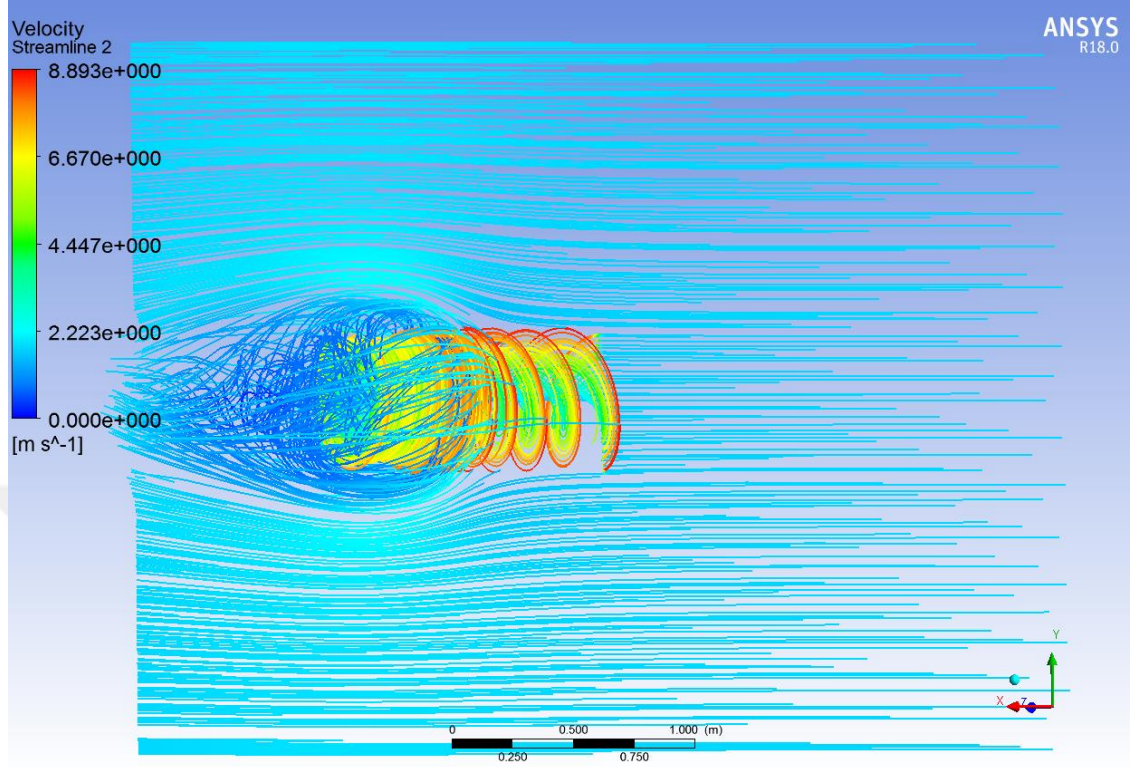
Çizelge 3.1: INSEAN E1619 denizaltı pervanesinin ana özellikleri [14].

Pervane Tipi	INSEAN E1619
İleri Hız	1.68 m/s
Devir	280 RPM
Çap	0.485 m
Kanat Sayısı	7
AE/AO	0.608
Hub/Çap Oranı	0.226
Hatve/Çap Oranı, $0.7 R'de P/D$	1.15



Şekil 3.2: INSEAN E1619 için ayrıntılı hassas çözüm ağı (fine mesh).

Şekil 3.2’de görülen çözüm ağı akışkanlar hesaplamalarında hıza göre incelendiğinde ise Şekil 3.3’te görüldüğü gibi akım hatları elde edilmektedir.



Şekil 3.3: INSEAN E1619 hassas çözüm ağı analizinde oluşan akım hatları.

3.2 DARPA Suboff Denizaltısı

DARPA Suboff AFF8, 4.36 boyunda, 1.02 m baş kısım ve 2.23 m orta kısım, 1.11 m kış kısımından oluşan bir denizaltı model geometrisidir. Maksimum çapı 0.508 m olan silindirik bir kesite sahiptir. AFF8, geminin başından $x = 0.92$ m ile başlayıp $x = 1.29$ m’de biten ve gövdenin üst ölü noktasında bulunan bir yelkene sahiptir. Bu yelken artı biçimli bir dümene sahip olup, dümenler ve su kanadı baş kısmın $x = 4$ m uzaklığında yer alır. DARPA Suboff AFF8’in gövde ve takıntı düzenlemesi Şekil 3.4’te ve ana özellikleri Çizelge 3.2 [29] gösterilmiştir.

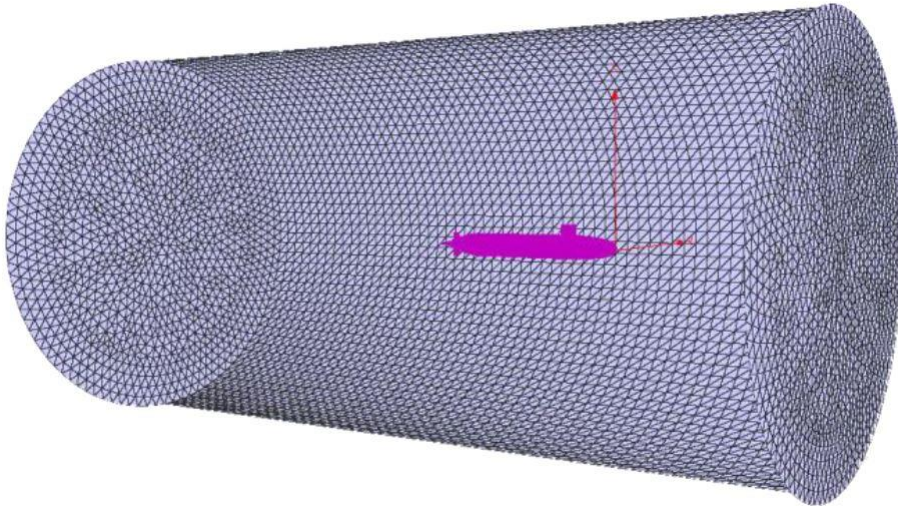


Şekil 3.4: E1619 pervanesinin DARPA Suboff AFF8 ile gösterimi [29].

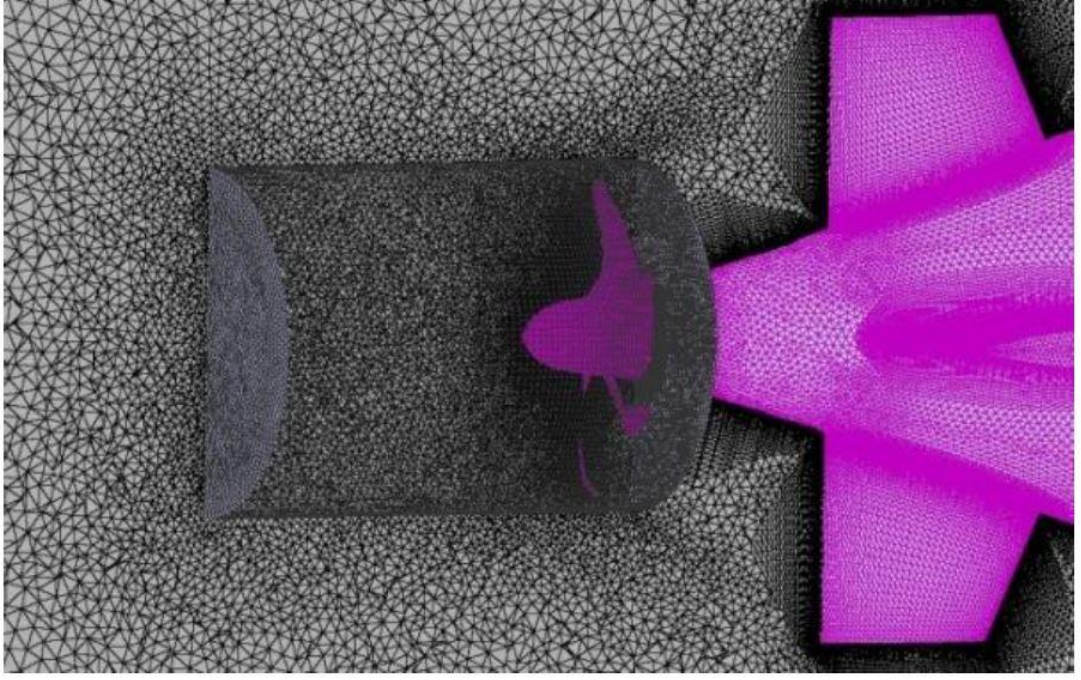
Çizelge 3.2: DARPA Suboff AFF8 modelinin ana özellikleri [29].

Özellikler	Sembol	Boyut
Tam Boy	LOA	4.356 m
Dikmelerarası Uzunluk	LPP	4.261 m
Maksimum Tekne Yarıçapı	RMAX	0.254 m
Sephiye Merkezi (kıçtan)	FB	0.4621 LOA
Deplasman Hacmi	∇	0.718 m ³
Islak Yüzey Alanı	SWA	6.338 m ²
Pervane Çapı	P _D	0.262 m

Şekil 3.5'te DARPA Suboff'un çözüm ağı belirtilmektedir. Analiz için girilmesi gereken giriş, çıkış ve duvar sınır koşullarının Şekil 3.5'te modelin çevresindeki görünümüdür. Denizaltı çözüm ağının yanında pervanenin de çözüm ağını incelemek gerekir. Bunu ise Şekil 3.6'teki görmek mümkündür.

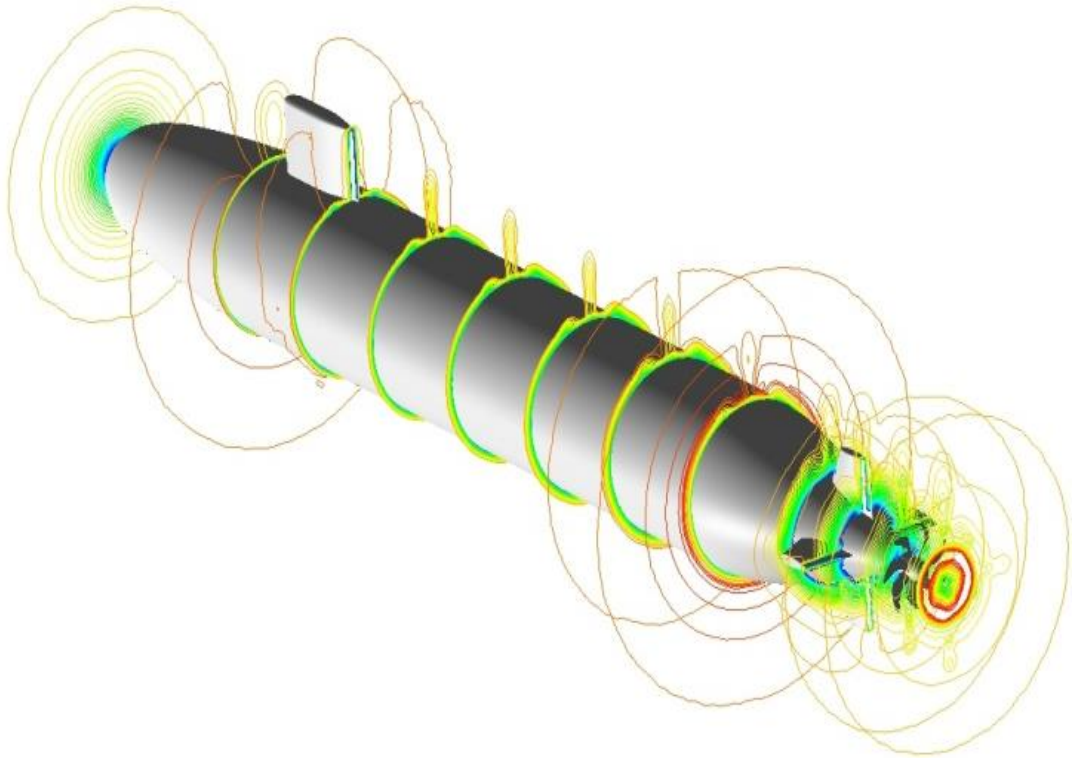


Şekil 3.5: DARPA Suboff'un etki alanı (domain) hesabı.



Şekil 3.6: DARPA Suboff'un kesitin çözüm ağı görünümü.

DARPA Suboff'un Şekil 3.6'da görülen hassas çözüm ağı analizi sonrasında ise Şekil 3.7'da görülen akım hatları elde edilmiştir. Ayrıca akım hatları farklı kesitlerde farklı hız değerleri almaktadır.



Şekil 3.7: DARPA Suboff'a farklı kesitlerde etkiyen hız değerleri



4. YÖNTEMLER

Bu bölümde pervane hidrodinamik performansının hesaplanması için yöntemler incelenmiştir. Ayrıca sevk noktasının belirlenmesi ve dört kadranlı pervane verilerinin nasıl hazırlanacağı araştırılmıştır.

4.1 Sayısal Yöntemler ve Akış Çözücü

Deney sonuçlarının kıyaslanacağı analizler yapılırken bir takım sınır koşullar kabul edilmiştir. Bu sınır koşulları, türbülans modellemesinde duvarla sınırlandırılmış sınır tabakası akışlarında iyi performans gösterdiği için, SST k- ω türbülans olarak seçilmiştir [6].

FLUENT, hücre merkezli sonlu hacim yöntemini kullanmaktadır. RANS formülasyonu mutlak hız seçimi ile kullanılır. Süreksiz olan çözüm, ikinci dereceden kapalı basınç temelli bir çözücü ile gerçekleştirilir. Hız ve basınç SIMPLE algoritması aracılığı ile teori kısmında da açıklandığı gibi birleştirilir. Gradyan için Green Gauss Node Based; basınç ayrıklaşması için Pressure Staggering seçeneği (PRESTO) kullanılır. Ayrıca momentum, türbülans kinetik enerji ve spesifik enerji kaybı oranı hesaplamaları için QUICK şeması (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics) kullanılmıştır.

4.2 Sevk Koşullarının Belirlenmesi

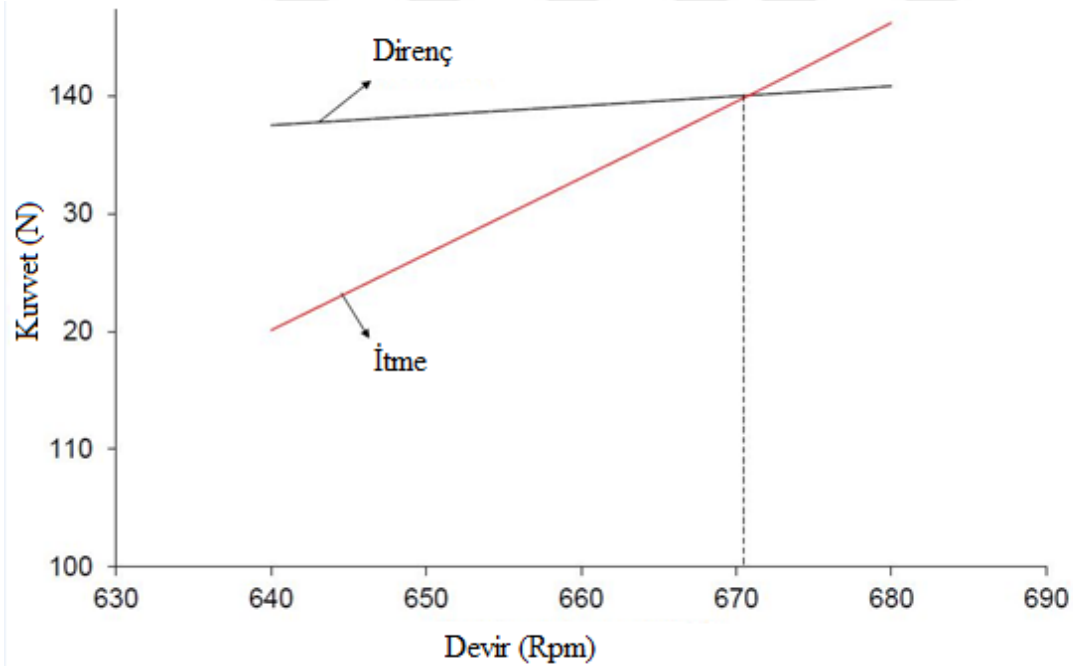
İleri ve geri hızların sevk noktaları sayısal olarak incelenmiştir. İleri hız durumu için, maksimum hız 3.3436 m/s olarak seçilmiş ve sayısal sevk noktası araştırması için başlangıç değerleri, E1619 pervanesinin açık su diyagramı kullanılarak hesaplanmıştır. Geri yönlü (tornistan) hız durumu için, DARPA Suboff'un 104.55 m uzunluğunda, 7 knot hıza sahip bir denizaltının 1/24 ölçekli bir modeli olduğu varsayılır. Bu ölçeğe göre, 4.356 m uzunluğa, 0.735 m/s hıza sahip Froude sayısına

göre ölçeklendirilmiş bir model elde edilir. Ölçeklendirme ile ilgili değerler birim dönüşümleri de yapılarak Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

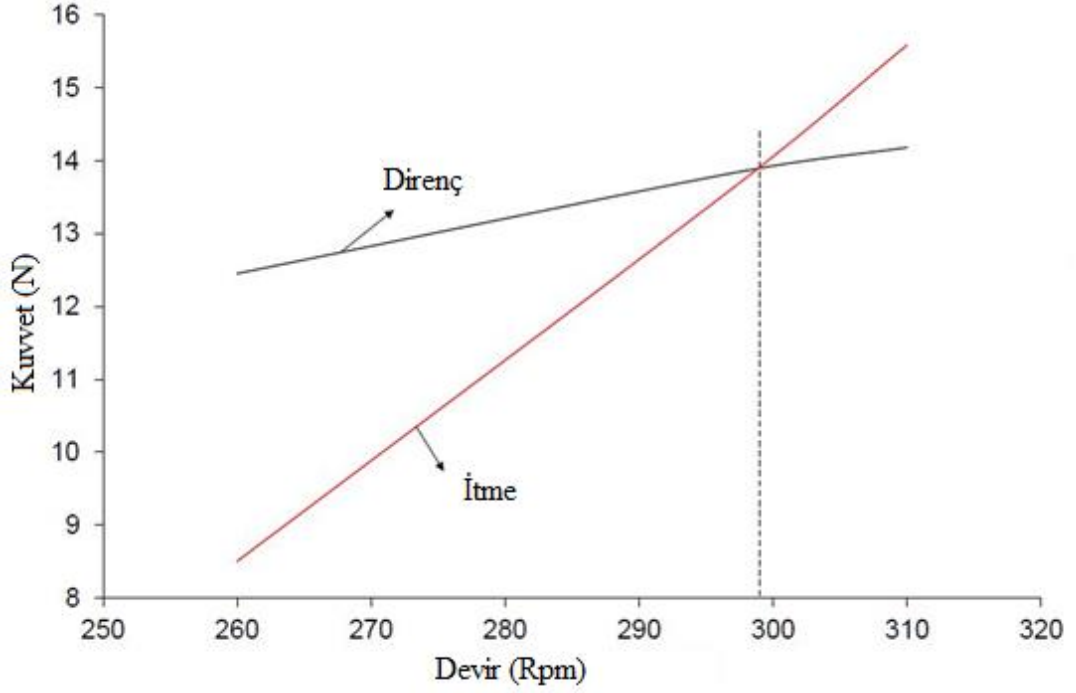
Başlangıçta, direnç ve açık su verileri kullanılarak sevk noktası için rastgele bir nokta seçilir. Sonrasında sayısal inceleme için, devre göre daha büyük ve daha küçük bir değer seçilmiştir. Sonuçlar, ileriye yönelik hız için Şekil 4.1’de gösterildiği gibi çizilmekte ve tornistan için Şekil 4.2’deki gibi grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu gösterimlerde direnç ve itme çizgilerinin kesişimi ilk aranan noktayı verir. [4]

Çizelge 4.1: Tam ölçekli ve model denizaltının uzunlukları ve hızları.

	Model		Tam Ölçekli	
İleri Hız	6.5 kn	3.344 m/s	31.84 kn	16.38 m/s
Geri yönlü Hız	1.429 kn	0.735 m/s	7 kn	3.60 m/s
Tam Boy	14.292 ft	4.356 m	343.0 ft	104.55 m



Şekil 4.1: İleri yönlü hız için sevk noktasının yakınsama grafiği [4].



Şekil 4.2: Geri yönlü hız için sevk noktasının yakınsama grafiği [4].

4.3 Dört Kadran İçin Veri Hazırlama

DARPA Suboff ve E1619 denizaltı pervanesi montajı yaygın olarak birlikte yapılır, E1619 pervanesi için, Suboff AFF-8 geometrisini hareket ettirdiğinden 4 kadranlı düzenek ayarlanmıştır. β değerlerinin hesaplanması için, ilerleme hızı ve dönme hızlarının seçiminde farklı yöntemler araştırılmış, sonuç olarak aşağıdaki temel koşulları kapsayacak şekilde değerlerin seçimine karar verilmiştir.

- Sevk noktasında (SPP) maksimum ileri yönlü hız (V_{fwdmax})
- Sevk noktasında (SPP) maksimum geri yönlü hız (V_{bckmax})
- Tornistan giderken ani durma manevrası
- İleri giderken ani durma manevra

Önceki bölümde açıklanan yöntemle, baş ve kış için sevk noktaları, pervane dönüş hızı ve akış hızları için referans noktaları olarak ayarlanır. Pervanenin tasarım dışı koşullarını saptamak için ilerleme katsayısı J yerine hidrodinamik adım açısı β tanımlanmıştır.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{V_A}{0.7\pi nD} \right) \quad (4.1)$$

Akış hızının negatif olduğu durumlarda, pervanenin akışa baktığı için akış hızının ilerleme hızına eşit olduğu kabul edilir. Öte yandan, pozitif akışlar için, DARPA Suboff modelinin iz katsayısı w , açık su eğrisi ve sevk noktası verisi kullanılarak değerlendirilir ve V_A , aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$V_A = V(1 - w) \quad (4.2)$$

Birinci kadranda için sevk noktası β_{Q1} 'e gelene kadar devir sabit kalır, ileri hız lineer olarak artar. β_{Q1} 'e gelindiğinde ise ileri yönlü hız sabitlenir ve devir azalmaya başlar. Bu aralık beta'nın 90° , hızın ise 0 olduğu noktaya kadar devam eder.

İkinci kadranda, tornistan giderken ani durma manevrası meydana geldiği anda β_{Q2} 'ye kadar sabit bir akış hızı korunur. Bu sırada devir β_{Q2} 'ye kadar azalışını sürdürür. Ardından devir beta 180° olana kadar sabit, ileri yönlü hız da azalarak 0'a düşer.

Üçüncü kadranda, sevk noktası β_{Q3} 'e gelene kadar akış hızı azalmakta, devir ise sabit olmaktadır. β_{Q3} 'ten sonra β 270° 'ye gelene kadar akış hızı sabitken pervane devri azalarak sıfırlanır.

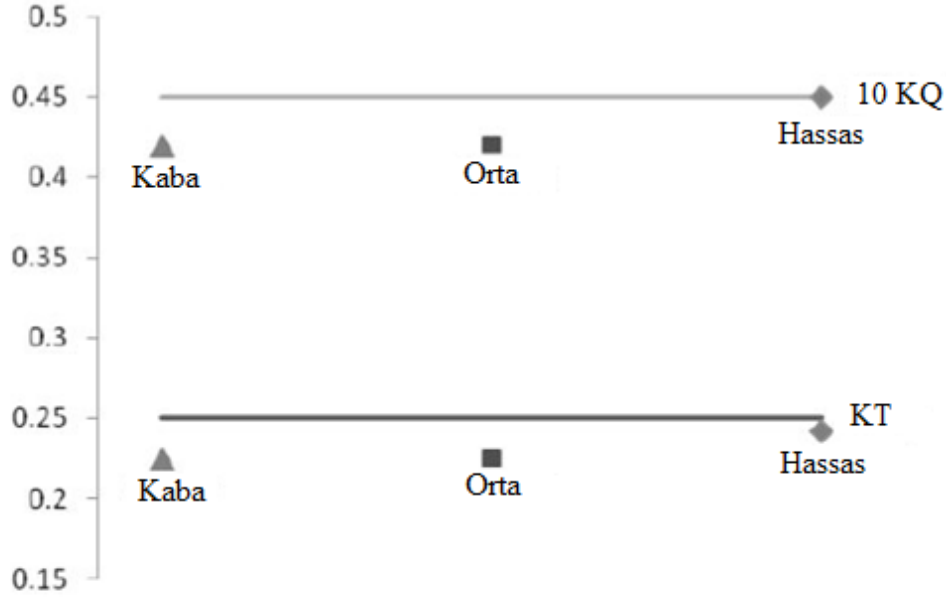
Dördüncü kadranda, ileri giderken ani durma manevrasının meydana geldiği yerden β_{Q4} olana kadar artan bir devir ve sabit bir akış hızı muhafaza edilir. β_{Q4} 'ten sonra β 360° 'ye gelene kadar devir sabitken ve akış hızı azalarak sıfırlanır.

4.4 Yöntemlerin Doğrulanması

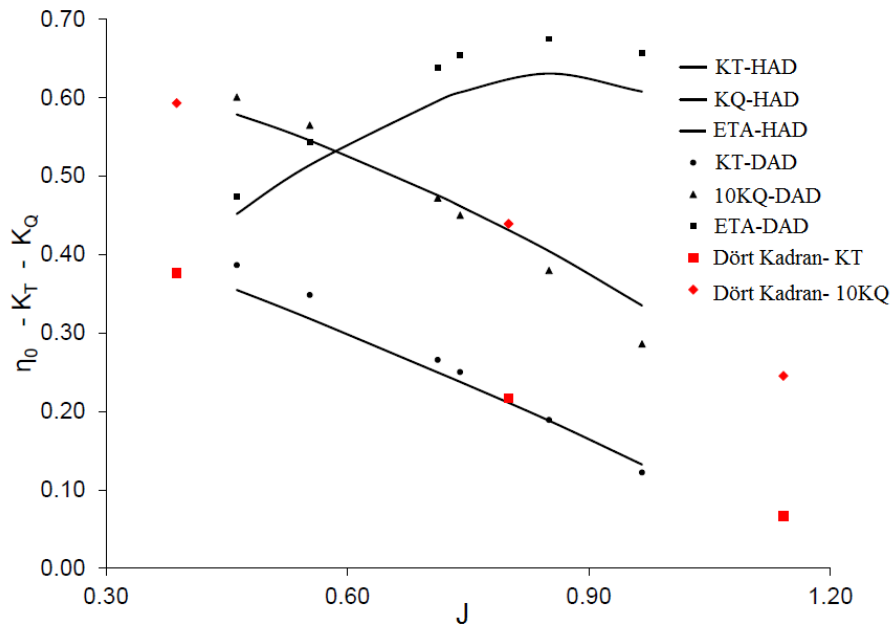
4.4.1 Pervanenin açık su karakteristiğinin doğrulanması

E1619 pervanesinin açık su performans hesaplamaları $J = 0.74$ ve $J = 0.85$ 'de gerçekleştirilmiştir. Doğrulama durumuna benzer şekilde silindirik bir hesaplama alanı oluşturulmuştur. Çalışma 6.386.638, 8.065.679 ve 10.513.205 hücre kullanılarak kaba-orta-hassas büyüklüklerdeki çözüm ağları ile, $y^+ \approx 50$ olan boyutsuz duvar mesafesi değerlerinde gerçekleştirilmiştir[14]. Genellikle y^+ değeri 1 ile 300 arasında seçilmektedir. Bu hesaplamalarda 50 civarında seçilmesinin nedeni 1'e yaklaştıkça artan çözüm ağı sayısı ile bilgiyarların işlem yapmakta zorluk çekmesi, 300'e yaklaşan çözüm ağına da istenilen hassaslıkta sonuç alınamamasıdır. Sonuç olarak optimum değer 50 olarak alınmıştır.

$J = 0.74$ 'de itme ve tork katsayılarının deneysel verileriyle, yukarıda bahsedilen çözüm ağı değerleri karşılaştırılmış ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu karşılaştırmanın sonucundaki en kaba - en hassas aralığındaki çözüm ağı değişiminde oluşan yakınsama şekilden de açıkça görülebilir.



Şekil 4.3: HAD değerlerinin yakınsaması ve hassas çözüm ağından kaba çözüm ağına deney sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.4: E1619 için açık su karakteristiği hesaplamasının ve Di Felice vd. ile deney sonuçlarının karşılaştırılması [14].

Deneyler esnasında, kanat kesiti 0.7 R, Reynolds sayısı da yaklaşık 2.3×10^5 alınmıştır [14].

Hassas çözüm ağı sonuçları Şekil 4.4'da sunulmuştur, bu da RANS hesaplamaları verilen ilerleme katsayısında itme, tork ve açık su verimlilik değerlerini çok iyi yakaladığını göstermektedir.

4.4.2. Pervane sevk noktasının deneysel olarak bulunması

Tezin amacına uygun olarak DARPA Suboff denizaltısının direnç ve sevk deneyleri için İstanbul Teknik Üniversitesi Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.2'de detaylandırılan bu düzenek sayesinde laboratuvar ortamında direnç ve sevk deneyleri ile iz datasının alınması mümkün kılınmıştır.

DARPA Suboff denizaltısı orijinal boyutlara göre yapılmış, E1619 model pervanesi ise literatürdeki çalışmalara dayanarak belirli bir ölçekte boyutlandırılmıştır. Deneyler denizaltının içine yerleştirilen bir sevk sistemi aracılığı ile, su seviyesinden 1/3L (m) derinlikte çekilerek gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2: Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nın havuz boyutları.

Havuz Boyutları	
Uzunluk	160 m
Genişlik	6 m
Derinlik	3.4 m
Maksimum araba hızı	6 m/s
Yapılan deney türleri	Sevk,Direnç

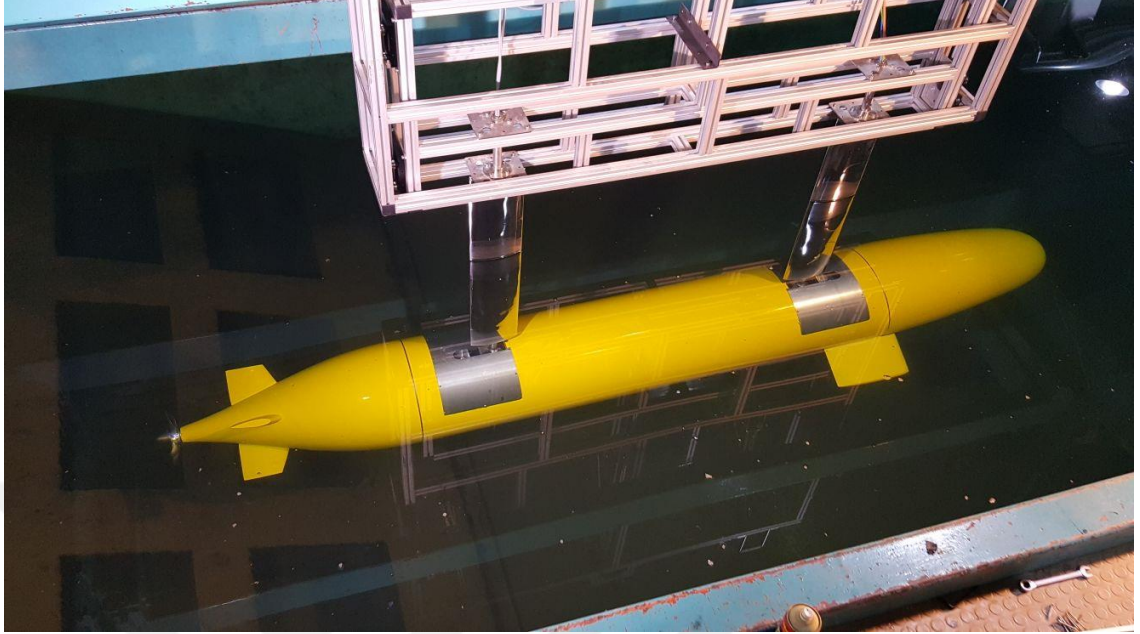
4.2.3 Deney düzeneğinin tasarımı

Deney düzeneği DARPA Suboff denizaltısı ve INSEAN E1619 pervanesinin birlikte çalıştırılabilmesine uygun olarak tasarlanmıştır. Bu model araçlarının boyutları ise çizelge 4.3'te belirtildiği gibidir.

Çizelge 4.3: Model pervane ve denizaltıya ait boyutları.

Model Denizaltı ve Pervane Boyutları	
Model Boyu	4.356 m
Model Çapı	0.508 m
Yelken Uzunluğu	0.368 m
Yelken Konumu	0.924 m
Dümen Konumları	0°, 90°, 180°, 270°
Pervane Çapı	0.262 m

Denizaltı çekme işlemi Şekil 4.5’ de gösterildiği üzere, denizaltı modeline oturtulan iki NACA profilli payanda ve model deney arabası vasıtası ile yapılmaktadır.



Şekil 4.5: DARPA Suboff denizaltı test düzeneği.

Modelin sevk edilmesi, içine yerleştirilen elektrik motoru sayesinde gerçekleşir. Bu elektrik motoru ile pervane arasındaki şaft üzerine bir dinamometre yerleştirilir ve bu dinamometre aracılığıyla itme ve tork ölçümleri yapılır.

4.2.4 Deneyde kullanılan ekipmanlar

Model pervane

Çapı 150 – 300 mm arasında olan model pervanelerinin üretiminde ITTC tarafınca tanımlanan imalat toleransları aşağıda sıralanmıştır:

- Çap (D) için $\pm 0.10\text{mm}$
- Kanat kalınlığı(t) için $\pm 0.10\text{mm}$
- Kanat genişliği (c) için $\pm 0.20\text{ mm}$
- Her kesitteki hatve oranı (P/D) için $\pm \%0.5$ 'lik bir sapmaya izin verilebilir olarak değerlendirilmiştir.

Pervane imalatı sırasında bu tolerans sınırlarının içinde kalmak için CAD-CAM yazılımları kullanılır. Bu tez çalışması için belirtilen toleranslar dahilinde üretilen

E1619 model pervanesinin çapı 0.262m'dir. Model pervane 5 eksenli bir CNC tezgahında aliminyum hammaddesi kullanılarak üretilmiştir.



şekil 4.6: Pervanenin işleneceği ham kütüğü.



şekil 4.7: Pervanenin CNC'de işlenmesi.

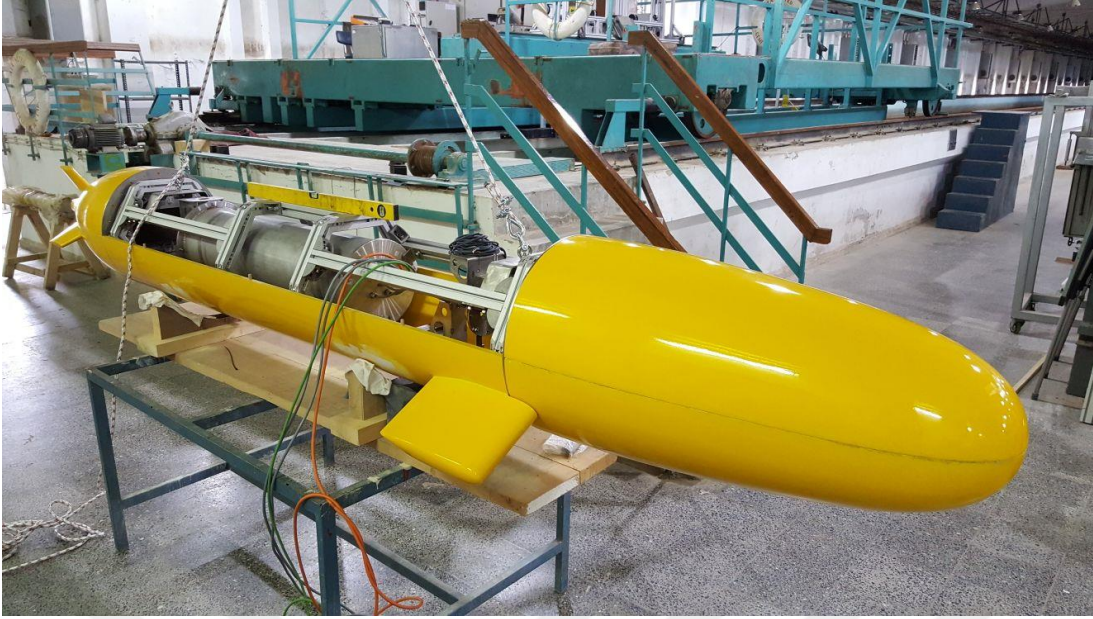


Şekil 4.8: Kompozit destek ve işlenmiş formda pervane.

Pervanenin bilhassa uç kısımları çok ince yapıda olduğundan, üretim aşamasında bir takım zorluklarla karşılaşmıştır. Titreşimden dolayı uç kısımlarda istenmeyen yüzeyler oluşmuştur. Bu sorunu aşabilmek için Şekil 4.8’de görüldüğü gibi pervanenin ön yüzeyi işlendikten sonra sırtı kompozit bir desteğe yaslanarak işlenmeye devam edilmiştir. Böylelikle üretim esnasında gerilmeden dolayı ortaya çıkabilecek kırılma ve diğer olası hataların önüne geçilmiştir.

Denizaltı modeli

Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı’nın işleme atölyesinde bulunan 5 eksenli CNC sayesinde denizaltının yelkeni, dümenleri ve gövdesi Şekil 4.9’da görüldüğü gibi üretilmiştir. Denizaltının yüzey pürüzsüzlüğünü sağlamak için macun ve boya işlemleri yüzeyine uygulanmıştır. Sudan zarar görmesini engellemek içinse laminasyon verniği macun ve boya yapmadan kullanılmıştır.



Şekil 4.9: Denizaltının yelkeni, dümenleri ve gövdesi.

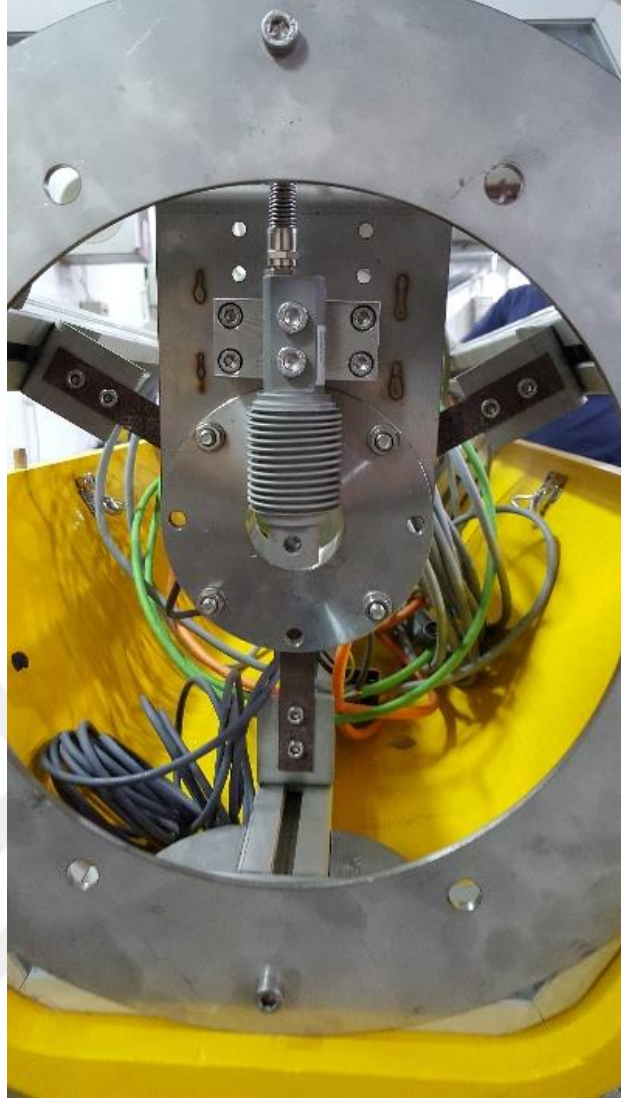
Test ekipmanları

İtme ve moment değerlerini ölçmek için hali hazırda deney laboratuvarında bulunan Kempf&Remmers sevk dinamometresi Şekil 4.10’da görüldüğü gibi denizaltına monte edilmiştir. Deney esnasında dinamometrede oluşan basma ve çekme gerilmeleri ölçülüp Catman Easy programı sayesinde kullanılabilir hale getirilir.



Şekil 4.10: Sevk dinamometresi.

Bu ölçüm direnç içinse şekil 4.11’de görüldüğü gibi ESİT yük hücresiyle sağlanır. Siemens’in Simotion modülü kullanılarak elektrik motorunun çalışması sağlanmıştır. Ayrıca Simotion ile pervane devrinin kontrolü ve motor sıcaklığı hazırlanan arayüz üzerinden takip edilmiştir.



Şekil 4. 11: Yük hücresi (Loadcell).



5. HESAPLAMA PROSEDÜRLERİ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Hesaplama Yöntemleri

Hidrodinamik adım açısı β 'nın analiz yapılabilir sonuçlar aralığında bulunması için uygun hız ve devir değerleriyle işlem yapılmalıdır. Dört kadran grafiği çizebilmek için β değerleri belirlenir ve Fourier katsayıları hesaplanır. Bu nedenle β 'nın hangi yöntem kullanılarak hesaplanacağı çok önemlidir. Tezin yenilikçi yanı ise (β) değerinin hesaplanması sırasında izlenen yöntemdedir. Geliştirilen yöntem ve geliştirilirken denenen diğer yöntemler 3 başlık altında incelenmiştir.

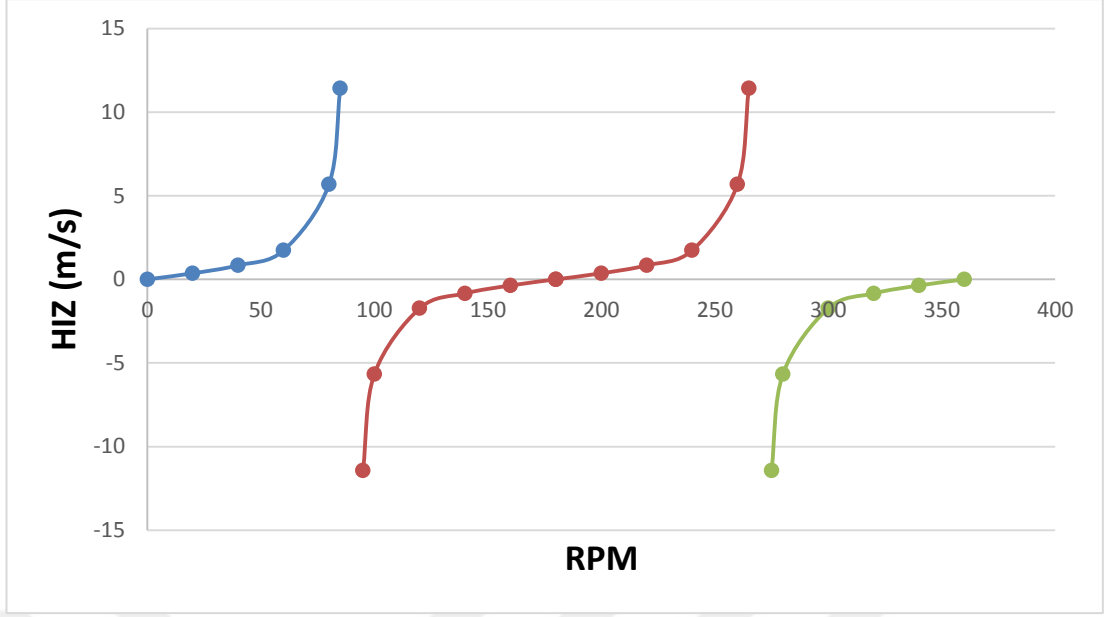
5.1.1 Sabit devirde hesaplanan beta (β) değerleri

İlk olarak $J=0.74$ için hesaplanan sabit devir değerine göre Çizelge 5.1'de gösterilen β değerleri bulunmuştur. 0-360 derece arasında beta değerlerinden yararlanarak hızlar elde edilmiştir. Sabit devirde elde edilen hızlardan bazıları çok büyük olduğundan test düzeneğinde ölçülmesi mümkün olmayacağı görülmüştür.

Çizelge 5.1: β açlarına göre sabit devirde elde edilen hızlar.

Derece	Radyan	Tan(β)	Devir (rps)	Va(m/s)
0	0	0	4,681	0
20	0,349066	0,363970234	4,681	1,817152362
40	0,698132	0,839099631	4,681	4,189276301
60	1,047198	1,732050808	4,681	8,647411023
80	1,396263	5,67128182	4,681	28,31435701
85	1,48353	11,4300523	4,681	57,06550861
90	1,570796	1,63246E+16	4,681	8,15017E+16
95	1,658063	-11,4300523	-4,681	57,06550861
100	1,745329	-5,67128182	-4,681	28,31435701
120	2,094395	-1,732050808	-4,681	8,647411023
140	2,443461	-0,839099631	-4,681	4,189276301
160	2,792527	-0,363970234	-4,681	1,817152362
180	3,141593	-1,22515E-16	-4,681	6,11666E-16
200	3,490659	0,363970234	-4,681	-1,817152362
220	3,839724	0,839099631	-4,681	-4,189276301
240	4,18879	1,732050808	-4,681	-8,647411023
260	4,537856	5,67128182	-4,681	-28,31435701
265	4,625123	11,4300523	-4,681	-57,06550861
270	4,712389	5,44152E+15	4,681	2,71672E+16
275	4,799655	-11,4300523	4,681	-57,06550861
280	4,886922	-5,67128182	4,681	-28,31435701
300	5,235988	-1,732050808	4,681	-8,647411023
320	5,585054	-0,839099631	4,681	-4,189276301
340	5,934119	-0,363970234	4,681	-1,817152362
360	6,283185	-2,4503E-16	4,681	-1,22333E-15

Şekil 5.1’de ise açlara göre sabit devirde hesaplanan hızların gösterdiği değişim eğrileri belirtilmektedir. Bu eğrilerden de anlaşılacağı üzere sonsuz hız büyüklüğüne giden değerler bulunmaktadır ve yöntemin kullanılamayacağı daha net görülmektedir.



Şekil 5.1: Açılara göre sabit devirde hesaplanan hızların gösterdiği değişim.

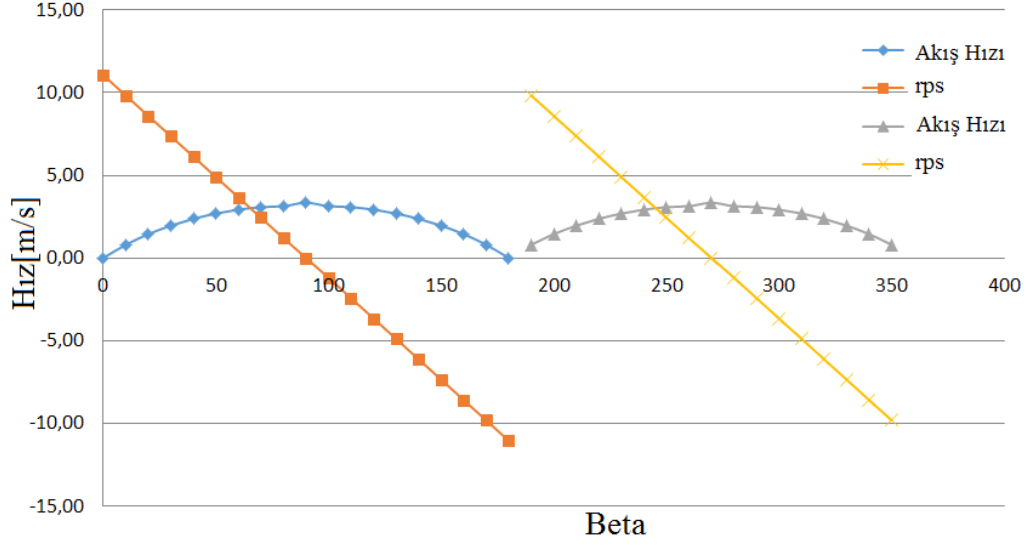
5.1.2 Doğrusal azalan devir ve değişken hıza göre beta(β) değerleri

Yöntemle ilgili farklı bir yol izlemek adına literatür araştırmasından elde edilen bir 4 kadran örneği incelenmiştir. Bu çalışmada hız ve RPM değerlerinde aynı anda değişiklik yapılmıştır. Hesaplamalar sonucu test düzeneğinde ölçüm yapılması mümkün olan Çizelge 5.2’de gösterilen değerler elde edilmiştir. Ancak bu örnekte belirtilen değerler Suboff denizaltısı ile E1619 pervanesinin birlikte çalışması sırasında çıkılan maksimum hızlara çıkmadığı için istenilen aralığı tam olarak sağlayamamıştır. Bu çalışmanın bir temel oluşturmasıyla analizlerin ve deneylerin değişen hız ve RPM değerlerinde yapılması gerektiği anlaşılmıştır.

Çizelge 5.2: Doğrusal azalan devir ve değişken hıza göre örnek 4 kadran verileri.

β (deg)	β (rad)	Hız (m/s)	Devir(rps)	Devir(rpm)	Kadran
İleri yönlü seyreden bir gemiye uyumlu pervane hesaplamaları					
0	0	0,00	6,517	391	I
10	0,174533	0,52	6,417	385	I
20	0,349066	1,02	6,117	367	I
30	0,523599	1,50	5,650	339	I
40	0,698132	1,93	5,000	300	I
50	0,872665	2,29	4,183	251	I
60	1,047198	2,60	3,267	196	I
70	1,22173	2,82	2,233	134	I
80	1,396263	2,96	1,133	68	I
90	1,570796	3,00	0,000	0	I
110	1,919862	2,82	-2,233	-134	II
130	2,268928	2,29	-4,183	-251	II
150	2,617994	1,50	-5,650	-339	II
160	2,792527	1,02	-6,117	-367	II
170	2,96706	0,52	-6,417	-385	II
180	3,141593	0,00	-6,517	-391	II
Tornistan seyreden bir gemiye uyumlu pervane hesaplamaları					
-180	-3,14159	0,00	6,517	391	IV
-160	-2,79253	1,02	6,117	367	IV
-140	-2,44346	1,93	5,000	300	IV
-120	-2,0944	2,60	3,267	196	IV
-110	-1,91986	2,82	2,233	134	IV
-100	-1,74533	2,96	1,133	68	IV
-90	-1,5708	3,00	0,000	0	IV
-80	-1,39626	2,96	-1,133	-68	III
-60	-1,0472	2,60	-3,267	-196	III
-40	-0,69813	1,93	-5,000	-300	III
-20	-0,34907	1,02	-6,117	-367	III
-10	-0,17453	0,52	-6,417	-385	III

Şekil 5.2’te ise değişen hız ve RPM değerlerine göre oluşturulan çizelgenin değişimi görülmektedir. Kullanılan maksimum hız 3 m/s olmasına rağmen DARPA Suboff’un maksimum hızı 3.3436 m/s ‘dir. Bu nedenle hidrodinamik adım açısı (β)’nın hesaplanmasında yeni bir yöntem geliştirme ihtiyacı doğmuştur.



Şekil 5.2: Doğrusal azalan devir ve değişken hızla ilgili örnek 4 kadrant grafiği [30].

5.1.3 Değişken hız ve devre göre beta (β) değerleri

Bu tez kapsamında geliştirilen yöntemde ise hız ve devir değerleri Suboff'a göre ayarlanmıştır. İleri ve tornistan koşulları için sevk noktaları (β_{Q1} , β_{Q2} , β_{Q3} , β_{Q4}) hesaplanmıştır. Sayısal değerlerin de yardımıyla Şekil 5.3'ün ayrıntılı açıklanması kadrantlara göre şu şekildedir;

Birinci kadranda ilk sevk noktasına ($\beta=24.87^\circ$) kadar artan hız ve sabit devir ile çalışılmıştır. Hız artışı 3.3436 m/s olana kadar devam etmiş bu noktadan sonra hız sabit tutulacak şekilde devir düşürülmüştür. Devir ilk kadranın bitimi olan 90° 'ye kadar devam etmiş ve 0 olmuştur.

İkinci kadranda ise pervane durarak ters yönde dönmeye başlamış, ikinci sevk noktasına ($\beta=133.67^\circ$) kadar bu şekilde devam etmiştir. Sevk noktasını geçince devir sabit kalmış ama negatif yönde döndüğü için aracın da hızını azaltmaya başlamıştır. İkinci kadrant bitiminde ise hız 0 olmuştur.

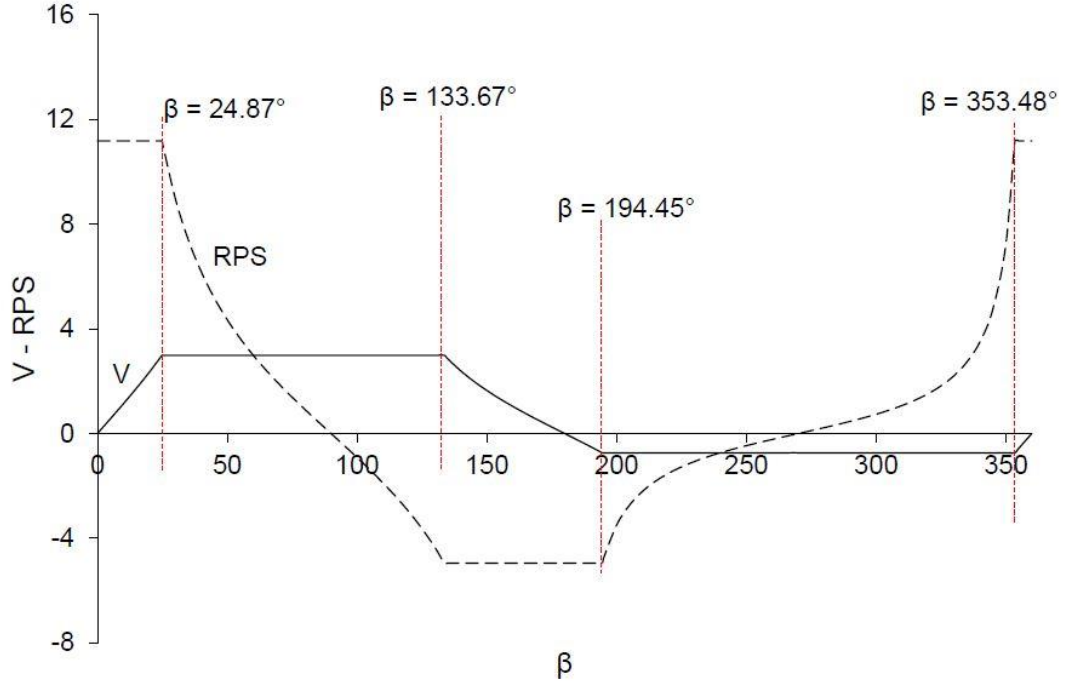
Üçüncü kadranda negatif yönlü sabit devir aracın tornistan durumunda hareket etmesine neden olmuştur ve bu durum üçüncü sevk noktasına ($\beta=194.45^\circ$) kadar devam etmiştir. Üçüncü sevk noktasından sonra sabit devir azalmaya başlamış araç ise tornistanda maksimum hızı olan 0.735m/s'ye ulaşmıştır. Devir 0 olduğunda ise üçüncü kadrant sonlanmıştır.

Dördüncü kadranda artışa geçen devir hızın sabit kalmasını sağlamış ve son sevk noktasına ($\beta=353.48$) kadar devam etmiştir. Sevk noktasından sonra sabitlenen devir aracın hızının 0 olmasını sağlamış ve dört kadran bu şekilde tamamlanmıştır.

Yukarıdaki açıklamadan ve Şekil 5.3'teki gösterimden anlaşılacağı üzere ize uyumlu bir denizaltı pervanesi tasarımının hesaplamaları ve deneyleri sadece ileri yönlü olarak kalmayıp 4 farklı hareket (kadrان) için de incelenmiştir.

Çizelge 5.3: Dört kadrان aralıklarına göre şaft devrinin ve ileri hızın hesaplanma koşulları.

Kadrان	İleri Hız	Şaft Devri	β Aralığı
	+	+	0-90°
1. Kadrان	0'dan V_{fwdmax} 'a	V_{fwdmax} 'ta KTN	0 to β_{Q1}
	V_{fwdmax}	0'a kadar V_{fwdmax} 'ta KTN	β_{Q1} to 90°
	-	+	90-180°
2. Kadrان	V_{fwdmax}	V_{fwdmax} 'ta 0'a kadar KTN	90° to β_{Q2}
	V_{fwdmax} 'tan 0'a	V_{fwdmax} 'ta KTN	β_{Q2} to 180°
	+	-	180-270°
3. Kadrان	V_{bckmax} 'tan 0'a	V_{bckmax} 'ta KTN	180° to β_{Q3}
	V_{bckmax}	0'a kadar V_{bckmax} 'ta KTN	β_{Q3} to 270°
	-	-	270-360°
4. Kadrان	V_{bckmax}	V_{bckmax} 'ta KTN 0'a kadar	270° to β_{Q4}
	0'a kadar V_{bckmax}	V_{bckmax} 'ta KTN	β_{Q4} to 360°



Şekil 5.3: Suboff için oluşturulan değişken hız ve devirli 4 kadran hesaplama koşulları.

Hesaplamalar, itme ve moment değerlerini belirlemek için her 10 derecede ve kritik β değerlerinde yapılır.

V_r bağıl hızı denklem 5.1’de görüldüğü gibi $0.7R$ yarıçapında hesaplanır. Pervanenin itme katsayısı C_T ve tork katsayısı C_Q , bağıl hız V_r ile denklem 5.2 ve 5.3’deki gibi tanımlanır [4].

$$V_r = \sqrt{V_a^2 + (0.7\pi nD)^2} \quad (5.1)$$

$$C_T = \frac{T}{\left(\frac{1}{2}\rho V_r^2\right) \frac{\pi}{4} D^2} \quad (5.2)$$

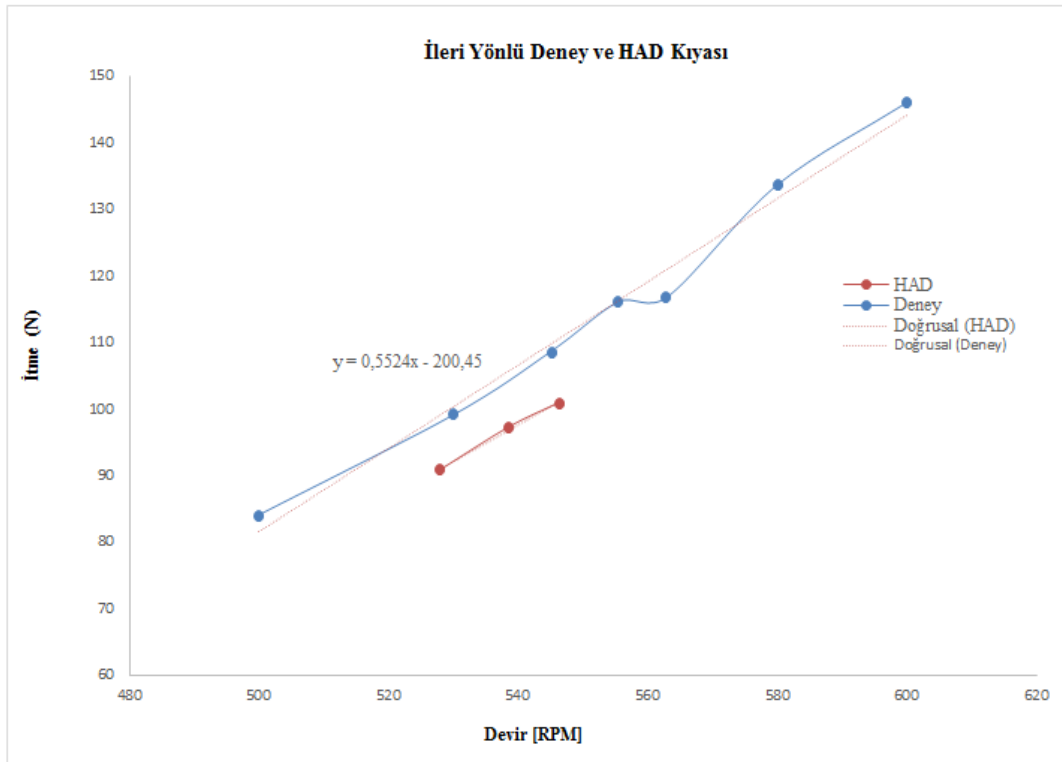
$$C_Q = \frac{Q}{\left(\frac{1}{2}\rho V_r^2\right) \frac{\pi}{4} D^3} \quad (5.3)$$

5.2 Deneylerin Değerlendirilmesi

Deneyler tamamlandıktan sonra ileri ve geri yönlü durumlar için yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleriyle kıyaslanmıştır. Deneylerle yapılan doğrulamalardan sonra Fourier denklemleri için gereken katsayılar hesaplanmış, Dört kadran eğrisi çizdirilmiştir. Çalışmalar aşağıdaki başlıklarda geniş bir şekilde ele alınmıştır.

5.2.1 İleri yönlü deney ve HAD kıyası

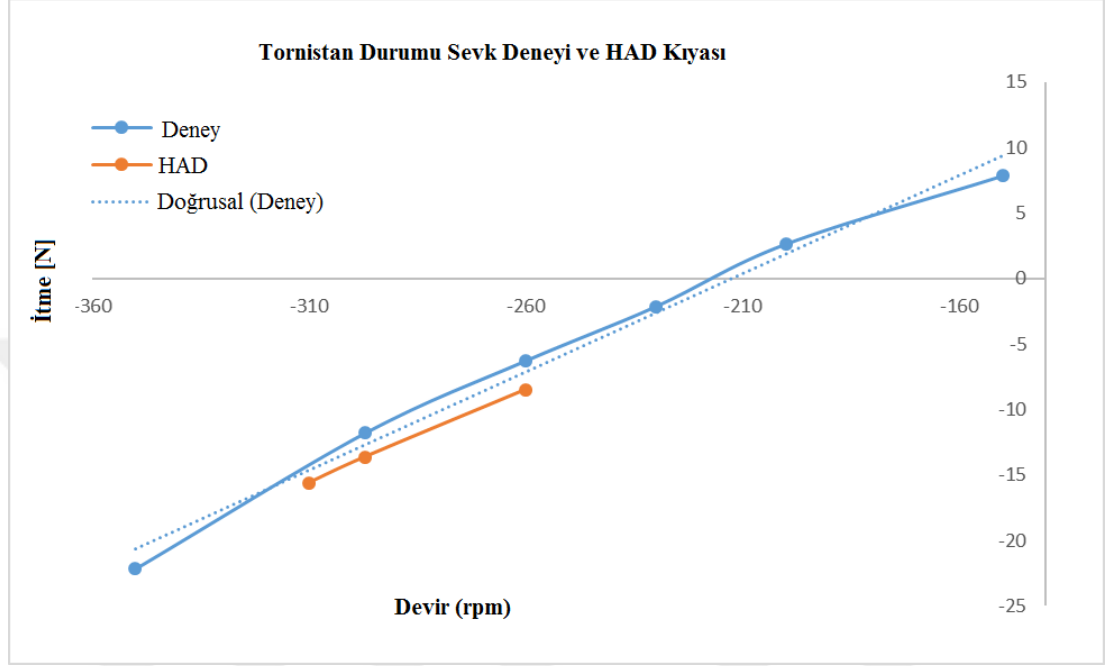
Yapılan deneysel ve hesaplamalı çalışmaların sonucunda elde edilen itme değerleri (Şekil 5.4) özellikle akış ayrılmalarından ve karmaşık akış durumundan ötürü büyük önem arzemesi nedeniyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu deneysel verilerle hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodundan elde edilen verilerin %10 civarında hassasiyetle uyum gösterdiği görülmüştür. Aradaki bu farkın deney sistemindeki belirsizliklerden ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodunun akışı tüm ayrıntılarıyla yakalayamamış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak HAD ile ileri yönlü durumunda deneysel duruma göre daha ihtiyatlı bir değerlendirme yapıldığı görülmüştür.



Şekil 5.4: İleri yönlü durumda sevk itme deneyinin HAD sonuçlarıyla kıyaslanması

5.2.2 Tornistan durumunda deney ve HAD kıyası

Tornistan durumu için de ileri yönlü deney ve hesaplara benzer olarak bir yaklaşım elde edilmiştir. Şekil 5.5'te de görüldüğü gibi %10 civarında hassasiyetle eğriler



Şekil 5.5: Tornistan durumunda sevk itme deneyinin HAD sonuçlarıyla kıyaslanması.

5.2.3 Katsayıların Hesaplanması

Pervane itme ve tork katsayıları denklem 5.4 ve 5.5'te verilmiş. Fourier serilerinde hesaplanan ve Çizelge 5.4'te gösterilen 30 harmonik Fourier katsayısıyla sunulmaktadır.

$$C_T = \frac{1}{100} \sum_{k=0}^{30} [A_T(k) \cos(k\beta) + B_T(k) \sin(k\beta)] \quad (5.4)$$

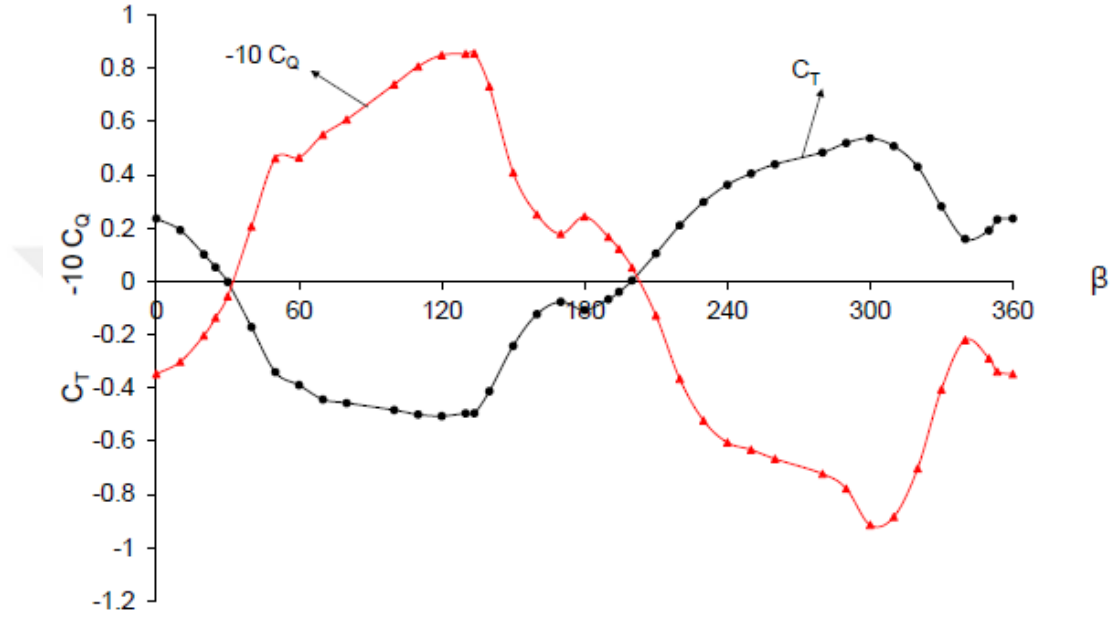
$$C_Q = \frac{1}{100} \sum_{k=0}^{30} [A_Q(k) \cos(k\beta) + B_Q(k) \sin(k\beta)] \quad (5.5)$$

Çizelge 5.4: Pervane dönüş hızı ve ileri yönlü hızlar için dört kadranlı hesaplama koşulları.

Harmonik	A_T	B_T	A_Q	B_Q	Harmonik	A_T	B_T	A_Q	B_Q
0	1.907567	0.000000	-3.576272	0.000000	16	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	13.251057	-48.120496	-25.007618	73.455544	17	0.000000	-3.725804	0.000000	6.044662
2	2.873501	-0.137930	-1.363417	-3.700408	18	-0.204702	0.000000	0.188982	0.000000
3	-0.168822	5.344866	2.537457	-6.441104	19	0.205944	-2.746408	-0.702081	4.976250
4	1.562549	1.526737	-0.295357	-1.052899	20	0.000785	0.231528	0.494720	-0.689313
5	0.383843	5.838775	-1.361279	-12.171255	21	0.000000	-0.964847	0.000000	1.498256
6	0.000000	0.177968	0.000000	-0.837029	22	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	1.555763	0.000000	-2.870891	0.000000	23	0.122511	0.000000	-0.271757	0.000000
8	-2.474491	-0.454272	4.165905	1.247297	24	0.807132	0.000000	-1.380471	0.000000
9	0.000000	-1.340623	0.000000	3.581946	25	0.000000	-0.450731	0.000000	0.300348
10	0.071179	-0.206879	0.411065	0.488051	26	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	0.793446	0.000000	-1.073580	0.000000	27	1.136052	0.000000	-1.232639	0.000000
12	0.000000	-0.108214	0.000000	-0.165705	28	2.791440	0.000000	-4.535574	0.000000
13	0.000000	-0.762619	0.000000	0.817661	29	0.000000	-2.329496	0.000000	3.849353
14	-0.613893	-0.003686	1.046849	0.393550	30	-0.332172	0.000000	-0.432561	0.000000
15	-0.090017	0.000000	0.417754	0.000000					

5.2.4 Dört kadran grafiğinin çizdirilmesi

INSEAN E1619 için dört kadran tahrik verilerinin, hidrodinamik adım açısı β 'ya göre itme katsayısının (C_T) ve tork katsayısının (C_Q) değışimi Şekil 5.6'da grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 5.6: β 'ya karşı C_T ve $-10 C_Q$ değeri.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

DARPA Suboff denizaltısı ve INSEAN E1619 genel denizaltı pervanesi, ileri hız için denizaltı sevkini sayısal çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Gemi manevra simülasyonlarında bir temel oluşturulabilmesi için, pervane hareketlerinin tüm kadrantlarındaki itme ve tork özellikleri bilinmelidir. Pervanenin tasarım dışı özelliklerini öngörebilmek için E1619 pervanesi ile ilgili hesaplamalar yapılmalıdır. Bu hesaplamalar açık su eğrilerinin doğrulaması ve çözüm açısından bağımsızlık çalışmalarına göre yöntemin doğrulanmasını da içermelidir. Bu bağlamda tezde yer alan hesaplamalar hem ileri hem de tornistan seyri için direnç ve sevk analizlerini kapsamaktadır. Bu hesaplamalarla birlikte, kritik hidrodinamik adım açısı (β) değerleri, pervanelerin gerçek tasarım koşullarındaki hassasiyetle kararlaştırılmıştır. Bu koşullara ileri ve tornistan seyrinde ileri giderken ani durma, geri giderken ani durma ve sevk noktalarını hesaplanması da eklenerek dört kadrant verileri oluşturulmuştur. Tüm veriler sonuçta dört kadrant boyunca itme ve tork katsayılarındaki değişim grafiği olarak gösterilmiş ve Fourier katsayılarının 30 harmoniği sunulmuştur.

Bu teze dayanarak gelecekte yapılabilecek çalışmalar:

- İTÜ Ata Nutku Gemi Model Laboratuvarı'nda yakın gelecekte kurulacak olan gelişmiş ve büyük kavitasyon tüneline dört kadrantlı veri deneysel olarak ölçülebilir.
- Üretilen dört kadrantlı pervane özellikleri kullanılarak, surge hareketinden itibaren DARPA Suboff'un manevra karakteristiği sayısal olarak simüle edilebilir.
- P/D oranı değiştirilerek farklı oranlar için C_Q ve C_T değerleri hesaplanıp aynı dört kadrant grafiği üzerinde gösterilebilir.
- Yeterli bilgisayar işlemci olması durumunda y^+ değerinde iyileştirme yapılarak (50'den daha küçük değerler için) daha iyi sınır koşullarında analizler tekrarlanabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Roddy, R.F., Hess, D.E., Faller, W.** (2006). ‘Neural Network Predictions of the 4-Quadrant Wageningen Propeller Series’. Hydromechanics Department Report, NSWCCD.
- [2] **Lammeren, W.P.A, van, Manen, J.D. van, Oosterveld, M.W.C.** (1969). ‘The Wageningen B-screw series’ Trans. SNAME.
- [3] **Oosterveld, M.W.C.** (1970) ‘Wake Adapted Ducted Propellers’ NSMB Wageningen Publication No. 345. June 1970.
- [4] **Burunsuz, S., Özden, M. C., Özden, Y. A., Helvacioğlu, İ. H.** (2017). Four Quadrant Thrust and Torque Prediction of INSEAN E-1619 Generic Submarine Propeller for Submarine Maneuvering Simulations, Fifth International Symposium on Marine Propulsors smp’17, Haziran 2017
- [5] **Kawamura, T., Watanabe, T., Takekoshi, Y., Maeda, M., Yamaguchi, H.** **Numerical** (2004) ‘Simulation of Cavitating Flow around a Propeller’ JSNA. vol.195.
- [6] **Li, D.-Q.** (2006). Validation of RANS Predictions of Open Water Performanca of a Highly Skewed Propeller with Experiments, Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, Journal of Hydrodynamics, Volume 18, Issue 3, Supplement, pp 520-528, Temmuz 2006.
- [7] **Gao, F.D., Pan, CY. & Han, YY.** (2012) ‘Numerical Computation and Analysis of Unsteady Viscous Flow Around Autonomous Underwater Vehicle with Propellers Based on Sliding Mesh’. J. of Central South University of Technology. 19(4), pp.944–952.
- [8] **ITTC.** (2017) ‘Propulsion Committee Report’. Proceedings of the 28th ITTC, 28th International Towing Tank Conference, Wuxi, China, Vol. I, s. 69-129.
- [9] **Chase, N.,** (2012) ‘Simulations of the DARPA Suboff Submarine Including Self-propulsion with the E1619 Propeller’. M.Sc. Thesis, University of Iowa, USA.
- [10] **Chase, N. & Carrica, P. M.** (2013). ‘Submarine Propeller Computations and Application to Self-propulsion of DARPA Suboff’. Ocean Engineering, 60 pp.68-80.
- [11] **Liefvendahl, M., Toerng, C.** (2011) ‘Computation of Cycle-to-Cycle Variation in Blade Load for a Submarine Propeller, using LES’. 2nd International Symposium on Marine Propulsors, SMP11, Hamburg, Germany.

- [12] **Alin, N., Chapuis, M., Fureby, C., Liefvendahl, M., Svennberg, U. & Troeng, C.** (2010). ‘A Numerical Study of Submarine Propeller-Hull Interaction’. Proceedings of the 28th Symposium on Naval Hydrodynamics, Pasadena, California.
- [13] **Ozden, M.C., Gürkan, A.Y., Arıkan Özden, Y., Gökcer, T.G. & Korkut, E.** (2016). ‘Underwater radiated noise prediction for a submarine propeller in different flow conditions’. Ocean Engineering, Volume 126, 1 November 2016, Pages 488–500
- [14] **Di Felice, F., Felli, M., Liefvendahl, M. & Svennberg, U.** (2009) ‘Numerical and Experimental Analysis of the Wake Behavior of a Generic Submarine Propeller’. Proceedings of the 1st International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim, Norway.
- [15] **Arıkan, Y.** (2010). Podlu Sevk Sistemlerinin Performans Analizi ve Çevreye Olan Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2010, İstanbul.
- [16] **Carlton, J.** (2006). Marine Propellers and Propulsion, Elsevier, Oxford.
- [17] **Lammeren, W.P.A. van, Manen, J.D. van, Oosterveld, M.W.C.** (1969) The Wageningen B-screw series. Trans. SNAME.
- [18] **Conn, J.F.C.** (1923) Backing of propellers. Trans. IESS.
- [19] **Nordstrom, H.F.** (1948) Screw Propeller Characteristics. SSPA Publication No. 9, Göteborg,
- [20] **Özden, M. C., Karagöz Y., Çiftçi Y. S.** (2011) ,Applied Experimental Methods in Naval Architecture, Teknik Rapor, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [21] **Gertler, M.** (1950) “Resistance experiments on a systematic series of streamlined bodies”, David Taylor Model Basin Report, USA
- [22] **Mackay, M.** (2003) “The Standard Submarine Model A Survey of Static Hydrodynamic”, DRDC Technical Report, Canada.
- [23] **Krylov Enstitüsü Rüzgar Tüneli Çalışmaları,** Erişim: 13 Mart 2011, <http://www.ksri.ru> – Krylov Institute, Russia.
- [24] **Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam,** Erişim:13 Mart 2011, <http://www.sva-potsdam.de/subpmm-en.html>, Almanya.
- [25] **Gertler, M.** (1967) “The DTMB Planar Motion Mechanism System”, David Taylor Model Basin Report.
- [26] **ANSYS 12 FLUENT Theory Guide.** (2009)
- [27] **RANS-based turbulence models,** Erişim 5 Kasım 2017, https://www.cfd-online.com/Wiki/RANS-based_turbulence_models
- [28] **Tu, J., Yeoh, G. H. ve Liu, C.,** (2008), “Computational Fluid Dynamics A Practical Approach”.
- [29] **Liu, H.-L. & Huang, T.** (1998). ‘Summary of DARPA SUBOFF Experimental Program Data’. Report No. CRDKNSWC/HD-1298-11, Haziran.

- [30] **Simonsen, C. D.** (2000) “Rudder Propeller and hull interaction by RANS”, PhD Thesis, Department of naval architecture and offshore engineering, Technical University of Denmark.
- [31] **S. V. Patankar and D. B. Spalding**, “A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three Dimensional Parabolic Flows,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, No. 10, 1972, pp. 1787-1805.
- [32] **Bernitsas, M. M., Ray, D., Kinley, P. (1981)** “ K_T , K_Q and Efficiency Curves for the Wageningen B-Series Propellers”, Report, Department of naval architecture and offshore engineering, The University of Michigan.





ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Sinan Burunsuz
Doğum Yeri ve Tarihi: Finike/ 1989
E-posta: sinanburunsuz@gmail.com
Lisans: İTÜ Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği

Mesleki Deneyimler

2016-2017	Gemi ve Deniz Mühendisi-TÜMOSAN
2015-2016	Gemi ve Deniz Mühendisi-ALBAKOR
2014-2015	Gemi ve Deniz Mühendisi-DATUM
2013-2014	Gemi ve Deniz Mühendisi-PROPOD