İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GEMİ PERVANELERİNDE ÖLÇEK ETKİSİNİN AÇIK SU KARAKTERİSTİKLERİ, KAVİTASYON OLUŞUMU VE KAVİTASYON EROZYONU ÜZERİNDE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selahattin ÖZSAYAN

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

ARALIK 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GEMİ PERVANELERİNDE ÖLÇEK ETKİSİNİN AÇIK SU KARAKTERİSTİKLERİ, KAVİTASYON OLUŞUMU VE KAVİTASYON EROZYONU ÜZERİNDE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selahattin ÖZSAYAN
(508181013)

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Emin KORKUT

ARALIK 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 508181013 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Selahattin ÖZSAYAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "GEMİ PERVANELERİNDE ÖLÇEK ETKİSİNİN AÇIK SU KARAKTERİSTİKLERİ, KAVİTASYON OLUŞUMU VE KAVİTASYON EROZYONU ÜZERİNDE İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Emin KORKUT** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Devrim Bülent DANIŞMAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Ziya SAYDAM Piri Reis Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 06 Aralık 2021
Savunma Tarihi : 28 Aralık 2021

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca, değerli bilgilerini benimle paylaşan, bana her zaman yol gösteren, yardımlarını hiç esirgemeyen, değerli tez danışmanı hocam sayın Prof. Dr. Emin KORKUT'a teşekkürlerimi sunmak isterim.

Üniversite eğitimim boyunca desteklerini esirgemeyen, engellerle dolu olan yolda engelleri teker teker aşmama yardım eden Prof. Dr. Ömer GÖREN'e, Prof. Dr. Metin TAYLAN'a, Doç. Dr. Uğur ORAL ÜNAL'a, Doç. Dr. Bahadır UĞURLU'ya ve Doç. Dr. Devrim Bülent DANIŞMAN'a teker teker teşekkürlerimi sunuyorum.

Yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, her fırsatta dostluklarını paylaşan değerli arkadaşlarım, abilerim Arş. Gör. Çağatay Sabri KÖKSAL'a, Gürbüz BİLİCİ'ye ve Arş. Gör. Çağrı AYDIN'a teşekkür ederim.

Dostluğunu, samimiyetini benimle paylaşan başta oda arkadaşım Arş. Gör. Cihad ÇELİK'e, Arş. Gör. Aras ÇETİNKAYA'ya, Arş. Gör. İsmail KAHRAMAN'a, Arş. Gör. Enes TUNCA'ya teşekkür ederim.

İTÜ GİBD Fakültesi Ata Nutku Gemi Model Deney Laborotuvarındaki çalışanlara başta Seyfi ERİM olmak üzere teşekkür ederim.

Ayrıca burada isimlerini telaffuz edemediğim ancak çalışma boyunca beni destekleyen çocukluk, lise, üniversite ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her anında beni destekleyen, bu günlere getiren canım aileme ve bu günlerimi benimle paylaşamayan rahmetli dedeme çok teşekkür ederim.

Aralık 2021

Selahattin ÖZSAYAN
(Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı 3
1.2 Literatür Araştırması 4
1.3 Kavitasyon ve Kavitasyon Erozyonu 6
2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) **9**
2.1 Sonlu Hacim Ayrıklaştırması 9
2.2 Türbülans Modellemesi 10
2.2.1 Duvar fonksiyonu 11
2.2.2 Standart k-**ω** modeli 13
2.2.3 SST k-**ω** modeli 14
2.3 Kavitasyonlu Akışı Modelleme Yöntemleri 16
2.4 Kavitasyon Modelleri 16
2.5 Kavitasyon Erozyonu Tahmini Yöntemleri 18
3. GEMİ PERVANELERİNDE ÖLÇEK ETKİSİNİN BELİRLENMESİ **19**
3.1 Ölçek ve Boyut Analizi 19
3.1.1 Dinamik yöntem 20
3.1.2 Boyut analizi 21
3.2 Gemi Pervanelerinde Ölçek Etkisi 23
3.3 Gemi Pervanelerinde Ölçek Etkisi Yöntemleri 24
3.3.1 İstatiksel metotlar 24
3.3.2 Analitik metotlar 26
3.3.3 HAD metotları 27
3.3.4 Birleştirilmiş metotlar 28
3.4 Tez Çalışmasında Ölçek Etkisinde İncelenen Parametreler 28
3.4.1 Açık su analizlerinde incelenen parametreler 28
3.4.2 Kavitasyon oluşumu ve erozyon şiddetinde incelenen parametreler 29
4. HESAPLAMALI PERVANE AÇIK SU ÇALIŞMASI **31**
4.1 DTMB 5415 Pervanesinin Özellikleri 31
4.2 Çözüm Metodolojisi ve Hesaplama Bölgesi 32
4.3 Ağ Örgüsünün Oluşturulması 33
4.4 Ağdan Bağımsızlık Çalışması 35
4.5 Açık Su Analizleri İncelenen Akış Koşulları 39

4.6 DTMB 5415 Pervanesi Geçerleme Çalışması 39
4.7 Açık Su Analizi Sonuçları 40
4.8 Ölçek Etkisinin İncelenmesi 41
5. HESAPLAMALI KAVİTASYON VE EROZYON OLUŞUMU ÇALIŞMASI 49
5.1 Çözüm Metodolojisi ve Hesaplama Bölgesi 49
5.2 Ağ Örgüsünün Oluşturulması 50
5.3 İncelenen Akış Koşulları 53
5.4 Ağdan Bağımsızlık Çalışması 54
5.5 Kavitasyon ve Erozyon Oluşumu Sonuçları 57
5.6 Kavitasyon Oluşumu Ölçek Etkisinin İncelenmesi 58
5.7 Erozyon Tahminleri Ölçek Etkisinin İncelenmesi 67
5.8 Kavitasyon Sayısı ve Erozyon Gücü Arasındaki İlişkinin İncelenmesi 72
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 75
6.1 Sonuç 75
6.2 Öneriler 77
KAYNAKLAR 79
ÖZGEÇMİŞ 83

KISALTMALAR

ASME : The American Society of Mechanical Engineers
CLT : Contracted and Loaded Tip Propeller
CTO, SA : Ship Design and Research Centre
DES : Detached Eddy Simulation
DNS : Direct Numerical Simulation
DTMB : David Taylor Model Basin
EEDI : Energy Efficiency Design Index
EPM : Erosive Power Method
GCI : Grid Converge Index
GLM : Gray Level Method
HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HEM : Homogeneous Equilibrium Mixture
HSVA : Hamburg Ship Model Basin
IFM : Intensity Function Method
IMO : International Maritime Organisation
ITTC : International Towing Tank Conference
İTÜ : İstanbul Teknik Üniversitesi
MARIN : Maritime Research Institute Netherlands
LES : Large Eddy Simulation
OECD : Organisation for Economic Co-operation and Development
PPTC : Potsdam Propeller Test Case
RANS : Reynold Averaged Navier Stokes
SST : Shear Stress Transport
VoF : Volume of Fluid

SEMBOLLER

α	: Buhar hacmi oranı
A_E	: Pervanin gelişmiş alanı
A_0	: Pervanin disk alanı
c	: Pervane kiriş boyu
C_D	: Sürtünme katsayısı
C_L	: Kaldırma katsayısı
C_{KA}	: Boyutsuz kavitasyon alanı
C_{EP}	: Boyutsuz erozyon gücü
D	: Pervane çapı
D_S	: Küçük çaplı pervane modeli
D_M	: Orta çaplı pervane modeli
D_B	: Büyük çaplı pervane modeli
D_{FS}	: Tam ölçek pervane
ε	: Türbülans kinetik enerjisi disipasyon oranı
F	: Sürtünme kuvveti
Fr	: Froude Sayısı
g	: Yerçekimi ivmesi
H	: Isı miktarı
J	: Pervane ilerleme sayısı
k	: Türbülans kinetik enerjisi
K_T	: İtme katsayısı
K_Q	: Tork katsayısı
L	: Kaldırma kuvveti
L_M	: Gemi modeli boyu
L_S	: Gemi boyu
λ	: Ölçek değeri
μ	: Suyun kinematik viskozitesi
n_M	: Model pervane bir saniyedeki devir sayısı
n_S	: Pervane bir saniyedeki devir sayısı
η_0	: Açık su verimi

P_B : Kabarcık yüzey basıncı

P : Pervane hatvesi

P_0 : Hidrostatik basınç

P_V : Buhar basıncı

R_B : Kabarcık yarıçapı

R_e : Reynolds Sayısı

ρ : Suyun yoğunluğu

ρ_v : Buhar yoğunluğu

σ : Kavitasyon sayısı

T : Pervane itmesi

Q : Pervane torku

τ_w : Duvar kayma gerilmesi

u_v : Buhar faz hızı

U^+ : Duvar civarında boyutsuz hız değeri

V_A : Efektif hız

V_M : Model hızı

V_S : Gemi hızı

V_V : Makroskopik kavitasyon hacmi

ω : Türbülans kinetik enerjisi spesifik disipasyon

y^+ : Duvardan boyutsuz uzaklık

Z : Pervane kanat sayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: İtme için boyut analizi parametreleri..... 21
Çizelge 4.1 : DTMB-5415 pervanesi özellikleri. 31
Çizelge 4.2 : J=0.5 için ağdan bağımsızlık çalışması sonuçları. 36
Çizelge 4.3 : Açık su analizleri K_T için ayrıklaştırma hatası değerleri..... 38
Çizelge 4.4 : Açık su analizleri model ve tam ölçekte HAD koşulları..... 39
Çizelge 4.5 : D_S için deney ve HAD sonuçları. 39
Çizelge 4.6 : Deney ve HAD sonuçları arasındaki farklar (%). 40
Çizelge 4.7 : Model ve tam ölçekte açık su sonuçları. 40
Çizelge 4.8 : D_S, D_M, D_B'nin ITTC 1978 metodu ektrapolasyon sonuçları. 44
Çizelge 4.9 : HAD tam ölçek ve model ölçekleri arasındaki farklar..... 47
Çizelge 4.10 : ITTC 1978 yöntemi tam ölçek ve model ölçekleri arasındaki farklar. 47
Çizelge 4.11 : K_T'deki basınç ve sürtünme bileşenleri..... 48
Çizelge 4.12 : K_Q'daki basınç ve sürtünme bileşenleri. 48
Çizelge 5.1 : Tüm ölçeklerde ortalama yan oranları..... 51
Çizelge 5.2 : Kavitasyon oluşumu incelenen akış koşulları. 53
Çizelge 5.3 : D_M çapı, EP ve σ_N arasındaki ilişki için incelenen ek durumlar. 53
Çizelge 5.4 : J=0.747 için ağdan bağımsızlık çalışması sonuçları. 54
Çizelge 5.5 : J=0.747 için zamandan bağımsızlık çalışması sonuçları..... 55
Çizelge 5.6 : K_T ağdan bağımsızlık ayrıklaştırma hatası değerleri..... 55
Çizelge 5.7 : K_T zamandan bağımsızlık ayrıklaştırma hatası değerleri..... 56
Çizelge 5.8 : Kavitasyon alanı ağdan bağımsızlık ayrıklaştırma hatası değerleri. 56
Çizelge 5.9 : Kavitasyon alanı zamandan bağımsızlık ayrıklaştırma hatası değerleri. 57
Çizelge 5.10 : Durum 1 D_S, D_M, D_B ve D_{FS} için sonuçlar. 58
Çizelge 5.11 : Durum 2 D_S, D_M ve D_B için sonuçlar. 60
Çizelge 5.12 : Durum 3 D_S, D_M ve D_B için sonuçlar. 62
Çizelge 5.13 : Durum 4 D_S, D_M ve D_B için sonuçlar. 64
Çizelge 5.14 : Kavitasyon görülme kavitasyon sayıları. 66
Çizelge 5.15 : Boyutsuz ortalama erozyon gücü (C_{EP}) değerleri..... 67
Çizelge 5.16 : D_M C_{EP} Değerleri..... 73

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Model ölçeği pervane emme kısmı akış rejimleri (Kuiper, 1981). 2
Şekil 1.2 : Gemi pervaneleri kavitasyon tipleri (ITTC, 2002). 7
Şekil 2.1 : Türbülans modellerinin şematik gösterimi (Krasilnikov, 2011). 11
Şekil 2.2 : Sınır tabaka bölgeleri (Schlichting ve Gersten, 2017). 12
Şekil 2.3 : y+ grafiği (Fluent Inc, 2014). 13
Şekil 3.1 : Ölçek etkisinin incelenmesi (Bugalski ve diğ, 2013). 24
Şekil 3.2 : Pervane görünüşleri, sol) CLT, sağ) Kappel. 26
Şekil 3.3 : Kanat yükleme durumları (Carlton, 2018). 27
Şekil 4.1 : DTMB-5415 pervanesi, a) basınç (yüz) b) emme (sırt) yüzeyleri. 32
Şekil 4.2 : Açık su analizleri hesaplama bölgesi ve sınır koşulları. 33
Şekil 4.3 : D_S için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey. 34
Şekil 4.4 : D_M için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey. 34
Şekil 4.5: D_B mm için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey. 34
Şekil 4.6 : D_{FS} mm için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey. 35
Şekil 4.7 : Hücre sayılarına göre K_T değişimi, a) D_S b) D_M c) D_B d) D_{FS}. 36
Şekil 4.8 : Açık su y+ dağılımları, a) D_S b) D_M c) D_B d) D_{FS}. 41
Şekil 4.9 : D_S, D_{FS}, D_S (deney) açık su grafiği. 42
Şekil 4.10 : D_M, D_{FS} açık su grafiği. 42
Şekil 4.11 : D_B, D_{FS} açık su grafiği. 43
Şekil 4.12 : D_S, D_M, D_B, D_{FS} açık su verimi grafiği. 43
Şekil 4.13 : Açık su K_T değerleri farkları (%). 45
Şekil 4.14 : Açık su K_Q değerleri farkları (%). 45
Şekil 4.15 : Açık su η_0 değerleri farkları (%). 46
Şekil 5.1 : Kavitasyon ve erozyon analizleri hesaplama bölgesi ve sınır koşulları. 50
Şekil 5.2 : D_S için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey. 51
Şekil 5.3 : D_M için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey. 52
Şekil 5.4 : D_B için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey. 52
Şekil 5.5 : D_{FS} için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey. 52
Şekil 5.6 : Kavitasyon oluşumu y+ dağılımları, a) D_S b) D_M c) D_B d) D_{FS}. 58
Şekil 5.7 : Durum 1 emme yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B d) D_{FS}. 59
Şekil 5.8 : Durum 1 basınç yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B d) D_{FS}. 60
Şekil 5.9 : Durum 2 emme yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B. 61
Şekil 5.10 : Durum 2 basınç yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B. 62
Şekil 5.11 : Durum 3 emme yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B. 63
Şekil 5.12 : Durum 3 basınç yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B. 64
Şekil 5.13 : Durum 4 emme yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B. 65
Şekil 5.14 : Durum 4 basınç yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B. 66
Şekil 5.15 : Durum 1 emme yüzeyi C_{EP} değerleri, a) D_S b) D_M c) D_B d) D_{FS}. 68
Şekil 5.16 : Durum 1 basınç yüzeyi C_{EP} değerleri, a) D_S b) D_M c) D_B d) D_{FS}. 69
Şekil 5.17 : Durum 2 basınç yüzeyi C_{EP} değerleri, a) D_S b) D_M c) D_B. 70
Şekil 5.18 : Durum 3 basınç yüzeyi C_{EP} değerleri, a) D_S b) D_M c) D_B. 71

Şekil 5.19 : Durum 4 basınç yüzeyi C_{EP} değerleri, a) D_S b) D_M c) D_B. 72
Şekil 5.20 : σ_N- C_{EP} grafiği. 73

GEMİ PERVANELERİNDE ÖLÇEK ETKİSİNİN AÇIK SU KARAKTERİSTİKLERİ, KAVİTASYON OLUŞUMU VE KAVİTASYON EROZYONU ÜZERİNDE İNCELENMESİ

ÖZET

Küresel Isınma günümüzde dünyamızı tehdit eden en önemli sorunlardan biridir. Küresel ısınmanın nedenlerinden bir tanesi olan, gemilerden salınan emisyon gazlarının, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından bir takım kural ve düzenlemelerle azaltılması amaçlanmıştır. Gemilerin emisyon gazlarının salınımını ve işletim maliyetlerini azaltmak için sevk veriminin artırılması son derece önemlidir. Gemilerin genel sevk verimi, pervanenin açık su ve gemi arkasında pervane olduğu sevk durumlarında deneysel ve hesaplamalı (HAD) olarak belirlenir. Tam ölçekte bu testlerin yapılması mümkün olmağından, gemiler ve pervaneler belli bir oranda küçültülür, çekme havuzlarında ve kavitasyon tünellerinde testlerinin gerçekleştirilmesi sağlanır.

Sevk veriminin artırılmasında pervane dizaynı son derece önemlidir ve pervanelerin hidrodinamik performansı model deneyinden ve hesaplamalı çalışmalardan (HAD) elde edilen sonuçlara göre belirlenir. Ancak model ve tam ölçek pervane arasında farklı Re sayılarından ötürü akış benzerliği sağlanamaz. Tam ölçekte akış tamamen türbülanslı iken, model ölçeğinde laminar, geçiş bölgesi ve türbülanslı bölge görülür. Bu nedenle, tam ölçek ve model için sonuçlar farklılık gösterir ve bu ölçek etkisi olarak ifade edilir. Bu çalışma kapsamında pervanenin açık su, kavitasyon ve erozyon oluşumu için farklı model ölçeklerinde ve tam ölçekte ölçek etkisi hesaplamalı olarak incelenmiştir. Bölüm 1'de açık su ve kavitasyon oluşumu ölçek etkisi çalışmaları için literatür taramasına yer verilmiştir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm analizler (açık su, kavitasyon ve erozyon), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Bölüm 2'de, HAD yöntemleri, türbülans modellemesi, kavitasyonlu akışı modelleme yöntemleri, kavitasyon modelleri ve kavitasyon erozyonu tahmini yöntemleri için bilgi verilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında kullanılan k-ω SST türbülans modeli için detaylı bilgiye verilmiştir.

Gemi pervanelerinde ölçek kavramına, tam ölçek ve model ölçeği arasındaki hidrodinamik benzerliklere, model ölçeğindeki sonuçların tam ölçeğe taşınmasına ve açık su analizleri için ölçek etkisini hesaplayan farklı yöntemlere Bölüm 3'te yer verilmiştir. Ayrıca açık su çalışmasında, kavitasyon ve erozyon çalışmasında boyutsuz olarak incelenecek parametrelere bu bölümde yer verilmiştir.

Bölüm 4 ile birlikte çalışmanın hesaplamalı kısmına açık su analizleri ile geçilmiştir. Bölüm 4.1'de çalışmada kullanılan DTMB 5415 pervanesinin özelliklerine, 3 farklı ölçek ve tam ölçek için yer verilmiştir. Bölüm 4.2'de hesaplamalı çalışmanın metodolojisinden, hesaplama bölgesinin detaylarından ve sınır koşullarından bahsedilmiştir. Hesaplamalı çalışmalarda sonuçlar üzerinde çok fazla etkisi olan

parametre, oluşturulan ağ örgüsüdür. Sınır tabaka içerisindeki ağ örgüsü, hücre yan oranları, ağın yoğunluğu ve sıklığı ağ örgüsü oluşturulurken özen gösterilmesi gerekli hususlardır. Bölüm 4.3'te açık su analizleri için tüm ölçeklerde ağ örgüsünün oluşturulma detaylarına ve ağ görünüşlerine yer verilmiştir.

Ölçek etkisi çalışmasında sonuçların ağ yapısından bağımsız olması, düzgün karşılaştırma yapılabilmesi için çok önemlidir. Bu kapsamda itme katsayısı (K_T) için 3 farklı ölçekte ve tam ölçekte ağdan bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir ve ağ örgüsünün belirsizliği GCI kullanılarak hesaplanmıştır. Ağdan bağımsızlık çalışması Bölüm 4.4'te detaylı olarak incelenmiştir.

Bölüm 4.5'te açık su analizlerinde tüm ölçeklerde incelenen akış koşullarına yer verilmiştir. Açık su analizleri 0.2-0.8 arasındaki ilerleme sayılarında gerçekleştirilmiştir. HAD çalışmasının doğruluğu göstermek amacıyla geçerleme çalışması yapılması önemlidir. Bu kapsamda literatürde açık su deney sonuçları bulunan 173 mm çaptaki model pervanenin geçerleme çalışması Bölüm 4.6'da verilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen sonuçlar ve kanat üzerindeki y^+ dağılımları Bölüm 4.7'de gösterilmiştir.

Model ölçeklerinde elde edilen sonuçlar ile tam ölçekten elde edilen sonuçlar Bölüm 4.8'de karşılaştırılmıştır. HAD yöntemleri ve ITTC 1978 yöntemi ile 3 farklı model ölçeği için ölçek etkisi hesaplanmıştır. ITTC 1978 yöntemi ve HAD yöntemi sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında tüm ölçeklerde, ITTC 1978 yönteminin ölçek etkisini HAD'a göre düşük hesapladığı görülmüştür. Ayrıca HAD yöntemlerinde yüksek ilerleme sayılarında ölçek etkisi artmıştır.

Bölüm 5'te hesaplamalı kavitasyon ve erozyon oluşumu analizlerine geçilmiştir. Hesaplamalı çalışmanın metodolojisinden, hesaplama bölgesinin detaylarından ve sınır koşullarından Bölüm 5.1'de bahsedilmiştir. Açık su analizlerine benzer olarak kavitasyon ve erozyon oluşumu çalışmasında ağ örgüsünün önemi çok daha büyüktür. Hücre yan oranları, sınır tabakada ağ örgüsü, ağın yoğunluğu ve sıklığı ağ örgüsü oluşturulurken dikkat edilmesi gereken noktalardır. Ölçek etkisi çalışmasında farklı ölçeklerdeki yan oranları benzer tutulmuştur. Bölüm 5.2'de tüm ölçeklerdeki ortalama yan oranlara, ağ örgüsü görünüşlerine ve pervane yüzeyindeki ağ örgüsü görünüşüne yer verilmiştir.

Kavitasyon ve erozyon oluşumu analizlerinde incelenen akış koşulları Bölüm 5.3'de verilmiştir. Tüm ölçeklerde 4 farklı durum incelenmiştir. Ayrıca erozyon analizlerinde kavitasyon sayısı ve erozyon gücü arasındaki ilişkiyi incelemek için 3 farklı durumda daha, 246.4 mm çaptaki pervane için analizler gerçekleştirilmiştir.

Ölçek etkisi çalışmalarında çok önemli olan ağdan bağımsızlık analizi Bölüm 5.4'de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sonuçların zaman adımından bağımsız olduğunu göstermek için de çalışma yapılmıştır. İtme katsayısı (K_T) ve yüzey kavitasyon alanı için ağdan ve zamandan bağımsızlık çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ağ örgüsünün ve zaman adımının belirsizliği GCI kullanılarak hesaplanmıştır.

Kavitasyon ve erozyon oluşumu için y+ değerlerinin model ölçeklerinde viskoz alt tabakada, tam ölçekte logaritmik tabakada tutulduğu Bölüm 5.5'te pervane yüzeyi üzerinde gösterilmiştir.

Kavitasyon analizi sonuçlarında itme, tork ve yüzey kavitasyon alanı sonuçları boyutsuzlaştırılarak ölçek etkisi incelenmiştir. Bölüm 5.6'da incelenen 4 farklı durum için sonuçlar karşılaştırılmıştır. İncelenen tüm durumlarda model çapı büyüdükçe yüzey kavitasyon alanının arttığı, tork katsayısının (K_Q) azaldığı tespit edilmiştir. İtme

katsayısı (K_T) ise bir durum hariç artmıştır. Bu bölümde kavitasyon görülme kavitasyon sayısı da model ölçeklerinde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan model boyu büyüdükçe kavitasyonun daha büyük kavitasyon sayılarında görülmeye başlandığı tespit edilmiştir.

Bölüm 5.7'de ise erozyon tahminleri için ölçek etkisi incelenmiştir. Ölçek etkisi incelenirken pervane kanatlarındaki ortalama erozyon şiddeti değerleri kullanılmıştır ve karşılaştırma yapılabilmesi için bu değerler boyutsuzlaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan model boyu büyüdükçe boyutsuz ortalama erozyon gücünün (C_{EP}) azaldığı görülmüştür.

Kavitasyon sayısı ve erozyon gücü arasındaki ilişki Bölüm 5.8'de incelenmiştir. Bu kısımda da boyutsuz ortalama erozyon gücü (C_{EP}) kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde kavitasyon sayısı azaldıkça C_{EP} değerlerinin başlangıçta arttığı ve maksimuma ulaştığı, daha sonra ise azalmaya başladığı görülmüştür.

AN INVESTIGATION INTO THE SCALE EFFECTS ON OPEN WATER, CAVITATION AND EROSION CHARACTERISTICS OF MARINE PROPELLERS

SUMMARY

Global Warming is one of the most important problems threatening our world today. The International Maritime Organization (IMO) aims to reduce the emission gases emitted from ships, which is one of the causes of global warming, with a number of rules and regulations. It is extremely important to increase the propulsion efficiency in order to reduce the gase of emissions and operating costs of ships. The propulsion efficiency of a ship is based on performance characteristics of a propeller in open water and behind the ship. The propulsive efficiency and propulsion factors are usually obtained either by open water and self-propulsion tests or numerical calculations (CFD). Since it is not possible to carry out these tests at full scale, ships and propellers are scaled down a certain rate, and tests are carried out in towing tanks and cavitation tunnels.

A proper propeller design is important to obtain high propulsive efficiency and the hydrodynamic performance of the propellers is usually determined by the the model test results or CFD results. As Reynolds numbers similarity between the model and the full scale propeller cannot be satisfied, flow similarity cannot be achieved. While at the full scale the flow is completely turbulent, at the model scale laminar, transitional zone and turbulent zones are observed. For this reason, results for the full scale and model scale differ and this is expressed as scale effect. Within the scope of this study, the scale effect of the propeller for open water, cavitation and erosion formation at different model scales and at full scale are computationally investigated. In Chapter 1, a literature review for scale effect studies of open water and cavitation formation is included.

All of the analyzes (for open water, cavitation and erosion characteristics of the propeller) performed within the scope of the study were carried out using Computational Fluid Dynamics (CFD). In this context, in Chapter 2, information on CFD methods, turbulence modeling, cavitation flow modeling methods, cavitation models and cavitation erosion estimation methods are given. In addition, detailed information is given for the k-ω SST turbulence model used within the scope of the study.

Hydrodynamic similarities between the full scale and model scale, extrapolating model scale results to full scale, and different methods for calculating the scale effect for open water analysis are given in Chapter 3. In addition, non-dimensional parameters to be satistified for open water, cavitation and erosion studies are included in this section. Moreover, detailed information is given about the ITTC 1978 procedure used to compare CFD results in open water analysis.

With Chapter 4, the computational part of the study was started with open water analysis. In Section 4.1, the characteristics of the DTMB 5415 propeller used in the study are given for 3 different scales and full scale. In Chapter 4.2, the methodology of the computational work, the details of the computational zone, and the boundary conditions are discussed. In computational studies, mesh has a very important effect on the results. The mesh in the boundary layer, the cell aspect ratio, the density of the mesh are the issues that need to be taken care of when creating the mesh. In Chapter 4.3, the details of the mesh formation and mesh views at all scales are given for open water analysis.

In the scale effect study, it is very important for the results to be independent of the mesh for proper comparison. In this context, the mesh independence study was carried out at 3 different scales and full scale for the thrust coefficient (K_T), and the uncertainty of the mesh was calculated using the GCI. The mesh independence study is discussed in detail in Chapter 4.4.

In Chapter 4.5, flow conditions examined at all scales in open water analyzes are given. Open water analyzes were carried out at advance numbers between 0.2-0.8. It is important to perform a validation study to demonstrate the accuracy of the CFD study. In this context, the validation study of the 173 mm diameter model propeller, which has open water test results in the literature, is given in Chapter 4.6. The results obtained as a result of the analyzes and the y+ distributions on the blade are shown in Chapter 4.7.

Results from the model scales and those from the full scale are compared in Chapter 4.8. The scale effect was calculated for 3 different model scales with CFD methods and ITTC 1978 method. ITTC 1978 method and HAD method results are given comparatively. Considering the results, it was seen that the ITTC 1978 method calculated the scale effect lower than the HAD for all scales. In addition, in CFD methods, the scale effect increased at high advance numbers.

In Chapter 5, computational cavitation and erosion formation analyzes are introduced. The methodology of the computational work, the details of the computational region, and the boundary conditions are discussed in Chapter 5.1. Similar to open water analysis, the importance of mesh in cavitation and erosion formation studies is much greater. Cell aspect ratios, mesh in the boundary layer, density of the mesh are the points to be considered while creating the mesh. In the scale effect study, the aspect ratios on different scales were kept similar. In Chapter 5.2, the average aspect ratios at all scales, the mesh appearances and the mesh appearance on the propeller surface are given.

The flow conditions examined in the cavitation and erosion formation analyzes are given in Chapter 5.3. In all scales, 4 different situations were examined. In addition, in order to examine the relationship between cavitation number and erosion power in erosion analyses, analyzes were performed for 246.4 mm diameter propellers in 3 different cases.

Mesh dependency analysis, which is very important in scale effect studies, was performed in Chapter 5.4. In addition, the study was carried out to show that the results are independent of the time step. Mesh and time dependency studies were carried out for the thrust coefficient (K_T) and surface cavitation area. The uncertainty of the mesh and time step was calculated using GCI.

It is shown in Chapter 5.5 on the propeller surface that the y+ values for cavitation and erosion formation are retained in the viscous sublayer at model scales and in the logarithmic sublayer at full scale.

In the cavitation analysis results, the thrust, torque and surface cavitation area results were nondimensionalized and the scale effect was examined. The results are compared for the 4 different situations examined in Chapter 5.6. In all cases examined, it has been determined that as the model diameter increases, the surface cavitation area increases and the torque coefficient (K_Q) decreases. The thrust coefficient (K_T) increased, except for Case 1. In this chapter, the cavitation inception has also been examined in the model scales. From the results obtained, it has been determined that as the model size increases, cavitation inception begins to be seen at larger cavitation numbers.

In Chapter 5.7, the scale effect for erosion estimates is examined. While examining the scale effect, the average erosion power values on the propeller blades were used and these values were nondimensionalized for comparison. From the results obtained, it was observed that the dimensionless average erosion power (C_{EP}) decreased as the model size increased. This indicates that the propeller is eroded more than full scale on model scales.

The relationship between cavitation number and erosion power is discussed in Chapter 5.8. When the results were examined, it was seen that as the cavitation number decreased, the C_{EP} values increased at the beginning and reached the maximum, and then started to decrease.

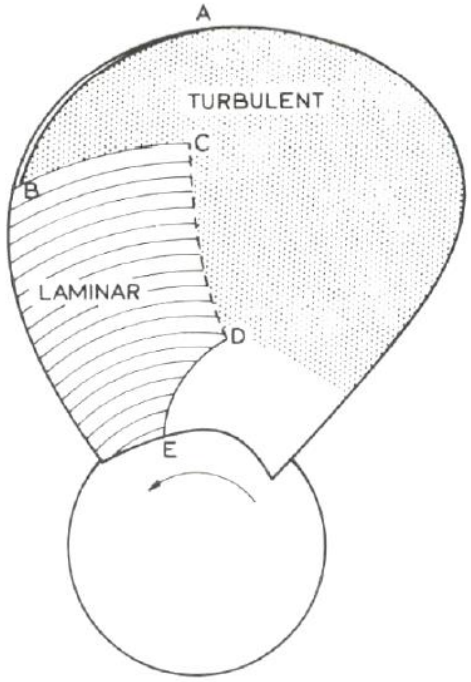
1. GİRİŞ

Günümüzde küresel ısınma ya da iklim değişikliği dünyamızı tehdit eden en önemli sorunlardan biridir. Küresel ısınmanın nedenlerinden bir tanesi ulaşım araçlarından salınan zararlı gazlardır (Shahzad, 2015). OECD verilerine göre dünya ticaretin yaklaşık %90'ı deniz taşımacılığı ile sağlanmaktadır (URL-3). Bu da gemilerden salınan emisyon gazlarının küresel ısınma üzerindeki etkisine dikkat çekmektedir. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) gemilerden salınan emisyon gazlarının azaltılması amacı ile bir takım düzenlemeler, kurallar getirmiştir. Gemilerden salınan karbondioksit gazlarına sınırlama getirmek amacıyla, Enerji Verimliliği Dizayn İndeksi (EEDI) her gemi için için hesaplanacak olup, bu değer IMO'nun belirlediği takvime göre düşürülecektir (IMO, 2011). EEDI hesabında geminin makine gücü, yakıt tüketim miktarı gibi parametreler bulunmaktadır. Bu nedenle ve işletim maliyetleri nedeniyle gemi sahipleri için makine gücünün ve yakıt tüketiminin düşürülmesi önemli bir hale gelmektedir. Gemilerde form optimizasyonu ve sevk veriminin artırılması bunun anahtarıdır.

Gemilerin genel sevk verimi, gemilerde kullanılan pervanenin açık su ve gemi arkasında pervanenin olduğu sevk durumları deneysel ve hesaplamalı (HAD) olarak belirlenir (Gonzalez-Adalid ve diğ, 2014). Tam ölçekte bu testlerin yapılması imkansızdır. Bu nedenle gemi modelleri ve pervaneler belirli bir oranda ölçeklendirilerek küçültülür, çekme havuzlarında ve/veya kavitasyon tünellerinde testlerinin gerçekleştirilmesi sağlanır. Model deneyleri ve hesaplamalı çalışmalar, gemilerin ve pervanelerin hidrodinamik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir unsurdur (Szantyr, 2006).

Gemilerin genel sevk veriminin arttırılmasında pervane dizaynı en önemli parametredir. Gemi pervanelerinin hidrodinamik performansları model deneyinden ve hesaplamalı çalışmalardan (HAD) elde edilen sonuçlara göre belirlenir. Ancak gemi pervanelerinde model ile tam ölçek arasında geometrik benzerlik olmasına rağmen, farklı Reynolds sayıları (Re) nedeni ile hidrodinamik benzerlik tam olarak sağlanamaz (Bugalski ve diğ, 2013). Model ve tam ölçekte pervane için Reynolds sayısının (Re)

farklı olması akış rejimlerinin farklı olduğunu gösterir. Tam ölçek pervanede Re sayıları yüksek olduğu için akış tamamen türbülanslı iken model ölçeğinde Re sayısı düşük olduğu için akışta laminar, geçiş bölgesi ve türbülanslı bölge görülür (Rijpkema ve diğ, 2015). Model ölçeğinde akışın laminar bölgede kalması nedeniyle laminar akış ayrılması görülür. Tam ölçekte ise bu durum söz konusu değildir. Model pervane üzerinde laminar, geçiş bölgesi veya türbülanslı bölgeyi görüntülemek için boya testleri kullanılabilir. Kuiper (1981) model pervane üzerinde yaptığı çalışmada akış bölgelerini görüntülemiştir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 : Model ölçeği pervane emme kısmı akış rejimleri (Kuiper, 1981).

Akış rejiminin farklı olması model ve tam ölçek arasında sonuçların farklı olmasına neden olacaktır ve literatürde bu farklılık ölçek etkisi olarak ifade edilmektedir. Ölçek etkisi nedeni ile pervane model deneyinden elde edilen sonuçlar uygun yöntemlerle tam ölçeğe ekstrapole edilmelidir (Streckwall ve diğ, 2013).

Pervanelerde ölçek etkisi, açık su ve kavitasyon olarak iki başlık altında incelenebilir. Açık su ölçek etkisinin hesaplanmasında literatürde çeşitli yöntemler mevcuttur (Helma ve diğ, 2018). Bu yöntemlerden en popüler olanları ITTC 1978 yöntemi ve HAD yöntemleridir. ITTC 1978 yöntemi istatiksel bir yöntemdir ve ölçek etkisini pervanenin Re sayısına, kanat kalınlığına, kord uzunluğunun ve pervane hatvesinin çapa oranına bağlı olarak hesaplar (ITTC, 2017). Ancak bu yöntem özellikle

konvansiyel olmayan pervanelerdeki ölçek etkisini doğru tahmin edemez (Krasilnikov ve diğ, 2009). HAD yöntemleri ise günümüzde popüler olarak kullanılmaktadır. HAD metotları model ölçeğinde ve tam ölçekte analizlere olanak sağlar, ölçek etkisinin incelenmesinde sıkça tercih edilir (Krasilnikov ve diğ, 2009). HAD yöntemlerinde RANS türbülans modellemesi sıkça kullanılırken, DES ve LES türbülans modelleri günümüzde tercih edilmeye başlanmıştır.

Kavitasyon için tam ölçek ve model ölçeğinde benzerliğin sağlanabilmesi için kinematik benzerliğin yanısıra kavitasyon sayılarının aynı olması gerekmektedir. Ancak kavitasyon yalnızca tek bir parametre ile ölçeklenemeyecek kadar karmaşık yapıdadır (Szantyr, 2006). Model ve tam ölçekte basınç dağılımlarının aynı olmaması, sınır tabaka özelliklerinin farklı olması, zaman ve hız ölçeklerinin farklı olması ve ortam koşullarının farklı olması kavitasyonda ölçek etkisine neden olan unsurlardır (Szantyr, 2006). Ayrıca kavitasyon başlangıcı da model ve tam ölçek arasında akış rejimlerinin farklı olması nedeni ile farklılık gösterir. Kavitasyon başlangıcı üzerinde serbest akım türbülansı, ölçek etkisine katkıda bulunan en önemli parametrelerden biridir (Korkut ve diğ, 1999).

Kavitasyon erozyonu, kavitasyon kabarcıklarının patlaması ile pervane yüzeyini aşındırması, zarar vermesidir. Turker ve Kuiper (2004) erozyon oluşması için kavitasyonun, yüzeye çok yakın bir yerde oluşmasına, kavitasyon kabarcığının yüksek hızla patlamasına ve küçük bir alanda patlamanın gerçekleşmesine bağlı olduğunu belirtmiştir. Kavitasyon oluşumuna bağlı olarak ortaya çıkan kavitasyon erozyonunda da ölçek etkisi etkin rol oynar.

Gelişen bilgisayar teknolojisi ve kavitasyon modelleri ile birlikte günümüzde kavitasyon ve kavitasyon erozyonu için ölçek etkisinin belirlenmesinde HAD yöntemleri popülerdir.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışması kapsamında DTMB-5415 pervanesinin üç farklı model ölçeğinde ve tam ölçekte açık su, kavitasyon ve erozyon oluşumu analizleri hesaplamalı olarak gerçekleştirilerek, model ve tam ölçek arasında açık su değerlerinde (K_T, K_Q, η_0), kavitasyon ve kavitasyon başlangıcında ve özellikle erozyon şiddeti üzerinde ölçek etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Ölçek etkisi üzerindeki çalışmalar uzun yıllardır devam etmektedir ve bu konu araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Gemi modellerindeki ve model pervanelerdeki ölçek etkisi kavramı uzunca yıldır bilinmesine ve Ackeret (1930) tarafından bahsedilmesine rağmen standart bir prosedüre sahip değildir. Araştırmacılar bu konu üzerinde uzunca bir süre araştırma yapmışlar ve bir dizi amprik ölçek etkisi yöntemini, ITTC (1951) konferasında önermişlerdir. Bu yöntemler üzerinde yıllarca çalışılmış ve ITTC (1978) komitesi tarafından açık su değerleri için ölçek etkisi prosedürü ortaya koyulmuştur. Bu prosedür istatiksel çalışmalar neticesinde K_T ve K_Q değerlerindeki ölçek etkisini amprik olarak hesaplar ve model deneyinde elde edilen değerleri tam ölçeğe taşır. ITTC 1978 metodu konvansiyonel pervaneler için mühendislik uygulamalarında kabul edilebilir sonuçlar verse de, HAD'ın gelişmesi ile birlikte araştırmacılar ölçek etkisini hesaplamalı olarak incelemişlerdir. Stainer (1998) RANS kodu ile yaptığı çalışmada, aynı pervanenin simetrik ve yüksek çalıklığa sahip iki tipini ele almış ve ölçek etkisinin her iki pervanede farklı olduğunu ortaya koymuştur. Krasilnikov ve diğ. (2009) RANS çözücüsü ile yapmış olduğu çalışmada aynı pervanenin farklı çalıklıklarını, kanat yüklemesini ve kanat alan oranını ele almışlardır ve ölçek etkisinin tamamen pervane geometrisine bağlı olduğunu belirtmiştirlerdir. Hamburg Ship Model Basin (HSVA) ve Ship Design and Research Centre (CTO, SA) birlikte gerçekleştirdikleri çalışmada, kavitasyon tünelinde ve çekme tankında pervane ölçek etkisini incelemişlerdir (Bugalski ve diğ, 2013). HSVA ölçek etkisini hesaplamak için dilim teorisine dayalı yeni bir prosedür ve CTO SA ise itme ve tork için ölçek etkisini hesaplayan yeni bir formül ortaya koymuştur. Streckwall ve diğ. (2013) yapmış olduğu çalışmada açık su sonuçlarının tam ölçeğe eksrapole edilmesi için sürtünme hattına dayalı bir dilim teorisi yöntemi geliştirmişlerdir. Sürtünme çizgisi, birkaç farklı pervane geometrisi ve kurulumu için doğrudan RANS hesaplamalarından türetilmiştir. Bu yöntem ile tam ölçeğe taşınan sonuçlar seyir deneyinden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde iyi sonuç vermiştir. Gonzalez-Adalid ve diğ. (2014) CLT pervaneler için ölçek etkisini RANS, dilim teorisi, Panel metot, birleştirilmiş metot (SISTEMAR) ve ITTC 1978 yöntemi ile hesaplamışlar ve elde edilen sonuçları seyir deneyi ile karşılaştırmışlardır. Geminin 23 knot hızında seyir deneyinden elde edilen güç değeri ile SISTEMAR ve dilim teorisi %1, RANS %4, Panel metot %9 ve ITTC 1978 yöntemi %13 farklıdır. Helma (2015) yapmış

olduğu çalışmada yeni bir ekstrapolasyon metodu ortaya koymuştur. Bu yöntem eş değer profil konseptini kullanr, pervane geometrisinden ve kanat yüklemesinden tamamen bağımsızdır. Shin ve Andersen (2017) konvansiyonel ve kanat ucu değiştirilmiş (tip modified) bir pervanenin açık su performansını, HAD ile RANS ve geçiş modelleri kullanarak model ve tam ölçekte incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre konvansiyonel ve kanat ucu değiştirilmiş pervanede K_T ve K_Q değerleri tam ölçekte artmıştır. Ancak K_T'deki artış K_Q'dan fazla olduğu için verimde artmıştır. Kanat ucu değiştirilmiş pervanede K_T'nin artışı konvansiyonel pervaneye göre daha fazladır. Dong ve diğ. (2018) pervane eğikliğinin ölçek etkisi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. PPTC-II ve eğiklik verilen PPTC-IIm pervanesini RANS k-ω türbülans modeli ile tam ve model ölçeğinde hesaplamalı olarak analiz etmişlerdir. HAD'dan elde edilen ölçek etkisi değerleri ITTC yöntemine çok farklıdır ve ITTC yöntemi ölçek etkisini daha düşük hesaplamıştır.

Kavitasyon için ölçek etkisi çalışmalarına bakıldığında ise ITTC, 1970'li yıllarda hidrofoiller üzerinde ölçek etkisinin kavitasyon başlangıcına etkisini incelemiştir. Keller (2001) hidrofoiller ile yaptığı çalışmada boyut ölçek etkisini, hız ölçek etkisini vb. durumları 50 mm, 100 mm ve 200 mm kord boyuna sahip profillerde incelemiştir. Aynı kavitasyon sayısında model boyu büyüdükçe daha fazla kavitasyon gözlemlenmiştir ve bu durum model boyu büyüdükçe kavitasyon başlama kavitasyon sayısının arttığını ifade etmektedir. Szantyr (2006) yaptığı çalışmada ölçek etkisini statik basınç dağılımı, ortam koşulları, sınır tabaka, hız ölçekleri ve boyut olarak beş kategoride incelemiştir. Yapılan bu çalışmada statik basınç dağılımının kavitasyon başlama ve gelişiminde kaçınılmaz bir etkisi olduğu ortaya konmuştur. Yang ve diğ. (2012) 7 kanatlı 250 mm, 500 mm ve 1000 mm çapında pervanede RANS metodu ile kavitasyon ölçek etkisi üzerinde çalışmışlardır. Yapılan çalışmalarda aynı kavitasyon sayısında model boyu büyüdükçe K_T'nin arttığı, K_Q'nun azaldığı, kanat yüzeyini kaplayan kavitasyon alanının toplam alana oranının arttığı ve kavitasyon görülmeye başlama kavitasyon sayısının büyüdüğü görülmüştür. Nominal iz altında da aynı durum gözlenmiştir. Viitanen ve diğ. (2020) model ölçeğinde ve tam ölçekte RANS ve DES modellemesi ile kavitasyon için ölçek etkisini incelemişlerdir. Tam ölçekte model ölçeğine göre K_T değerinin arttığını, K_Q değerinin azaldığını ve kavitasyonun arttığını belirtmişlerdir.

Kavitasyon erozyonu üzerine yapılan çalışmalar 1950'li yıllarda başlamıştır. Deneysel gerçekleştirilen çalışmalarda malzeme üzerinde kavitasyon ve buna bağlı oluşan kavitasyon erozyonun hangi koşullarda zararlar verdiği incelenmiştir. Kavitasyon erozyonu için sayısal analiz çalışmaları Nohmi ve diğ. (2008) ile başlamıştır. Bu çalışmada kavitasyon erozyonu kabarcıkların basınç değişimine ve hareketine bağlıdır. Li ve diğ. (2012) çalışmasında hidroiller için bir erozyon tahmin fonksiyonu olan ve anlık basınç değişimine dayanan Yoğunluk Şiddeti Yöntemini (IFM) ortaya koymuştur. Bu tez çalışmasında kavitasyon erozyonunu tahmin etmek için kullanılan Erozyon Gücü Yöntemi (EPM) ilk kez Usta (2018) doktora çalışmasında pervanelerde kavitasyon erozyonu tahmini için kullanılmıştır. Bu çalışmada erozyon gücü yöntemi için hesaplamalı çalışmalardan elde edilen sonuçlar deneyle uyumlu bulunmuştur.

1.3 Kavitasyon ve Kavitasyon Erozyonu

Kavitasyon sıvı akışkandaki ani hızlanma nedeniyle basıncın buhar basıncının altına düşmesidir. Bu yüzden akışkanın içerisinde küçük gaz kabarcıkları oluşur. Kavitasyon fenomeni pompa, türbin, pervane gibi yapılarda meydana gelir ve günlük hayatta sıkça karşımıza çıkar.

Akışkanda buharlaşma iki şekilde olur. İlki ve en çok bilineni sıcaklığın artmasıdır. Diğeri ise soğuk kaynama dediğimiz sıcaklığın değişmediği basıncın azaldığı durumdur. Kavitasyonun oluşması için sıvı içerisinde çapları 1-100 mikron arasında gaz ve buhar içeren kabarcıklar olmalıdır (Vallier, 2013). Eğer kabarcık iç basıncı dış basıncından büyük olursa, kabarcık büyümeye başlar. Bu kabarcıkların malzeme üzerinde ya da yakınında patlaması ile malzeme yüzeyi zarar görür ve aşınır (Yuskiva ve diğ, 2020). Buna kavitasyon erozyonu denir.

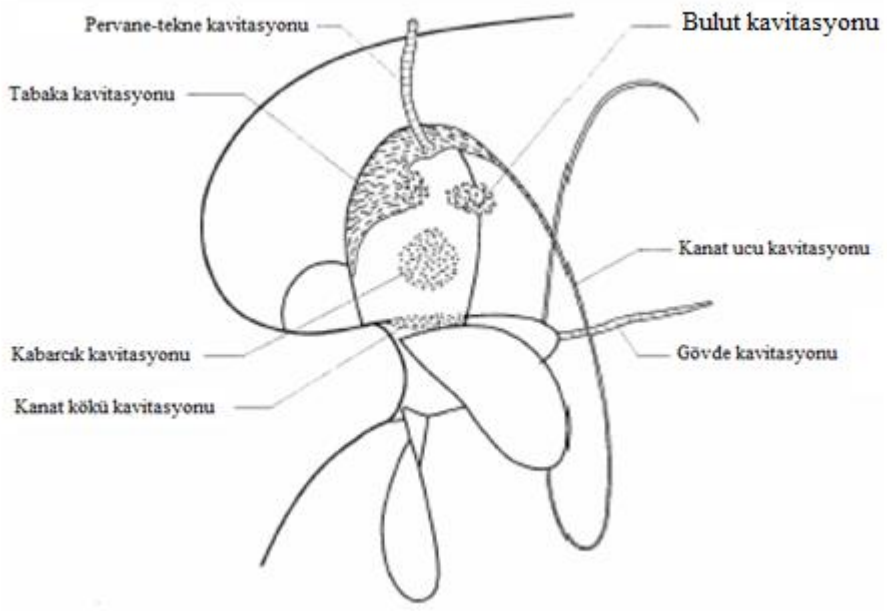
Gemi pervanelerinde kanat profili etrafındaki hızlar kavitasyona neden olabilir. Hidrostatik basınç nedeniyle alt konumdaki bir kanat üzerindeki toplam basınç, üst konumdakinden yüksek olacaktır. Bu nedenle kavitasyon kabarcıklarının oluştuğu ve patladığı bölgeler mevcuttur (Bertram, 2012).

Kavitasyonun gemiler üzerinde olumsuz etkileri mevcuttur. Pervane kanadının % 20-25 ve daha fazlası kavitasyonla kaplı ise pervanenin itme ve torku düşer. Ancak küçük miktarda kavitasyonun pervane kanadına olumsuz bir etkisi olmayacağı gibi olumlu etki bile söz konusudur (Li, 2012). Kavitasyonun diğer bir olumsuz etkisi ise

kavitasyon kabarcıklarının aniden patlaması nedeniyle akustik gürültünün meydana gelmesidir (Kuiper, 1981). Askeri gemilerde bu problem önemlidir. Diğer olumsuz etken ise kavitasyon kaynaklı titreşimdir. Kavitasyonun yapısı gereği oluşan basınç dalgalanmaları nedeniyle titreşim meydana gelir (Kuiper, 1981). Eğer titreşim frekansı gemininki ile eşitlenirse rezonans oluşur ve bu durum çok tehlikelidir. Kavitasyonun olumsuz etkilerinden bir diğeri ise yukarıda da ifade edilen kavitasyon erozyonudur. Bu etki kavitasyonun en tehlikeli, en zararlı ve en masraflı problemidir. Eğer pervane yüzeyi zarar görürse, gemide titreşim, gürültü ve performans kaybı meydana gelir.

Gemi pervanelerinde aşağıda verilen kavitasyon tipleri görülebilir (Carlton, 2018). Şekil 1.2'de bu kavitasyon tipleri gösterilmiştir.

- Kanat ucu ve kanat gövdesi vorteks kavitasyonu (Tip and Hub vortex cavitation)
- Tabaka kavitasyonu (Sheet cavitation)
- Kabarcık kavitasyonu (Bubble cavitation)
- Kök kavitasyonu (Root cavitation)
- Pervane-tekne kavitasyonu (Propeller-Hull vortex cavitation)
- Bulut kavitasyonu (cloud cavitation)



Şekil 1.2 : Gemi pervaneleri kavitasyon tipleri (ITTC, 2002).

Tabaka kavitasyonu, basınç dağılımı güçlü bir ters basınç gradyanına sahip olduğunda ve akış ayrılmasında meydana gelir. Kanat kesitleri pozitif hücum açısında iken, ilk olarak pervane kanatlarının emme kısmında, önder kenarda tabaka kavitasyonu belirginleşir. Eğer kanat kesitleri negatif hücum açısına sahip ise pervane yüzünde tabaka kavitasyonu görülür (Carlton, 2018).

Kanat ucu ve gövdesi vorteks kavitasyonu basıncın çok düşük olduğu girdapların çekirdeğinden üretilir. Bu basınç, buhar basıncından daha düşük olduğunda bu kavitasyon tipi meydana gelir (Kuiper, 2006).

Kabarcık kavitasyonu, kanat kesitinin kord orta bölgesinde yüksek emme basıncına neden olan basınç dağılımından etkilenir. Bu nedenle, kamber çizgisi ve kesit kalınlığının kombinasyonu, bir pervanenin kabarcık kavitasyonuna duyarlılığı üzerinde önemli bir rol oynar (Kuiper, 2006).

Kanat kökü kavitasyonu kama şeklinde olup kanat kökünde meydana gelir. Kamanın üstü önder kenarda olabilir, ancak kanadın kendisinde de başlayabilir (Kuiper, 2006).

Pervane-tekne kavitasyonu 1970'li yılların başında ortaya konulmuştur. Pervane ile gemi tekne yüzeyi arasındaki küçük açıklıklar nedeniyle meydana gelir.

Bulut kavitasyonu, sıklıkla güçlü gelişmiş tabaka kavitasyonun arkasında arkasında ve genellikle küçük girdapların, küçük kavitasyonun kaynağını oluşturduğu orta derecede ayrılmış akışta bulunur. Bu tür kavitasyon, çok küçük kabarcıklardan oluşan bir sis veya "bulut" olarak görünür (Carlton, 2018).

2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD)

Akışkanlar dinamiği akış hareketlerini, deneysel, teorik ve hesaplamalı (sayısal) olarak üç farklı yolla inceleyen bir bilim dalıdır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akışkan ile cisim arasında etkileşim olan tüm problemlerin, temel akışkan denklemleri (Navier- Stokes denklemleri, enerji denklemleri ve bu denklemlerden türetilen diğer denklemler) kullanılarak sayısal yöntemlerle çözülmesidir (Kundu ve Cohen 2002). HAD, bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile kullanılmaya başlanmış ve özellikle yüksek hızlı bilgisayarların ortaya çıkmasıyla deneysel ve teorik yöntemlere göre daha fazla tercih edilmiştir. Günümüzde denizcilik, otomotiv, savunma sanayi, havacılık, tıp gibi bir çok alanda kullanılan HAD, iç ve dış akış, ısı analizleri, çok fazlı akışlar, türbülans modelleme gibi akış problemlerinde kullanılmaktadır. HAD'ın çok fazla tercih edilmesinin nedeni zaman ve maliyet açısından değerlendirilebilir. Deneysel çalışmalarda deney düzeneğinin hazırlanması ve deneylerin gerçekleştirilmesi genellikle uzun zaman alır. HAD bu problemi genellikle çok kısa sürede çözer. Maliyet açısından değerlendirildiğinde ise HAD için ilk yatırım maliyeti yüksek olmasına karşın uzun süreli çalışmalarda, deneysel çalışmalardaki maliyet çok daha yüksektir.
Bu çalışma kapsamında bir gemi pervanesinin model ve tam ölçekte açık su analizleri, kavitasyon oluşumu ve erozyon şiddeti analizleri HAD paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HAD çalışmalarından elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmalar karşılaştırılmıştır.
Bu bölümde, HAD çalışmalarında kullanılan ayrıklaştırma yöntemi, türbülans modellemesi, kavitasyonlu akışın modellenmesi, kavitasyon modellemesi ve kavitasyon erozyonu tahmin yöntemlerinden bahsedilecektir.

2.1 Sonlu Hacim Ayrıklaştırması

Navier Stokes, enerji ve diğer denklemlerin sayısal olarak çözülebilmesi için ayrıklaştırma yapılması gerekmektedir. Ayrıklaştırma işlemi için, sonlu elemanlar, sonlu farklar ya da sonlu hacim yöntemleri ortaya çıkmıştır (Ferziger ve Peric, 2002).

Sonlu hacim yönteminde hesaplama bölgesi kontrol hacimlerine ayrılır ve taşınım denklemleri her bir kontrol hacmine uygulanır ve böylece korunumlu halde denklemler elde edilmiş olur. Hücre yüzeylerinden geçen akı miktarı sıfır olduğu için her bir eleman içinde taşınım denklemlerinin korunumu sağlanmış olur (Hoffmann ve Chiang, 2000).

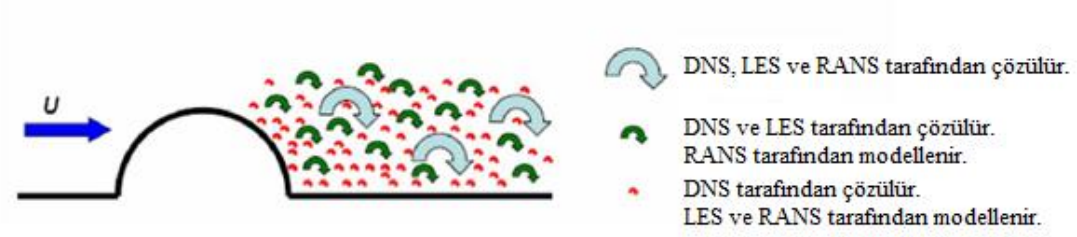
2.2 Türbülans Modellemesi

Türbülans bir çok mühendislik alanında ve doğada karşımıza çıkan, düzensiz, dağınık, zamana bağlı, üç boyutlu, yüksek derecede lineer olmayan yapıda ve girdaplılık içeren, tersinmez bir akış hadisesi olarak tanımlanabilir. Türbülansı matematiksel terimlerle açıklamak kolay olmasa da hız alanındaki çalkantılar olarak ifade edilebilir.

Türbülanslı akış Navier - Stokes yöntemleri ile sayısal olarak doğrudan çözülebileceği gibi modelleme yardımı ile de çözülebilir. Türbülansın modellenmesinde, uzaysal ve zamansal ölçekler sınırlanarak türbülansın ortalama özelliklerini ortaya koyabilmek amacıyla Navier – Stokes denklemlerinin yaklaşık ve basitleştirilmiş çözümleri aranır. Temel olarak Direkt Sayısal Simülasyon (DNS), Büyük Girdap Simülasyonu (LES) ve Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) olmak üzere üç tip modellemeden bahsedilebilir (Zhao, 2015). DNS yönteminde sayısal çözüm ağı sık ve düzgün bir şekilde oluşturularak, tüm türbülans ölçeklerindeki girdap Navier-Stokes denklemleri ile direkt olarak çözülür (URL-4). Bu yöntem ortaya çıkan yüksek hücre sayısından dolayı ciddi bilgisayar gücüne ihtiyaç duymaktadır. Bilgisayar kapasitelerin artmış olduğu günümüzde, akademik alanlarda kullanılmaktadır. LES yöntemi ise DNS yöntemine göre çok küçük ölçekteki girdapları çözmek yerine onları modellemektedir. RANS yönteminde ise Navier-Stokes denklemleri zaman ortamaları olarak çözünür ve küçük ve orta ölçekteki girdaplar modellenir (Sodja, 2007). RANS yönteminde hesaplama maliyeti diğer iki yönteme göre en azdır. Günümüzde RANS ve LES yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de üç yöntemin türbülans modellemesi gösterilmiştir.

RANS modeli fazladan bilinmeyen terimler getirdiği için Navier-Stokes denklemlerinin çözümü için yeni ek taşınım denklemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Temel RANS modelleri sıfır ekstra, tek ekstra, iki ekstra ve yedi ekstra taşınım denklemi olmak üzere dört başlık halinde incelenebilir (Alfonsi, 2009). Sıfır ekstra taşınım denklemleri için karışım boyu modeli, tek ekstra taşınım denklemleri için

Spalart-Allmaras modeli, iki ekstra taşınım denklemleri için k-Ɛ ve k-ω modelleri ve yedi ekstra taşınım denklemleri için Reynolds stres modeli mevcuttur. Bu çalışma kapsamında RANS ve iki taşınım denklemli, k-ω türbülans modellemesi kullanılmıştır.



Şekil 2.1 : Türbülans modellerinin şematik gösterimi (Krasilnikov, 2011).

2.2.1 Duvar fonksiyonu

Türbülanslı akış durumunda, duvar etkisinden dolayı akış, büyük ölçüde etkilenmektedir. Duvar sınır koşulu ortalama hız alanını etkilemektedir. Duvara yakın bölgelerde viskoz sönüm teğetsel hız dalgalanmalarını azaltırken kinematik engelleme normal dalgalanmaları azaltır. Bununla birlikte, duvardan uzaklaştıkça, ortalama hızdaki büyük gradyanlar nedeniyle türbülans kinetik enerjisinin üretilmesiyle türbülans hızla artar (Krasilnikov, 2011).

Duvara yakın bölgelerin sayısal olarak yeterli hassasiyette çözülmesi büyük önem taşır. Duvar civarına yaklaştıkça viskoz kuvvetler, atalet kuvvetlerine göre baskındır. Ortalama hızlar yalnızca kinematik viskozite, duvardan uzaklık ve duvar kayma gerilmesine (τ_W) bağlıdır. Duvar civarında laminar ve türbülanslı hareketten oluşan toplam gerilmeler duvar kayma gerilmesine eşittir. Aşağıda bu bağıntıya yer verilmiştir.

$$U^+ = f(y^+) \tag{2.1}$$

Bu ifade de U^+ duvar civarındaki boyutsuz hız değerini, y^+ ise duvardan boyutsuz uzaklığı göstermektedir. U^+ ve y^+ ifadeleri aşağıdaki verildiği gibi hesaplanır.

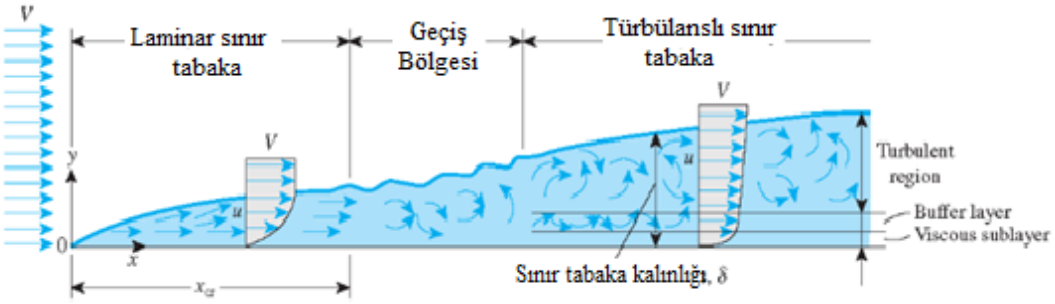
$$U^+ = \frac{U}{u_\tau} \tag{2.2}$$

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \tag{2.3}$$

Bu ifade de ρ akışkan yoğunluğunu, y duvardan uzaklığı, μ kinematik vizkoziteyi ifade eder. u_τ ise boyutsuz sürtünme hızıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_\omega}{\rho}} \tag{2.4}$$

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde duvar bölgesi laminar, geçiş bölgesi, türbülanslı bölge ve türbülans bölge ise viskoz alt tabaka, tampon tabaka ve logaritmik alt tabaka olmak üzere altı bölümde incelenmektedir ve Şekil 2.2'de bu bölgeler gösterilmiştir (Kalitzin ve diğ., 2005).

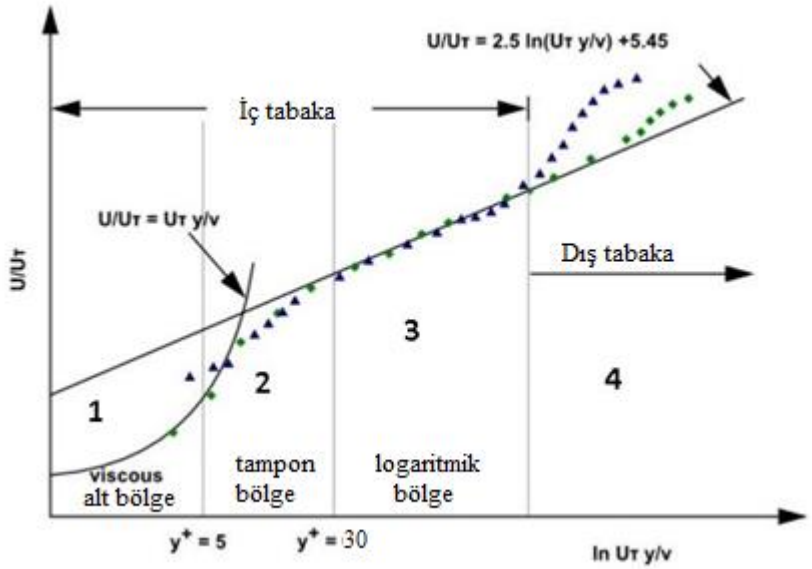


Şekil 2.2 : Sınır tabaka bölgeleri (Schlichting ve Gersten, 2017).

Şekil 2.3'de verilen logaritmik hız profili grafiğinde $y^+ \leq 5$ durumunda viskoz alt tabaka çok ince olduğu için denklem 2.1'e göre $U^+ = y^+$ olarak ifade edilir (White ve Majdalani, 2006). $30 \leq y^+ \leq 500$ aralığı ise Logaritmik bölge olarak tanımlanır ve bu bölgede türbülansın ve türbülansa bağlı gerilmelerin etkili olduğu bölgedir. Bu bölgede, duvar civarındaki boyutsuz hız ifadesi logaritmik duvar fonksiyonu olarak bilinir ve aşağıda verilmiştir.

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln y^+ + C \tag{2.5}$$

$5 \leq y^+ \leq 30$ arasında kalan bölge ise ara (tampon) bölge olarak adlandırılır. Bu tabaka içinde türbülans ve viskoz kuvvetleri etkilidir. Hangi kuvvetin ne oranda etkili olduğu bilinmediği için akış kararsız yapıdadır (White ve Majdalani, 2006).



Şekil 2.3 : y+ grafiği (Fluent Inc, 2014).

Türbülanslı akışlar için ağ örgüsü oluşturulurken duvar sınır koşulu tanımlanan bölgelerin çözüm ağı modelleri özenle hazırlanmalıdır. Türbülans değişkenleri, ilk ağ örgüsünün logaritmik bölgede olması ile farklı, viskoz alt bölgede olması ile farklı değer alır. Viskoz alt tabakaya kadar çözüm yapılması daha doğru sonuç verir ancak $y^+<1$ durumunda, özellikle tam ölçekli çalışmalarda ortaya çok yüksek sayıda hücre çıkmaktadır. $y^+<1$ sağlansa da yan oranlarının dramatik oranda büyümesi yakınsama güçlüklerini ve hassasiyet azalması sorunlarını getirmektedir (Kalitzin ve diğ, 2005). Bu tez kapsamında model pervane hesaplarında, açık su ve pervane analizlerinde $y^+<5$ ve tam ölçekteki çalışmalarda $30 \leq y^+ \leq 500$ sağlayacak şekilde ağ örgüsü oluşturulmuş ve hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

2.2.2 Standart k-ω modeli

Wilcox (1988) iki ekstra taşınım denklemli k-ω türbülans modelini geliştirmiş ve bu modelin k-ε modeline kıyasla sade temellerinin olduğu bahsedilmektedir. Wilcox'a göre, türbülans üzerine araştırmalar yapan Kolmogorov, sezgisel yaklaşımlar ve boyut analizi ile çok karmaşık türbülans disipasyonu taşınım denkleminden modellenen ε yerine, birim kinetik enerjide disipasyon miktarını gösteren ω değişkeni için bir diferansiyel denklem geliştirmiştir. ω kinetik enerjinin yok olduğu bir frekans karakteristiği gibi de düşünülebilir. Türbülans araştırmacıları tarafından ω üzerine birçok çalışma yapılmış ve ω denklemi çok değişik yapıda modellenmiştir. Ancak literatürde Wilcox (1988), standart k- ω modeli olarak yerini almıştır. Wilcox (1991)

ise ω denkleminin modifikasyonları ile elde edilen farklı k-ω modellerinin genel bir incelemesini sunmaktadır.

Araştırmacılar standart k- ω modeli üzerinde çalışmalar yapmışlar ve modelin serbest akım türbülans değerinden oldukça etkilendiğini ortaya koymuşlardır (Menter, 1992a). Standart k- ω modeli sınır tabaka akışlarında k-ε modellerine göre çok başarılıdır.

k-ω modellerinde türbülans kinetik enerjisi taşınım denklemi denklem 2.6'daki eşitliği kullanarak denklem 2.7'de verilmiştir.

$$\omega=\varepsilon/\beta k \tag{2.6}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{\partial(ku_j)}{\partial x_j}=\tau_{ij}\frac{\partial(u_j)}{\partial x_j}-\beta\omega k+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\upsilon+\frac{\upsilon_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{2.7}$$

Türbülans viskozitesinin hesabı denklem 2.8'de verilmiştir.

$$\upsilon_t=\frac{k}{\omega} \tag{2.8}$$

k-ω modellerinde denklemler viskoz alt tabakaya kadar çözülebilir. Bu k-ω modellerinin, k-ε modellerine göre önemli bir avantjıdır. Viskoz alt tabaka içinde, ω için duvardaki sınır şartı denklem 2.9'da verilmiştir.

$$\omega_\omega=\frac{6\upsilon}{\beta_\omega y^2} \tag{2.9}$$

Bu bağıntıda y duvara olan uzaklığı, □□ duvardaki ω değerini ve □□ ise ω denkleminde geçen bir katsayayı ifade etmektedir.

2.2.3 SST k-ω modeli

Menter (1992b) çalışmasında sıfır, yarım, bir ve iki taşınım denklemli (standart k-ω) dört farklı türbülans modelini incelemiştir. Yaptığı çalışmalar neticesinde, standart k-ω modelinin çok gerçekci hız profili verdiğini ancak kalıcı bir biçimde fazla türbülans kayma gerilmesi hesaplandığını belirtmiştir. Menter bunun nedenini, kayma gerilmelerinin adveksiyonu hesaba katmayan girdap viskozitesi için temel ilişki olarak belirtmiştir ve modele yapılan basit bir iyileşme sonuçları önemli ölçüde iyileştirmiştir. Yine Menter yaptığı çalışmada ters basınç gradyanı içeren akışlarda,

türbülans viskozitesinin standart tanımının hatalı sonuçların kaynağı olduğunu belirtmiştir. Menter (1993) çalışmasında ise türbülans viskozitesi hesabında değişiklik yaparak kayma gerilmesinin 0.3 (Bradshaw sabiti) k'dan büyük çıkmamasını sağlamıştır. Yaptığı bu değişikliği sadece sınır tabaka bölgesinde olacak şekilde fonksiyon tanımlamıştır. Denklem 2.8'de verilen türbülans viskozitesinin hesabı aşağıdaki bağıntıdaki gibi değişmiştir.

$$\upsilon_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1\omega;\Omega F_2)} \tag{2.10}$$

Bu bağıntıda a_1 in değeri 0.3'e eşittir. Ω sınır tabaka içinde iki boyutlu bir akış için $\frac{\partial U}{\partial y}$ türevini göstermektedir. F_2 ise sınır tabaka içerisinde 1 ve dışında 0 olan, iki değer arasındaki geçişinde yumuşak biçimde olmasını sağlayan bir fonksiyondur ve aşağıda verilmiştir.

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \tag{2.11}$$

$$\arg_2 = \max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y};\frac{500\upsilon}{y^2\omega}\right) \tag{2.12}$$

Menter (1993) çalışmasında sınır tabaka içerisinde, standart k-ω modelini kullanıp serbest kayma akışlarında ise modelin serbest akım değerlerine bağlılığından kurtulmayı amaçlayarak, taşınım denklemi ω'da çok önemli değişiklik yapmıştır. Denklem, standart k-ε modelinde kullanılan ε taşınım denkleminde değişken dönüşümü yapılarak kullanılmaktadır.Bu sayede standart k−ω modelinde kullanılan ω taşınım denklemine "çapraz difüzyon" isimli terim eklenmektedir. Wilcox (1998) yaptığı çalışmada yapılan değişikliğin sınır tabaka içerisinde çok başarılı olan orijinal k-ω etkilememesi için akıllı bir fonksiyon ortaya koymuş ve bu terimin yalnızca serbest akışlarda ve sınır tabakanın üst bölgelerinde kullanılmasını sağlamıştır. Buna göre SST k−ω modeli, türbülans viskozitesinin hesabında daha önce bahsedilen değişiklik dışında, sınır tabaka içerisinde standart k−ω modelini, serbest kayma akışlarında ise standart k−ε modelini kullanmaktadır. SST modeli için türbülans kinetik enerjisi k ve spesifik disipasyon ω aşağıdaki gibi hesaplanır. Bu tez çalışması kapsamında çalışmada, k-ω modellerinden SST modeli kullanılmıştır.

$$\frac{\partial \mathrm{k}}{\partial t}+\frac{\partial(\mathrm{kU}_j)}{\partial \mathrm{x}_j}=\tau_{ij}\frac{\partial(\mathrm{U}_j)}{\partial \mathrm{x}_j}-\beta\omega\mathrm{k}+\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}_j}\left[\left(\upsilon+\frac{\upsilon_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial \mathrm{k}}{\partial \mathrm{x}_j}\right] \tag{2.13}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t}+\frac{\partial(\omega \mathrm{U}_j)}{\partial \mathrm{x}_j}=\frac{\gamma}{\upsilon_t}\tau_{ij}\frac{\partial(\mathrm{U}_j)}{\partial \mathrm{x}_j}-\beta_\omega\omega^2+\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}_j}\left[\left(\upsilon+\frac{\upsilon_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial \mathrm{k}}{\partial \mathrm{x}_j}\right]+2\left(1-F_1\right)\sigma_{cd}\frac{1}{\omega}\frac{\partial \mathrm{k}}{\partial \mathrm{x}_j}\frac{\partial \omega}{\partial \mathrm{x}_j} \tag{2.14}$$

2.3 Kavitasyonlu Akışı Modelleme Yöntemleri

Gemi pervane kanatlarındaki kavitasyonu tahmin etme yöntemleri, ITTC 26. CFD komitesi tarafından arayüzey izleme (VoF), ayrık kabarcık dinamiği ve arayüzey yakalama yöntemleri (HEM) olarak sınıflandırılmıştır (ITTC, 2014). Arayüzey izleme yöntemi (VoF) viskoz etkilerin olmadığı akışta, zamandan bağımsız bir şekilde yüzeye yapışık tabaka kavitasyonunu tahmin eder. Ayrık kabarcık dinamiği yönteminde kavitasyon, kabarcık çekirdekleri ile basınç alanı değişimi arasındaki bir etkileşim olarak modellenir. Rayleigh Plesset Denklemi ile kabarcık boyutu değişir. Arayüz yakalama yöntemi (HEM), akışın, çok fazlı akışın bir karışımı olduğunu varsayar ve buhar hacmini belirlemek için bir akış çözücüsü ve bir kavitasyon modeli kullanılır (ITTC, 2014). Bu tez çalışması kapsamında tüm hesaplamalı analizlerde Usta (2018) doktora tezinde detaylı olarak açıklanan arayüzey yakalama yöntemi (HEM), kavitasyonlu akışı modellemek için kullanılmıştır.

2.4 Kavitasyon Modelleri

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde kavitasyonlu akışın modellenmesinde pek çok yöntem mevcuttur. Tüm Navier-Stokes denklemi çözücüler, sudaki buhar içeriğinin oluşumunu ve gelişimini tanımlayan bir taşıma denklemine dayalı çok fazlı modelleri benimser (Salvatore ve diğ, 2009). Kavitasyon modellerinin tamamı kabarcık etkilerini dikkate almayan ve kabarcıkların küresel olduğu Rayleigh-Plesset denklemine bağlıdırlar.

Denklem 2.15'de genel haldeki buhar kabarcığı denklemi ve denklem 2.16'da Rayleigh-Plesset denklemi verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_v a\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho_v a u_{v,j}\right)=S_e-S_c \tag{2.15}$$

Bu bağıntıda ρ_v buhar yoğunluğunu, u_v buhar faz hızını, α buhar hacmi oranını, S_e kavitasyon kabarcığının genişleme esnasındaki kütle transferini ve S_c kavitasyon kabarcığının patlama esnasındaki kütle transferini gösterir.

$$R_B = \frac{D^2 R_B}{Dt^2} + \frac{3}{2}\left(\frac{DR_B}{Dt}\right)^2 = \left(\frac{p_B - p}{\rho_l}\right) - \frac{4V_l}{R_B}\frac{DR_B}{Dt} - \frac{2\gamma}{\rho_l R_B} \tag{2.16}$$

Bu bağıntıda ρ_l sıvının yoğunluğunu, ρ_B buharın yoğunluğunu, R_B kabarcık yarıçapını, p_B kabarcık yüzey basıncını, p akışkanın uzak bölgesindeki yerel basıncı ve γ sıvının yüzey gerilmesini göstermektedir.

Denklem 2.16'da yüzey gerilmesi, viskozite ve atalet terimlerinin etkisi ihmal edilir ve basitleştirilmiş Rayleight Plesset denklemi elde edilir (denklem 2.17).

$$\dot{R} = \sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_B - p}{\rho_l}} \tag{2.17}$$

Bu tez çalışması kapsamında hesaplamalı çalışmalarda, Schnerr ve Sauer (2011) kavitasyon modeli kullanılmıştır.

Schnerr ve Sauer (2001), buhar hacmi oranını (denklem 2.18) kavitasyon kabarcıklarının bir fonksiyonu olarak tanımlamıştır. Bu kavitasyon modelinde kavitasyon kabarcıklarının hepsi eş boyutta ve sıvı içerisinde homojen bir dağılım içindedir.

$$a = \frac{n_b \frac{4}{3}\pi R_B^3}{1 + n_b \frac{4}{3}\pi R_B^3} \tag{2.18}$$

Bu ifade de n_b sıvı hacmi içerisinde küçük küresel kabarcıkların sayısını ifade eder. Denklem 2.15'deki buharlaşma ve yoğuşma terimleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$S_e = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m}\frac{3a(1-a)}{R_B}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_v - p}{\rho_l}}, \; p_v \geq p \tag{2.19}$$

$$S_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \frac{3a(1-a)}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}}, p_v \leq p \qquad (2.20)$$

Bu kavitasyon modeli için detaylı bilgi Schnerr ve Sauer (2001) çalışmasında yer almaktadır.

2.5 Kavitasyon Erozyonu Tahmini Yöntemleri

Kavitasyon erozyonunun doğru tahmin edilebilmesi için öncelikle kavitasyon modellemesinin düzgün yapılması gerekmektedir. Kavitasyon ve zamana göre basınç değişimi ile direkt ilişkili olan erozyon, fiziğini tamamen yansıtan sayısal bir modele sahip değildir. Geliştirilen modeller deneylerdeki gözlemlerden, malzeme analizlerinden vb. çalışmalardan elde edilmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde Bark modeli, Fortes-Patella modeli, Dular modeli ve Kato modeli, kavitasyon erozyonu sayısal tahmini için ortaya konmuş modellerdir. Bu modeller ile ilgili ayrıntı Usta (2018) doktora tezi çalışmasında mevcuttur.

Hesaplamalı çalışmalarda kavitasyon erozyonu tahmin fonksiyonları için üç yöntem mevcuttur. Bunlar GLM (Gray Seviye Yöntemi), IFM (Yoğunluk Fonksiyonu Yöntemi) ve EPM (Erozyon Gücü Yöntemi)'dir.

Bu çalışma kapsamında kullanılan Erozyon gücü yöntemi (EPM), GLM ve IFM yöntemlerinin birleşimidir ve kavitasyon ve basınç değişimindeki etkileri kapsar. Kavitasyon kabarcığı patladığında oluşan potansiyel enerji (E_i) aşağıda tanımlanmıştır (Eskilsson ve Bensow, 2015).

$$E_i = V_V (P - P_V) \qquad (2.20)$$

Bu bağıntıda V_V makroskopik kavitasyon hacmini ifade etmektedir. Erozyon gücü (EP) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$EP = (P - P_V) \frac{\partial V_V}{\partial t} + V_V \frac{\partial P}{\partial t} \qquad (2.21)$$

Birim analizi yapıldığında da görüldüğü üzere erozyon şiddetinin birimi, birim alana düşen enerjidir (kg/s^3).

3. GEMİ PERVANELERİNDE ÖLÇEK ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

3.1 Ölçek ve Boyut Analizi

Ölçek, gerçek uzunluk, genişlik, alan vb. birimlerin belirli oranda küçültülmesi veya büyütülmesi işlemidir. Mühendisliğin tüm dallarında, mimarlıkta, coğrafyada ve hayatın tüm alanlarında karşımıza çıkmaktadır. Gemi inşaatındaki deneysel ve hesaplamalı çalışmalarda, gerçek geminin, pervanenin vb. ölçeklendirilerek küçültülmesi ile elde edilen modeller kullanılır. Ölçek değeri, pervane veya model için aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\lambda = \frac{L_S}{L_M} = \frac{D_S}{D_M} \tag{3.1}$$

Bu ifade de L_S gemi boyunu, D_S gemi pervane çapını, L_M model boyunu ve D_M model pervane çapını ifade etmektedir.

Gemi inşaatında deneysel ve hesaplamaları çalışmalarda neden ölçeğe ihtiyaç duyulduğu ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Deneysel çalışmalarda modeller kullanılması, laboratuvar ortamında gemi modeli üzerinde deneyler yapılmasına olanak verir ve bu sayede model ölçeğinde direnç ve sevk katsayılarının hesaplanmasına olanak sağlar (Çengel ve Cibala, 2008). Ekstrapolasyon yöntemleri ile model için kullanılan değerler gemiye taşınır ve gemi için gereken makine gücü bu sayede hesaplanır. Hesaplamalı çalışmalarda ise tam ölçekli yapılan çalışmalar maliyet açısından model kullanımına göre yüksektir. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile son zamanlarda tam ölçekli çalışmalar yapılsa da hala model ölçeğinde çalışmalar yapmak popülerliliğni korumaktadır.

Tam ölçekten model ölçeğine ölçeklendirme yapılırken geometrik, kinematik ve dinamik benzerlik söz konusudur (Çengel ve Cibala, 2008). Geometrik benzerlik, model ve tam ölçekte birbirlerinin karşıtı olan uzunlukların arasındaki sabit bir orandır (Denklem 3.1). Gemi ve modelin her uzunluğu için benzerlik oranı sabittir. Ancak pürüzlülük yüksekliği ve sınır tabaka kalınlığı için bu benzerlik sağlanamaz.

Kinematik benzerlik ise hareketin benzerliği olarak ifade edilebilir. Kinematik benzerlik hem geometrik benzerlik hem de zaman benzerliği içerir. Bu durumda;

$$\frac{\lambda_L}{\lambda_t} = \frac{(L_S/L_M)}{(t_S/t_M)} = \frac{V_S}{V_M} \tag{3.2}$$

Kinematik benzerliğe örnek olarak tam ölçekli pervane ve model pervane için ilerleme hızlarının birbirine eşit olması verilebilir (denklem 3.3).

$$J_M = \frac{V_M}{n_M D_M} = J_S = \frac{V_S}{n_S D_S} \tag{3.3}$$

Dinamik benzerliğin olması için geometrik benzer iki sistemin karşıt noktalarındaki kuvvetler arasındaki oran sabit olmalıdır (Çengel ve Cibala, 2008). Örnek olarak model ölçeğinde ve tam ölçekte atalet kuvvetlerinin ağırlık kuvvetlerine oranı aynı olmalıdır.

Yukarıda da bahsedildiği gibi model ölçeğinde elde edilen değerler kullanılarak tam ölçekte geminin değerleri elde edilir. Bunun için benzerlik koşullarına gerek duyulur. Benzerlik koşulları dinamik benzerlik ve boyut analizi yöntemlerinden birini kullanarak elde edilebilir.

3.1.1 Dinamik yöntem

Dinamik yöntemler için benzerlik koşulları incelendiğinde, akışkan içerisinde bir cisme etkileyen kuvvetler atalet, yerçekimi, viskoz ve basınç kuvvetleridir. Bu kuvvetleri aşağıdaki gibi orantılayabiliiz.

- Atalet kuvvetleri ~ Pv^2L^2
- Yerçekimi kuvvetleri ~ $\rho g L^3$
- Viskoz kuvvetler ~ $\mu v l$

Eğer cisim serbest su yüzeyinde hareket ediyorsa dalga nedeniyle yerçekimi kuvvetleri, viskoz kuvvetlere baskın olur ve bu cisimde atalet ve yerçekimi kuvvetleri etkin olur. Gemi örnek olarak verilebilir.

$$\frac{\text{Atalet}}{\text{Yerçekimi}} = \frac{U^2}{gL} = F_r \tag{3.4}$$

Burada F_r, Froude sayısını ifade etmektedir. Eğer cisim tamamen akışkan içerisinde ise artık viskoz kuvvetler yerçekimi kuvvetlerine baskın olur.

$$\frac{\text{Atalet}}{\text{Viskoz}} = \frac{\rho UL}{\mu} = \text{Re} \tag{3.5}$$

Burada Re, Reynolds sayısını ifade etmektedir.

3.1.2 Boyut analizi

Boyut analizi kullanılarak gemi ve model ölçeğinde boyutsuz katsayılar bulunur ve elde edilen değerler karşılaştırabilir. Hidrodinamik alanındaki fiziksel problemler bağımsız (temel) boyut olarak isimlendirilen kütle (M), uzunluk (L) ve zaman (T) olarak üç birime sahiptir. Bağımsız (temel) büyüklükler dışındaki tüm boyutlar, temel büyüklerden türetilmişlerdir ve türetilmiş büyüklükler olarak isimlendirilirler (Çengel ve Cibala, 2008). Örnek olarak hız, uzunluğun zamana oranıdır (L/T). Boyutsuzluştırmak istenilen bağımlı parametre, n-1 bağımsız parametreye bağlıdır. Bu durumda toplamda n boyutlu büyüklük karşımıza çıkacaktır. Buckingham Pi teorimine göre ise üç temel birim (M, L, T) boyutsuzlaştırma n sayısını, n-3 boyutsuz niceliğe indirger (Çengel ve Cibala, 2008). Boyutsuzlaştırma işlemi yapılırken öncelikle boyutsuzlaştırılacak büyüklüğe bağlı tüm parametreler belirlenmelidir (n). Bir gemi pervanesinin itme değeri aşağıdaki adımlarlar boyutsuzlaştırılır. Öncelikle itme için önemli parametreler belirlenmelidir. Bu parametreler aşağıda belirtilmiştir.

$$T = f(\rho^a, D^b, V^c, g^d, n^e, P^f, \mu^g) \tag{3.6}$$

Bu denklemde ifade edilen sembollerin büyüklükleri ve boyutları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1: İtme için boyut analizi parametreleri.

Büyüklük	Sembol	Boyut
İtme	T	ML/T^2
Tork	Q	ML^2/T^2
Pervane çapı	D	L
Hız	V	L/T
Devir sayısı	n	1/T
Yoğunluk	ρ	M/L^3
Viskozite	μ	M/(LT)
Yerçekimi ivmesi	g	L/T^2
Toplam statik basınç	P	$M/(LT^2)$

Denklem 3.6'daki semboller yerine boyutları yazılırsa denklem aşağıdaki halini alır.

$$\frac{ML}{T^2}=\left(\frac{M}{L^3}\right)^a,(L)^b,\left(\frac{L}{T}\right)^c,\left(\frac{L}{T^2}\right)^d,\left(\frac{1}{T}\right)^e,\left(\frac{M}{LT^2}\right)^f,\left(\frac{M}{LT}\right)^g \tag{3.7}$$

Denklem 3.7'deki bağıntı kullanılarak M, L ve T için ayrı ayrı aşağıdaki bağıntılar yazılır.

$$\begin{aligned} M&:1=a+f+g \\ L&:1=-3a+b+c+d-f-g \\ T&:-2=-c-2d-e-2f-g \end{aligned} \tag{3.8}$$

Bağıntılar düzenlenirse a, b ve c aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} a&=1-f-g \\ b&=2+d+e-g \\ c&=2-2d-e-2f-g \end{aligned} \tag{3.9}$$

Denklem 3.9'daki eşitlikleri denklem 3.7'de yerine yazarsak aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\frac{ML}{T^2}=\left(\frac{M}{L^3}\right)^{1-f-g},(L)^{2+d+e-g},\left(\frac{L}{T}\right)^{2-2d-e-2f-g},\left(\frac{L}{T^2}\right)^d,\left(\frac{1}{T}\right)^e,\left(\frac{M}{LT^2}\right)^f,\left(\frac{M}{LT}\right)^g \tag{3.10}$$

Eşitlik düzenlenirse,

$$\begin{aligned} &\frac{ML}{T^2}=\frac{M}{L^3}L^2\left(\frac{L}{T}\right)^2 f\left[L\left(\frac{L}{T}\right)^{-2}\left(\frac{L}{T^2}\right)\right]^d\left[L\left(\frac{L}{T}\right)^{-1}\left(\frac{1}{T}\right)\right]^e\left[\left(\frac{M}{L^3}\right)^{-1}\left(\frac{L}{T^2}\right)^{-2}\left(\frac{M}{LT^2}\right)\right]^f \\ &\left[\left(\frac{M}{L^3}\right)^{-1}L^{-1}\left(\frac{L}{T}\right)^{-1}\left(\frac{M}{LT}\right)\right]^g \end{aligned} \tag{3.11}$$

Yukardaki denklemde uygun büyüklükleri yerleştirirsek,

$$T=\rho D^2V^2 f\left\{\left(\frac{gD}{V^2}\right)^d\left(\frac{nD}{V}\right)^e\left(\frac{P}{\rho V^2}\right)^f\left(\frac{\nu}{VD}\right)^g\right\} \tag{3.12}$$

$$C_T=\frac{T}{0.5\rho D^2V^2}f\left\{\frac{gD}{V^2},\frac{nD}{V},\frac{P}{\rho V^2},\frac{\nu}{VD}\right\} \tag{3.13}$$

Bu ifade de parantez içerisindeki ifadeler ve C_T boyutsuz katsayılardır. Model ve tam ölçekte bu boyutsuz katsayıların aynı olması gerekir. Son olarak pervane üzerine gelen hız sıfıra yaklaştıkça C_T değerleri sonsuza doğru ilerler. Bunu önlemek için denklem 3.13'te V yerine Nd yazılır.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \tag{3.14}$$

Diğer dört boyutsuz parametre ise $F_r = \frac{V}{\sqrt{gD}}$ Froude sayısını, $R_e = \frac{VD}{\nu}$ Reynolds sayısını, $J = \frac{V}{nD}$ pervane ilerleme sayısını ve $\sigma = \frac{P}{0.5\rho V^2}$ pervane kavitasyon sayısını ifade etmektedir.

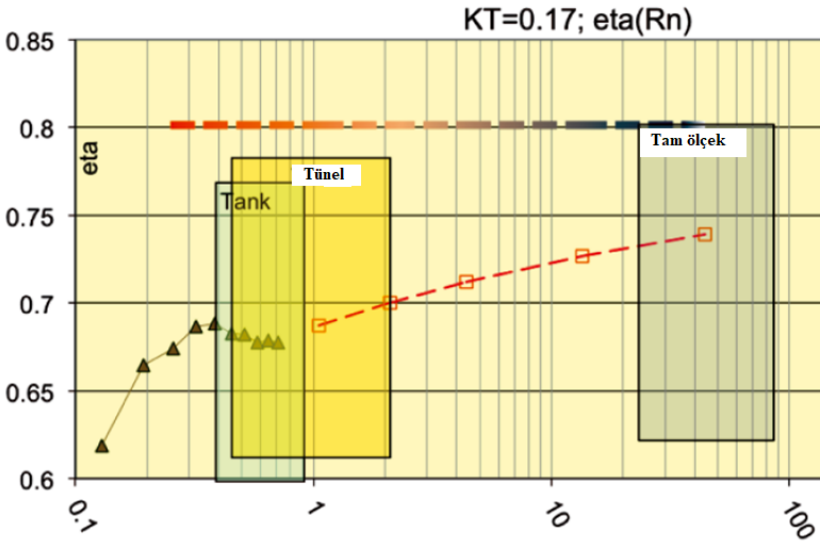
3.2 Gemi Pervanelerinde Ölçek Etkisi

Model ölçeği ve tam ölçek pervane arasında akış benzerliğini elde etmek için K_T ve K_Q değerleri ve Bölüm 3.1'de ifade edilen dört boyutsuz parametre (F_r, R_e, J, σ) aynı olmalıdır. Ancak bu gereklilik sağlanamaz. Model ile tam ölçekli pervane arasında tam hidrodinamik benzerlik sağlanamadığından, pervane modelinin hidrodinamik özelliklerini tam ölçeğe dönüştürmek için uygun metotlarla düzeltmeler yapılması gerekir. Özellikle model ve tam ölçekli pervane arasında R_e sayısının farklı olması belirgin farkları ortaya çıkarır.

Pervane Re sayısı model ölçeğindeki deneylerde tank ve tünelde 10^5 – 10^6 mertebelerindedir. Ancak tam ölçekli pervanede bu değer 10^7 – 10^8 mertebelerindedir. Bu farklılık model ve tam ölçek için K_T ve K_Q değerlerinin aynı olmamasına neden olmaktadır. Bugalski ve diğ. (2013) model ölçeğinde deneysel ve hesaplamalı, tam ölçekte ise hesaplamalı çalışmalarında, R_e sayısına bağlı olarak aynı K_T değerinde açık su veriminin modelden tam ölçeğe doğru arttığını göstermişlerdir.

Pervane açık su testlerinde geometrik ve kinematik benzerliğine göre model ve tam ölçekte, ilerleme katsayısı birbirine eşit olmaldır (denklem 3.3). Model hızı ve gemi hızı arasında Froude benzerliği kullanılır ve aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$V_S = V_M \sqrt{\lambda} \tag{3.15}$$



Şekil 3.1 : Ölçek etkisinin incelenmesi (Bugalski ve diğ, 2013).

Denklem 3.15'i denklem 3.3'te yerine yazarsak model pervane ve tam ölçekli pervane devri arasında denklem 3.16'daki bağıntı elde edilir.

$$n_S = \frac{n_M}{\sqrt{\lambda}} \tag{3.16}$$

Deneyler tam ölçeğe yakın Reynolds sayılarında yapılabilir ise ölçek etkisi talebi azaltılır. Ancak bu durum mümkün değildir. Bu düzeltmelerin yapılmaması durumunda gemilerde istenilen performansların görülememesi olasıdır.

Kavitasyon analizlerinde ise pervane ilerleme sayısı (J) ve kavitasyon sayısı (σ) model ile tam ölçekli pervane arasında aynı olmalıdır. Hız ve devir değerleri için Froude sayısı benzerliği sağlanmalıdır.

3.3 Gemi Pervanelerinde Ölçek Etkisi Yöntemleri

Pervanelerde açık su değerleri için ölçek etkisinin belirlenmesinde çeşitli uygulamalar, yöntemler mevcuttur. Literatürdeki ölçek etkisi yöntemleri istatiksel, analitik, HAD metotları ve bu üç yöntemin birleşimi olmak üzere dört başlık altında toplanabilir (Helma ve diğ, 2018).

3.3.1 İstatiksel metotlar

İstatiksel yöntemler, ölçülen verileri istatiksel analizle elde edilen bir ilişki ile tam ölçek değerlerine taşır. İstatiksel yöntemlerden en çok bilineni ve ölçek etkisi metotları

içerisinde en çok kullanılan metot 1978 ITTC Performance Prediction yöntemidir (ITTC, 2017). Bu çalışma kapsamında da tam ölçekte hesaplamalı çalışmalarla elde edilen değerler, model ölçeğinden ITTC 1978 metodu ile tam ölçeğe taşınan değerler ile karşılaştırılmıştır.

ITTC 1978 metodu, itme ve tork boyutsuz katsayıları K_T ve K_Q'daki değişikliği, kiriş uzunluğunun pervane çapına oranı (c/D), pervane kanat sayısı (Z), hatvenin çapa oranı (P/D), kanat kalınlığının kord boyuna oranı (t/c) ve Re_{c0} sayısı ile ifade eden bir formülasyon içerir. Tam ölçekteki K_{TS} ve K_{QS} değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} K_{TS} &= K_{TM} - \Delta K_T \\ K_{QS} &= K_{QM} - \Delta K_Q \end{aligned} \tag{3.17}$$

Burada kullanılan S indisleri tam ölçeği, M indisleri model ölçeğini ifade etmektedir. ΔK_T ve ΔK_Q değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} \Delta K_T &= -\Delta C_D 0.3 \frac{P}{D}\frac{cZ}{D} \\ \Delta K_Q &= \Delta C_D 0.25 \frac{cZ}{D} \end{aligned} \tag{3.18}$$

Bu ifade de ΔC_D değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta C_D = C_{DM} - C_{DS} \tag{3.19}$$

$$\begin{aligned} C_{DM} &= 2\left(1+2\frac{t}{c}\right)\left(\frac{0.044}{R_{c0}^{1/6}} - \frac{5}{R_{c0}^{2/3}}\right) \\ C_{DS} &= 2\left(1+2\frac{t}{c}\right)\left(1.89+1.62\log\left(\frac{c}{k_p}\right)\right)^{-2.5} \end{aligned} \tag{3.20}$$

Bu bağıntılarda kullanılan t 0.75r/R'deki maksimum kanat kalınlığını, Re_{c0} 0.75r/R'deki yerel Reynolds sayısını (denklem 3.24), P 0.75r/R'deki hatveyi ifade eder ve k_p $30x10^{-6}$'ya eşittir. Yerel Reynolds sayısı (Re_{c0}), $2x10^5$'ten küçük olmamalıdır. ITTC 1978 metodu kullanılarak tam ölçek değerleri hesaplanan pervane, istatiksel analizde kullanılan pervane aralığının içine düştüğü sürece genellikle iyi sonuçlar vermektedir. Bu yöntemin dezavantajı ise kesitlerde kamber dağılımını dikkate almamasıdır (Helma ve diğ, 2018). Bir diğer dezavantajı ise CLT pervanelerde

kanat ucu (tip) geometrisini, eğik kanat uçlu (tip rake) pervanelerdeki geometriyi hesaba dahil etmez (Şekil 3.2). Yapılan çalışmalarda, Kappel (tip rake pervane) ve CLT pervanelerin konvansiyonel pervanelere göre ölçek etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür (Gonzalez-Adelid ve diğ, 2014).

Şekil 3.2 : Pervane görünüşleri, sol) CLT, sağ) Kappel.

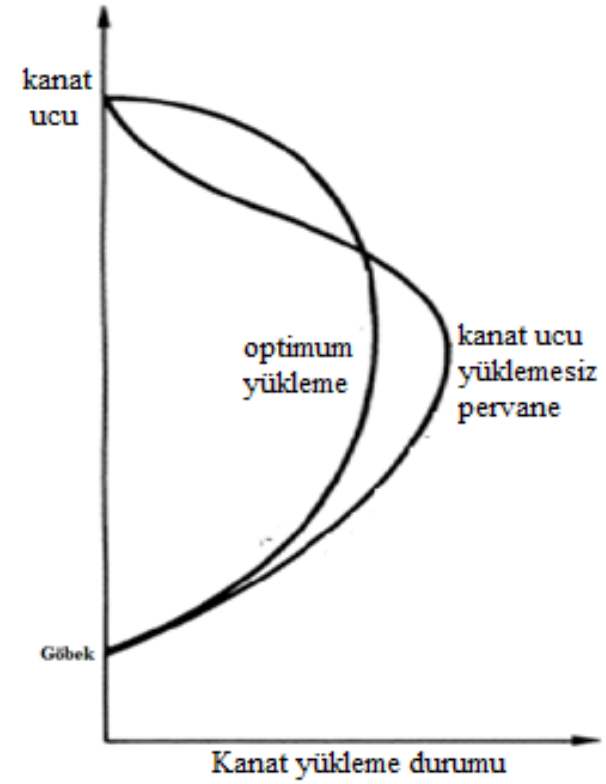
Diğer istatiksel yöntemler ise ITTC 1978 metodunun özellikle konvansiyonel olmayan pervanelerde, ölçek etkisini doğru tespit edememesinden dolayı bu metodu modifiye ederek yeni denklemler ortaya koymuşlardır. Bunlardan en bilineni SISTEMAR ve CEHIPAR tarafından ortaya koyulan CLT pervaneler için olan prosedürdür (Gonzalez-Adelid ve diğ, 2014). Bu prosedür ITTC 1978 metodunu temel almış, bunun üzerinde kanat uçlarındaki etkileri dikkate alacak şekilde düzeltmeler yapmıştır.

3.3.2 Analitik metotlar

Analitik yöntemle, kesitin kaldırma katsayısı C_L ve sürtünme katsayısı C_D'yi ölçülen açık su verilerinden elde ederler. Literatürde Meyne ve β_i metodu olmak üzere iki yöntem mevcuttur (Helma ve diğ, 2018).

Meyne pervanelerde ölçek etkisini kaldırma hattı tabanlı pervane analiz adımı ile birlikte alır. Ele aldığı pervanenin, viskoz olmayan bir sıvı için gerçerli olan varsayımsal bir açık su performansına erişim sağlar. Deneysel açık su sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, model ölçeği için özel sürtünme düzeltmeleri elde edilirken, tam ölçekli pervane için küresel sürtünme düzeltmeleri yapılır. Bu yöntem, analiz edilen pervaneyi optimum yükleme dağılımına göre ele alır. Kanat ucu yüklemesi çok az olan pervaneler gibi optimum yükleme dağılımına sahip olmayan pervanelerde (Şekil 3.3) bu yöntem doğru sonuçlar vermez (Helma ve diğ, 2018).

Bir diğer yöntem ise Helma (2015) tarafından ortaya konulan β_i yöntemidir. Bu yöntemde ölçülen itme ve tork, bağımsız olarak ölçeklenebilen eşdeğer profilin kaldırma ve sürüklenmesine bölünebilir ve hesaplamanın son adımında, tekrar ölçeklendirilmiş itme ve tork değerlerine birleştirilirler. Bu yöntem, herhangi bir özel yükleme dağılımını varsaymaz, ancak yine de eşdeğer bir profil varsayımı üzerinde çalışır.



Şekil 3.3 : Kanat yükleme durumları (Carlton, 2018).

3.3.3 HAD metotları

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin gelişmesiyle, model ve tam ölçekte analizler gerçekleştirilebilmektedir ve ölçek etkisi ortaya konulmaktadır. Hesaplamalı çalışmalarda seçilen türbülans modeli önem taşımaktadır. Direkt nümerik simulasyon (DNS) yüzey sürtünme etkilerini tanımlamak için en doğru hesaplama yöntemi olsa da çok fazla hesaplama kapasitesi gerektiğinden kullanımı yüksek hesaplama maliyeti getirir. Bu çalışma kapsamında da kullanılan RANS yönteminde ise sonuçların doğruluğu, ağ kalitesine çok duyarlıdır. Bu yöntemde validasyon ve verifikasyon çalışması büyük önem taşır.

3.3.4 Birleştirilmiş metotlar

HSVA tarafından yakın zamanda uygulanan HSVA Strip metoduna göre bu metot, herhangi bir kanat şeklini kapsamalıdır, çünkü yüzey sürtünme etkileri, kanat, göbek ve kanat ucu (tip) arasındaki tüm bölümleri kapsayan dilimlere bölünerek bütünsel bir şekilde işlenir. Yerel Reynolds sayısına bağlı olarak her dilime bir bölüm sürüklenme katsayısı atanır (Streckwall ve diğ, 2013).

Diğer bir yöntem olan Nümerik kesit sürtünme metodunda bir sınır tabaka çözücüsü, kesit sürtünmesini hesaplamak için potansiyel bir akış çözücü ile bağlanabilir.

3.4 Tez Çalışmasında Ölçek Etkisinde İncelenen Parametreler

Bu tez çalışmasında üç farklı ölçekte ve tam ölçekte çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçların birbirleri ile karşılaştırılabilmesi için, bu parametrelerin boyutsuz olması gerekir. Bu kısımda açık su analizlerinde, kavitasyon ve erozyon oluşumu tahmini analizlerinde kullanılacak boyutsuz parametreler verilmiştir.

3.4.1 Açık su analizlerinde incelenen parametreler

Pervane açık su analizlerinde elde edilen itme (T) ve tork (Q) değerleri kısım 3.1'de verilen boyut analizi adımlarına göre boyutsuzlaştırılmıştır. Boyutsuz itme (K_T) ve tork (K_Q) katsayısı aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \tag{3.21}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \tag{3.22}$$

Pervane açık su verimi (η_0) ise denklem 3.23'deki gibi elde edilir.

$$\eta_0 = \frac{P_T}{P_D} = \frac{TV_A}{2\pi Qn} = \frac{K_T \rho n^2 D^4 V_A}{2\pi K_Q \rho n^2 D^5 n} = \frac{K_T}{2\pi}\frac{V_A}{nD}\frac{1}{K_Q} = \frac{J}{2\pi}\frac{K_T}{K_Q} \tag{3.23}$$

Pervane açık su analizlerinde hesaplamalar tüm ölçeklerde aynı ilerleme (J) ve Froude (F_r) sayılarında gerçekleştirilmiştir. Denklem 3.3, 3.15 ve 3.16'daki bağıntılar kullanılarak her bir ölçekteki hız ve devir değerleri hesaplanmıştır. Her bir ölçek için

yerel Reynolds sayısı farklıdır. Pervane için Reynolds sayısı ($R_{e0.7}$) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Re_{0.7} = \frac{c_{0.7}}{\upsilon}\sqrt{(0.7\pi nD)^2 + V_A^2} \tag{3.24}$$

3.4.2 Kavitasyon oluşumu ve erozyon şiddetinde incelenen parametreler

Bu kısımda açık su analizlerdeki gibi K_T, K_Q ve η_0 değerlerinin yanı sıra pervane kanatlarının yüzeyini kaplayan kavitasyon alanının, pervane yüzey alanına oranı ve boyutsuz erozyon gücü incelenmiştir. Kavitasyon analizlerinde, ilerleme sayısına (J) ek olarak, kavitasyon sayısıda (σ_n) model ve tam ölçek için aynı olmalıdır. Analizlerde kullanılan kavitasyon sayısı (σ_n) aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\sigma_n = \frac{P_0 - P_V}{0.5\rho(nD)^2} \tag{3.25}$$

Burada P_0 pervane merkezindeki hidrostatik basıncı, P_V buhar basıncını göstermektedir. Boyutsuz kavitasyon alanı (C_{KA}) ise aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$C_{KA} = \frac{\text{Pervanekanatlarıkavitasyonalanı}}{\text{Pervaneyüzeyalanı}} \tag{3.25}$$

Bölüm 2.5'de ifade edilen erozyon gücü (EP) ise Buckingham Pi teoremine göre aşağıdaki gibi boyutsuzlaştırılmıştır.

$$EP = f(\rho^a, D^b, V^c, g^d, n^e, P^f, \mu^g) \tag{3.26}$$

Erozyon gücü, Bölüm 2.5'de bahsedildiği üzere birim alandaki enerjidir. O halde boyutu M/T^3'tür. Denklem 3.26'da semboller yerine yazıldığında denklem aşağıdaki halini alır.

$$\frac{M}{T^3} = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a, (L)^b, \left(\frac{L}{T}\right)^c, \left(\frac{L}{T^2}\right)^d, \left(\frac{1}{T}\right)^e, \left(\frac{M}{LT^2}\right)^f, \left(\frac{M}{LT}\right)^g \tag{3.27}$$

Denklem 3.27'deki bağıntı kullanılarak M, L ve T için ayrı ayrı aşağıdaki bağıntılar yazılır.

$$
\begin{aligned}
&M: 1 = a + f + g \\
&L: 0 = -3a + b + c + d - f - g \\
&T: -3 = -c - 2d - e - 2f - g
\end{aligned}
\tag{3.28}
$$

Bağıntılar düzenlenirse a, b ve c aşağıdaki gibi elde edilir.

$$
\begin{aligned}
&a = 1 - f - g \\
&b = d + e - g \\
&c = 3 - 2d - e - 2f - g
\end{aligned}
\tag{3.29}
$$

Denklem 3.29'daki eşitlikleri denklem 3.27'de yerine yazarsak aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$
\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{T}^3} = \left(\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{L}^3}\right)^{1-f-g}, (L)^{d+e-g}, \left(\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{T}}\right)^{3-2d-e-2f-g}, \left(\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{T}^2}\right)^{\mathrm{d}}, \left(\frac{1}{\mathrm{T}}\right)^{\mathrm{e}}, \left(\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{LT}^2}\right)^{\mathrm{f}}, \left(\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{LT}}\right)^{\mathrm{g}} \tag{3.30}
$$

Yukardaki denklem düzenlenip uygun büyüklükler yerleştirilirse aşağıdaki hale gelir.

$$
\mathrm{EP} = \rho \mathrm{V}^3 \mathrm{f} \left\{ \left(\frac{gD}{V^2}\right)^d \left(\frac{nD}{V}\right)^e \left(\frac{P}{\rho V^2}\right)^f \left(\frac{\nu}{VD}\right)^g \right\} \tag{3.31}
$$

$$
\mathrm{C}_{EP} = \frac{EP}{0.5\rho \mathrm{V}^3} \mathrm{f} \left\{ \frac{gD}{V^2}, \frac{nD}{V}, \frac{P}{\rho V^2}, \frac{\nu}{VD} \right\} \tag{3.32}
$$

Bu ifadedeki boyutsuz katsayılar Bölüm 3.1'de ifade edilmiştir. Denklem 3.13'te V yerine nd yazılırsa eşitlik son halini alır.

$$
C_{EP} = \frac{\mathrm{EP}}{\rho \mathrm{n}^3 \mathrm{D}^3} \tag{3.33}
$$

4. HESAPLAMALI PERVANE AÇIK SU ÇALIŞMASI

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan DTMB 5415 pervanesinin hesaplamalı açık su analizlerine yer verilmiştir. Açık su analizleri için, hesaplama bölgesi ve sınır koşulları, ağdan bağımsızlık çalışması, incelenen akış koşulları, hesaplama sonuçları, ölçek etkisinin incelenmesi ve DTMB 5415 pervanesinin özellikleri bu kısımda anlatılmıştır.

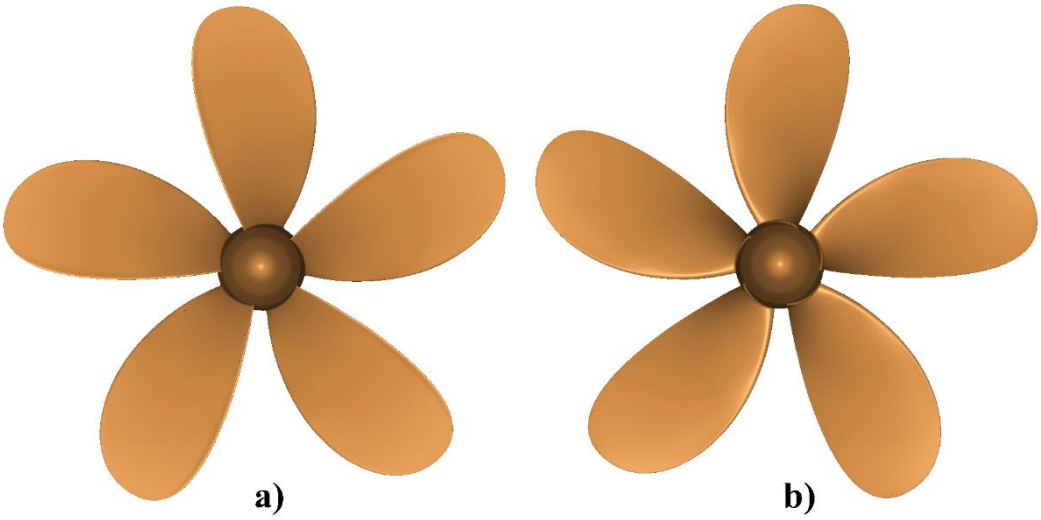
4.1 DTMB 5415 Pervanesinin Özellikleri

David Taylor model havuzunda geliştirilmiş DTMB 5415 pervanesi, 1980 yılında askeri test faaliyetleri için tasarlanmış DTMB 5415 gemisine aittir (URL-1). DTMB 5415 pervanesi konvansiyonel tip, sağa dönüşlü, 0.58 kanat açılım oranına sahip ve 5 kanatlıdır. Bu çalışma kapsamında DTMB 5415 pervanesi 3 farklı ölçekte ve tam ölçekte kullanılmıştır. Çizelge 4.1'de pervane özelliklerine ve J=0.5 için Re sayılarına yer verilmiştir.

Çizelge 4.1 : DTMB-5415 pervanesi özellikleri.

Özellik	Sembolü	Model			Tam ölçek
Simge	-	D_S	D_M	D_B	D_{FS}
Ölçek	λ	35.5	24.9	17.5	1
Çap	D (m)	0.1730	0.2464	0.3509	6.138
r/R 0.7'deki hatve oranı	$P_{0.7}/D$	0.214	0.214	0.214	0.214
Açınım kanat alanı oranı	A_E/A_0	0.580	0.580	0.580	0.580
Pervane piç oranı	$(P/D)_{0.7}$	0.870	0.870	0.870	0.870
Kanat sayısı	Z	5	5	5	5
Dönüş yönü	-	Sağ	Sağ	Sağ	Sağ
$Re_{0.7R}$, J=0.5	-	2.23E+05	3.79E+05	6.44E+05	4.44E+07

Bu çalışmada D_S, D_M, D_B ve D_{FS} sırasıyla 173, 246.4, 350.9 ve 6138 mm çapındaki pervaneleri ifade etmektedir. DTMB 5415 pervanesinin HAD analizlerinde kullanılan geometrisi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 : DTMB-5415 pervanesi, a) basınç (yüz) b) emme (sırt) yüzeyleri.

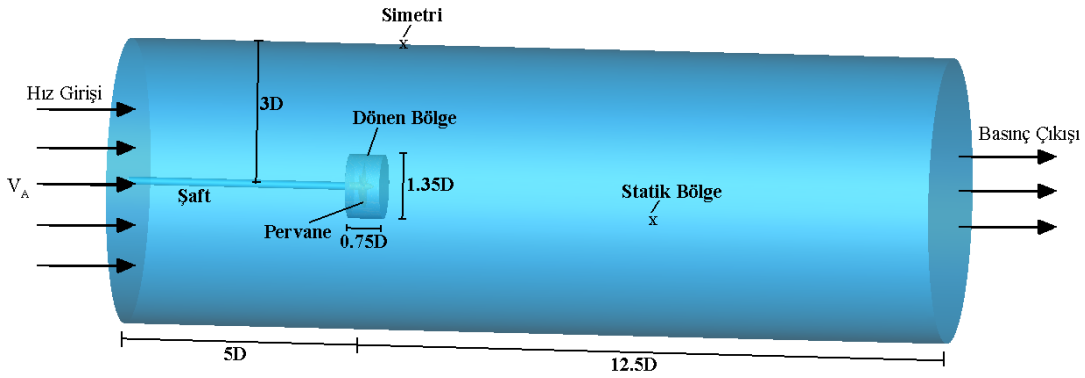
4.2 Çözüm Metodolojisi ve Hesaplama Bölgesi

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen hesaplamalı analizler, İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Hesaplamalı Hidrodinamik Laboratuvarında bulunan çok çekirdekli bilgisayarlarda, Star-CCM+ yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında Navier-Stokes denklemlerini çözmek için RANS modeli kullanılmıştır. Denklemler sonlu hacim tekniği ile ayrıklaştırılmıştır. Türbülans modeli için, k-ω SST yöntemi kullanılmıştır. Hız ve basınç arasındaki bağlantı için sıralı algoritma olan SIMPLE yöntemi ve basınç, momentum, türbülans kinetik enerjisinin ayrıklaştırılması için ikinci derece şema tercih edilmiştir. Pervanenin dönüşünü modellemek için kayıcı ağ (Sliding mesh) yöntemi kullanılmıştır. Zamana bağlı hesaplamalarda, her bir zaman adımında pervanenin 1 derecelik dönüşüne karşılık gelen değer kullanılmıştır. Zaman ayrıklaştırması için ikinci derece şema kullanılmıştır.

Pervane açık su analizlerinde pervanenin bulunduğu kısım dönen bölge, geri kalan kısım ise statik bölge olacak şekilde silindirik hesaplama bölgesi oluşturulmuştur. Çözüm bölgesinde akışın başladığı yer hız girişi, bittiği yer basınç çıkışı, pervane yüzeyi duvar, dönen ve statik bölge arasındaki kısım arayüzey ve statik bölgenin yanları simetri olarak tanımlanmıştır. Tüm ölçeklerde pervane çapını D olarak düşünürsek, dönen bölgenin çapı 1.35D ve uzunluğu 0.75D, statik bölgenin çapı 6D, pervane öncesinde 5D ve pervane iz bölgesinde 12.5D olacak şekilde hesaplama

bölgesi oluşturulmuştur. Tüm ölçekler için açık su analizlerinde kullanılan hesaplama bölgesi ve sınır koşulları Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Açık su analizleri hesaplama bölgesi ve sınır koşulları.

4.3 Ağ Örgüsünün Oluşturulması

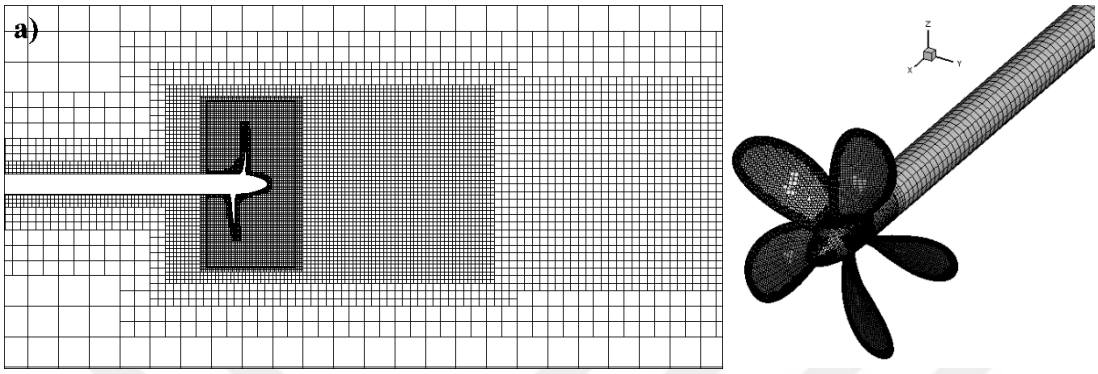
HAD'nde oluşturulan ağ örgüsü, ağ örgüsünün kalitesi, yoğunluğu ve eleman tipine bağlı olarak sonuçlar üzerinde belirleyici olmaktadır. Bu çalışma kapsamında ağ örgüsü oluşturulurken düzenli ağ yapısı tercih edilmiştir.

Sınır tabakanın düzgün olarak çözülebilmesi için model ölçeğinde duvardan boyutsuz uzaklık olarak ifade edilen y^+ değeri ~1 olacak şekilde ağ örgüsü oluşturulmuştur. Ancak tam ölçekte $y^+ \cong 1$'i sağlamak yan oranlarının çok büyümesi ve bu nedenle oluşan yakınsama problemleri ve çözümün doğruluğu açısından mümkün olmamıştır. Tam ölçekte bu nedenle $y^+=50$ olacak şekilde ilk hücre yüksekliği belirlenmiştir. Model ölçeğinde sınır tabaka kalınlığı amprik olarak hesaplanmış ve sınır tabaka içerisinde 30 hücre katmanı kalacak şekilde 1.2 büyüme oranı ile ağ örgüsü oluşturulmuştur. Tam ölçekte ise sınır tabaka içerisinde 20 hücre katmanı ve 1.2 büyüme oranı ile ağ örgüsü modellenmiştir.

Ağ örgüsü oluşturulurken dikkat edilen diğer bir önemli nokta, model ve tam ölçekte maksimum yan oranlarının aynı olmasıdır. 3 farklı model ölçeğinde ve tam ölçekte ağ örgüsü oluşturulurken bu koşul sağlanmıştır. Yan oranın 1'e yakın olması beklenir.

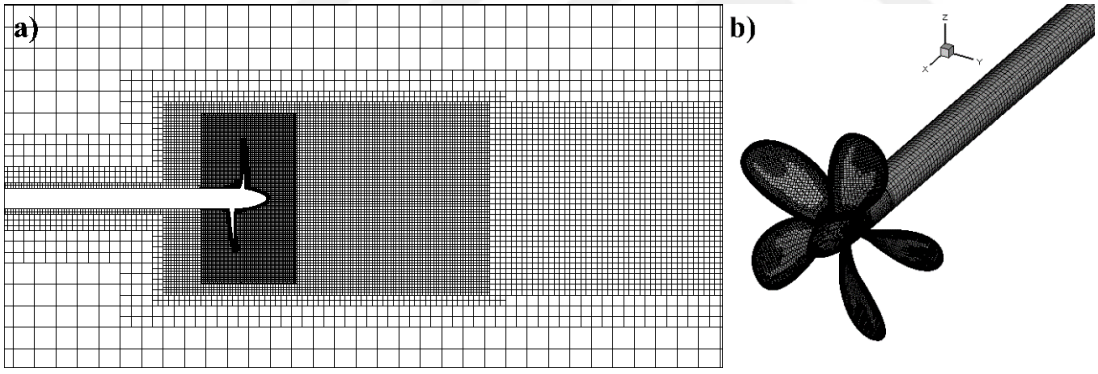
Ağın yoğunluğu ve sıklığı çözümün doğruluğu açısından diğer önemli parametredir. Bu nedenle, pervane önder ve izler kenarında, dönen bölge içerisinde ve iz bölgesinde ağ örgüsü sıklaştırılarak daha fazla eleman kullanılmış, statik bölgede ise daha az eleman kullanılarak hücre sayısının çok fazla artmaması sağlanmıştır.

Pervane açık su analizlerinde, model ve tam ölçekte ağ örgüsü J=0.8 için oluşturulmuş ve diğer tüm ilerleme sayılarında aynı ağ örgüsü kullanılmıştır. Şekil 4.3'de D_S (173 mm) çapındaki pervane için oluşturulan ağ örgüsünün profil ve pervane üzerindeki görünüşüne yer verilmiştir.



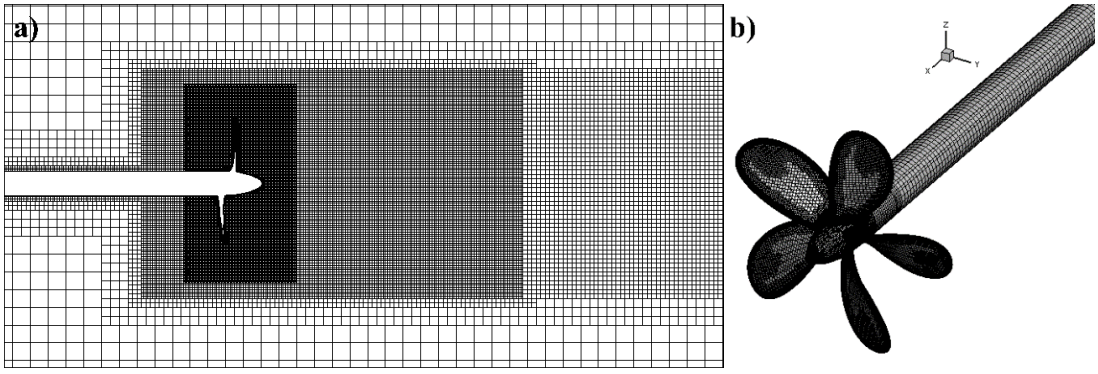
Şekil 4.3 : D_S için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey.

Şekil 4.4'de D_M (246.4 mm) çapındaki pervane için oluşturulan ağ örgüsünün profil ve pervane üzerindeki görünüşüne yer verilmiştir.



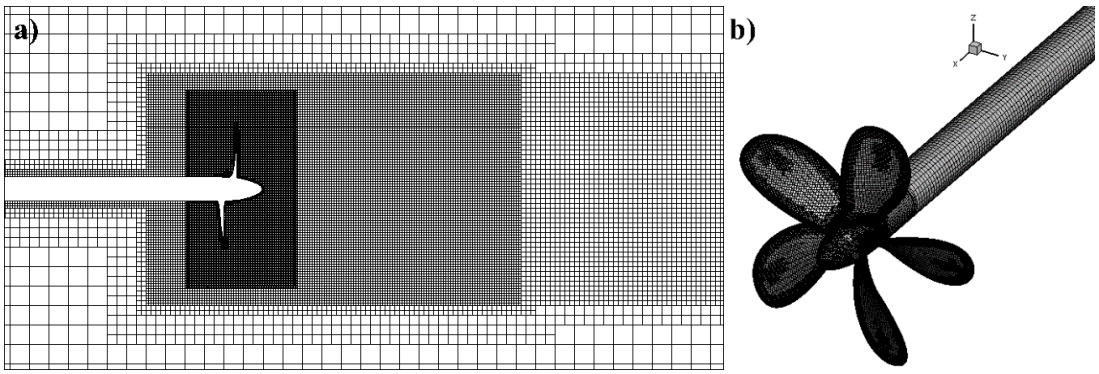
Şekil 4.4 : D_M için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey.

Şekil 4.5'de D_B (350.9 mm) çapındaki pervane için oluşturulan ağ örgüsünün profil ve pervane üzerindeki görünüşüne yer verilmiştir.



Şekil 4.5: D_B mm için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey.

Şekil 4.6'da D_{FS} (6138 mm) çapındaki pervane için oluşturulan ağ örgüsünün profil ve pervane üzerindeki görünüşüne yer verilmiştir.



Şekil 4.6 : D_{FS} mm için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey.

4.4 Ağdan Bağımsızlık Çalışması

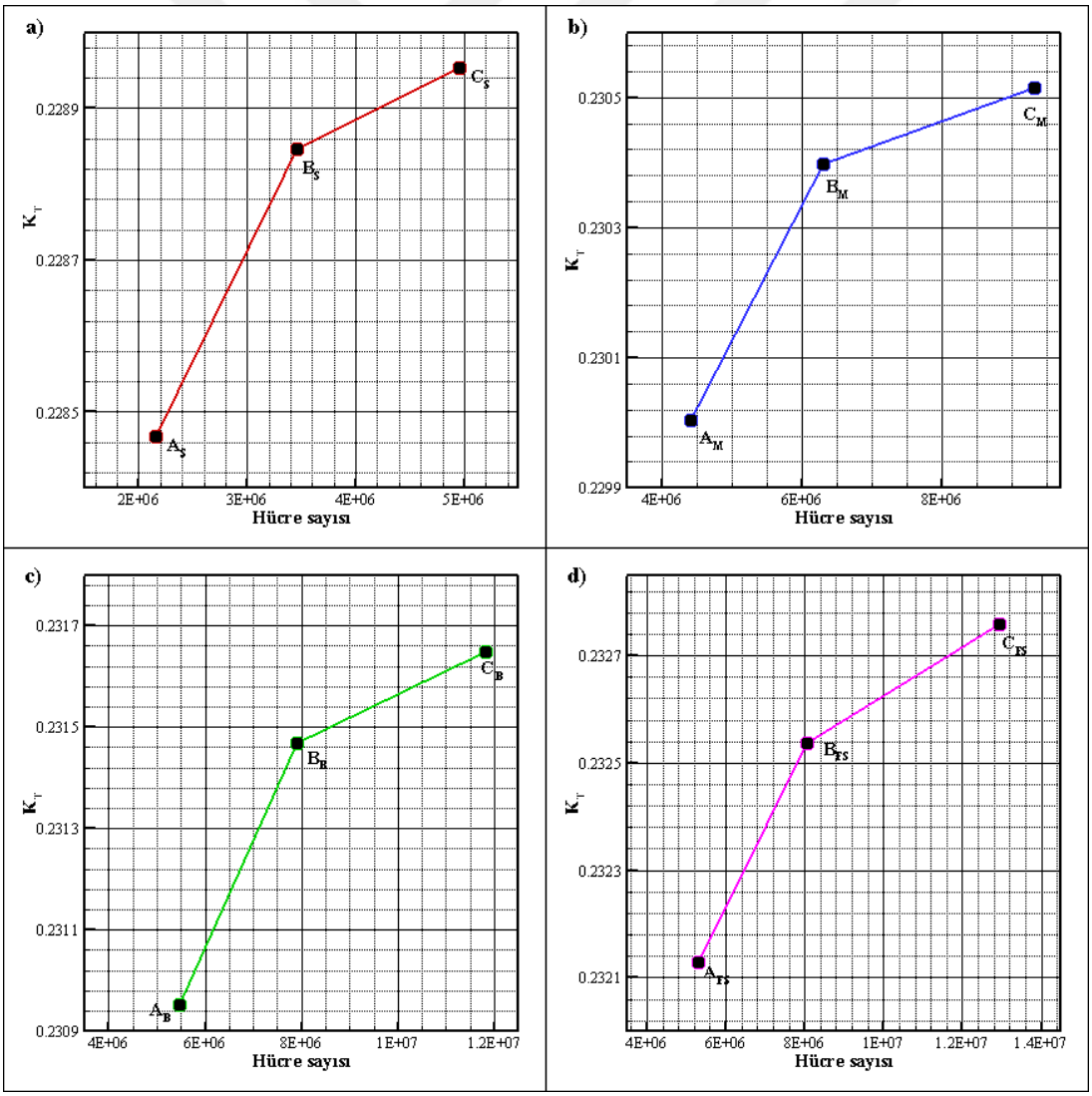
Bu bölümde, açık su analizlerinde elde edilen sonuçların ağ yoğunluğundan bağımsız olduğunu göstermek için 3 farklı yoğunlukta ağ örgüsü oluşturulmuştur. Tüm ölçeklerde A, B ve C kodları sırasıyla seyrek, orta ve sık ağları ifade etmektedir. A kodlu ağdaki hücre boyutu $\sqrt[3]{2}$ kat küçültülürek B kodlu ağ örgüsü, benzer şekilde B kodlu ağ örgüsünün hücre boyutu küçültülerek C kodlu ağ örgüsü oluşturulmuştur. Hücre boyutunun küçültülmesi, ağ örgüsü içerisinde tüm bölgelere uygulanmış ancak sadece sınır tabaka içerisinde değişiklik yapılmıştır. Ağdan bağımsızlık çalışmasında uygun ağın seçimi için pervanenin 0.5 ilerleme sayısındaki K_T değeri referans alınmıştır.

Çizelge 4.2'de tüm ölçeklerde A, B, C kodlu ağ örgülerine karşılık hücre sayıları, K_T değerleri, ortalama y^+ değerleri verilmiştir. Ayrıca deney sonuçları bulunan D_S çaplı durum için deney ile hesaplamalı çalışma arasındaki farkta gösterilmiştir.

K_T'deki değişimi daha net görebilmek için Çizelge 4.2'deki K_T ve hücre sayısı değerleri grafik üzerinde gösterilmiştir (Şekil 4.7). Şekil 4.7'den görüldüğü tüm ölçeklerde, B ağından C ağına göre olan değişim, A ağından B ağına olan değişime göre oldukça düşüktür. C ağındaki hücre sayısı B ağına göre 1.5 kat fazladır. Bu nedenle hesaplamalı çalışmalarda D_S, D_M, D_{FS} çaplarında B kodlu ağ tipi, D_B çapında ise C kodlu ağ tipi kullanılmıştır.

Çizelge 4.2 : J=0.5 için ağdan bağımsızlık çalışması sonuçları.

Çözüm Ağı	Hücre sayısı	Ort. y+	K_T	Fark %
A_S	2.2E+06	0.225	0.2285	2.611
B_S	3.5E+06	0.225	0.2288	2.772
C_S	5.0E+06	0.226	0.2290	2.818
A_M	4.4E+06	0.254	0.2300	
B_M	6.3E+06	0.255	0.2304	
C_M	9.3E+06	0.256	0.2305	
A_B	5.5E+06	0.289	0.2310	
B_B	7.9E+06	0.290	0.2315	
C_B	1.2E+07	0.291	0.2316	
A_{FS}	5.3E+06	46.548	0.2321	
B_{FS}	8.1E+06	46.812	0.2325	
C_{FS}	1.3E+07	47.061	0.2328	
Deney			0.2225	



Şekil 4.7 : Hücre sayılarına göre K_T değişimi, a) D_S b) D_M c) D_B d) D_{FS}.

Hesaplamalı çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçların hassasiyeti, Amerikan Makine Mühendisleri Topluluğu (ASME) tarafından da önerilen ağ yakınsama indeksi (GCI) prosedürü takip edilerek incelenmiştir (Çelik ve diğ, 2008). Bu prosedüre göre ağ örgüsü yukarıda da ifade edildiği gibi sistematik olarak sıklaştırılarak, 3 farklı yoğunlukta ağ örgüsü elde edilmelidir. Ardından ağ örgüleri arasındaki sıklaştırma faktörü (r_i) denklem 4.1'e göre elde edilmelidir.

$$r_{32} = \frac{h_{seyrek}}{h_{normal}}, r_{21} = \frac{h_{normal}}{h_{sık}} \tag{4.1}$$

Bu ifadedeki h_{seyrek}, h_{normal} ve $h_{sık}$ sırası ile A, B ve C ağındaki temel boyutlardır. Literatürde $r = h_{seyrek} / h_{sık}$ değerinin 1.3'ten büyük olması gerektiği belirtilmiştir. Sıklaştırma faktörleri kullanılarak p değeri denklem 4.2'deki gibi hesaplanmalıdır.

$$p = \frac{1}{In(r_{21})} \left| In(\varepsilon_{32} / \varepsilon_{21}) \right| + q(p) \tag{4.2}$$

Bu ifadedeki q(p) değeri aşağıdaki hesaplanır. Eğer r değeri sabit ise q(p)=0'dır.

$$q(p) = In\left(\frac{r_{21}^{p} - s}{r_{32}^{p} - s} \right) \tag{4.3}$$

$$s = 1 \cdot sgn(\varepsilon_{32} / \varepsilon_{21}) \tag{4.4}$$

Bu ifadelerde, $\varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1$ ve $\varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2$ eşitlikleri kullanılarak ε_{21} ve ε_{32} değerleri elde edilmiştir. Eşitliklerde kullanılan Φ değişkeni, bu çalışma için Çizelge 4.2'de verilen K_T değerlerini ifade etmektedir. Richardson esktrapolasyonu ile ekstrapole edilmiş değer, denklem 4.5'e göre hesaplanır (Celik ve diğ., 2008).

$$\phi_{ext}^{21} = \frac{\left(r_{21}^{p} \phi_1 - \phi_2 \right)}{\left(r_{21}^{p} - 1 \right)} \tag{4.5}$$

Denklem 4.6'daki eşitlik kullanılarak yaklaşık relatif hata, denklem 4.7'deki eşitlik kullanılarak ekstrapole edilmiş relatif hata, denklem 4.8'deki eşitlik kullanılarak yoğun ağ yakınsama indeksi ($GCI_{yoğun}$) ve denklem 4.9'daki eşitlik kullanılarak seyrek ağ yakınsama indeksi (GCI_{seyrek}) elde edilir.

$$e_a^{21} = \frac{(\phi_1 - \phi_2)}{(\phi_1)} \tag{4.6}$$

$$e_{ext}^{21} = \left| \frac{(\phi_{ext}^{12} - \phi_1)}{(\phi_{ext}^{12})} \right| \tag{4.7}$$

$$GCI_{yoğun}^{21} = \frac{1.25 e_a^{21}}{(r_{21}^p - 1)} \tag{4.8}$$

$$GCI_{seyrek}^{21} = \frac{1.25 r_{21}^p e_a^{21}}{(r_{21}^p - 1)} \tag{4.9}$$

Yukarıdaki adımlar takip edilerek ve Çizelge 4.2'deki değerler kullanılarak itme katsayısı (K_T) için ağ yakınsama indeksi (GCI) değeri tüm ölçeklerde hesaplanmıştır ve Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Açık su analizleri K_T için ayrıklaştırma hatası değerleri.

Çap (mm)	Çözüm Ağı	Φ	ε_{21}	ε_{32}	p	Φ_{ext}^{21}	e_a^{21}	GCI^{21}
173	A_S	0.2285	3.785E-04	1.068E-04	9.823	0.229	0.001	0.01%
	B_S	0.2288						
	C_S	0.2290						
246.4	A_M	0.2300	3.945E-04	1.164E-04	8.415	0.231	0.001	0.01%
	B_M	0.2304						
	C_M	0.2305						
350.9	A_B	0.2310	5.159E-04	1.808E-04	4.921	0.232	0.001	0.05%
	B_B	0.2315						
	C_B	0.2316						
6138	A_{FS}	0.2321	4.090E-04	2.210E-04	1.806	0.233	0.001	0.23%
	B_{FS}	0.2325						
	C_{FS}	0.2328						

4.5 Açık Su Analizleri İncelenen Akış Koşulları

DTMB 5415 pervanesinin açık su analizleri 0.2-0.8 aralığındaki ilerleme sayılarında gerçekleştirilmiştir. İlerleme sayısı hesabında pervane üzerine gelen hız (V_A) ve devir sayısı (n), denklem 3.15 ve denklem 3.16'ya göre F_r sayısı benzerliği sağlanacak şekilde hesaplanmıştır. Çizelge 4.4'te tüm ölçekler için analizlerde kullanılan hız ve devir sayısı değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Açık su analizleri model ve tam ölçekte HAD koşulları.

	D_S		D_M		D_B		D_{FS}	
J	V_A (m/s)	n (rps)	V_A (m/s)	n (rps)	V_A (m/s)	n (rps)	V_A (m/s)	n (rps)
0.2	0.519	15.000	0.619	12.569	0.739	10.533	3.092	2.518
0.3	0.779	15.000	0.929	12.569	1.109	10.533	4.637	2.518
0.4	1.038	15.000	1.239	12.569	1.478	10.533	6.183	2.518
0.5	1.298	15.000	1.548	12.569	1.848	10.533	7.729	2.518
0.6	1.557	15.000	1.858	12.569	2.218	10.533	9.275	2.518
0.7	1.817	15.000	2.168	12.569	2.587	10.533	10.821	2.518
0.8	2.076	15.000	2.478	12.569	2.957	10.533	12.366	2.518

4.6 DTMB 5415 Pervanesi Geçerleme Çalışması

Literatürde DTMB 5415 pervanesi için Maritime Research Institute Netherlands (MARIN) tarafından 173 mm çapındaki model için gerçekleştirilen deney sonuçları mevcuttur (URL-2). Hesaplamalı analizlerde kullanılan 173 mm çapındaki (D_S) pervane ve literatürdeki sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.5'te deney ve HAD sonuçlarına ve Çizelge 4.6'da deney ve HAD arasındaki farklara yer verilmiştir. Çizelge 4.6'daki farklar görüldüğü üzere ilerleme sayısı arttıkça büyümektedir. Ancak yalnızca ilerleme sayısı değerinden yola çıkılarak ve deney koşulları tam olarak bilinmeden yapılan bir doğrulama çalışmasında bir takım farklar olması beklenebilir.

Çizelge 4.5 : D_S için deney ve HAD sonuçları.

	HAD			**Deney**		
J	K_T	$10K_Q$	η_0	K_T	$10K_Q$	η_0
0.2	0.3504	0.4747	0.2349	0.3486	0.4635	0.2394
0.3	0.3122	0.4340	0.3435	0.3092	0.4212	0.3504
0.4	0.2716	0.3911	0.4422	0.2666	0.3748	0.4528
0.5	0.2288	0.3450	0.5278	0.2225	0.3254	0.5442
0.6	0.1838	0.2943	0.5963	0.1769	0.2721	0.6210
0.7	0.1367	0.2386	0.6383	0.1291	0.2133	0.6741

Çizelge 4.6 : Deney ve HAD sonuçları arasındaki farklar (%).

J	K_T	$10K_Q$	η_0
0.2	0.486	2.346	-1.904
0.3	0.970	2.938	-2.028
0.4	1.860	4.170	-2.410
0.5	2.772	5.706	-3.111
0.6	3.721	7.561	-4.155
0.7	5.574	10.595	-5.616

Çalışmada kullanılan pervane modelinin, önümüzdeki süreç içerisinde İTÜ Büyük Kavitasyon Tünelinde deneyleri gerçekleştirilecektir. Bu deneylerden elde edilen çıktılarla HAD sonuçları karşılaştırıldığında, hesaplanan fark yüzdelerinin düşmesi beklenmektedir.

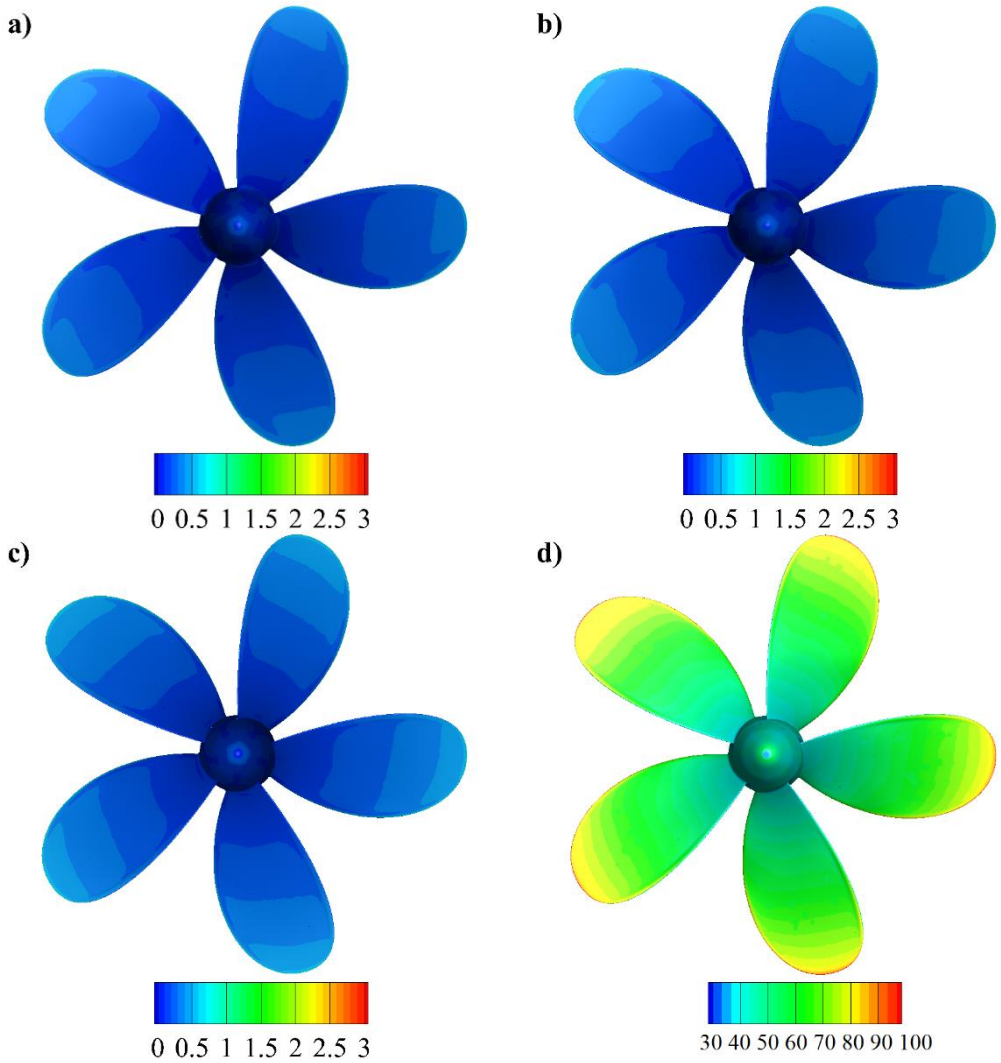
4.7 Açık Su Analizi Sonuçları

DTMB 5415 pervanesinin açık su analizleri Bölüm 4.5'te verilen akış koşullarına göre incelenmiş, 3 model ölçeği ve tam ölçekte itme katsayısı (K_T), tork katsayısı (K_Q) ve açık su verimi (η_0) Bölüm 3.4.1'deki denklemlere göre elde edilmiştir. Çizelge 4.7'de HAD sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Model ve tam ölçekte açık su sonuçları.

J	K_T (D_S)	K_T (D_M)	K_T (D_B)	K_T (D_{FS})	$10K_Q$ (D_S)	$10K_Q$ (D_M)	$10K_Q$ (D_B)	$10K_Q$ (D_{FS})	η_0 (D_S)	η_0 (D_M)	η_0 (D_B)	η_0 (D_{FS})
0.2	0.3504	0.3523	0.3540	0.3574	0.4747	0.4724	0.4703	0.4531	0.2349	0.2374	0.2396	0.2511
0.3	0.3122	0.3140	0.3155	0.3178	0.4340	0.4317	0.4299	0.4124	0.3435	0.3473	0.3504	0.3680
0.4	0.2716	0.2732	0.2746	0.2760	0.3911	0.3889	0.3871	0.3701	0.4422	0.4472	0.4517	0.4748
0.5	0.2288	0.2304	0.2315	0.2325	0.3450	0.3432	0.3413	0.3250	0.5278	0.5342	0.5396	0.5693
0.6	0.1838	0.1853	0.1863	0.1871	0.2943	0.2930	0.2913	0.2762	0.5963	0.6038	0.6108	0.6469
0.7	0.1367	0.1383	0.1395	0.1399	0.2386	0.2376	0.2362	0.2206	0.6383	0.6485	0.6578	0.7068
0.8	0.0871	0.0888	0.0900	0.0907	0.1772	0.1759	0.1742	0.1574	0.6260	0.6429	0.6575	0.7341

Pervane yüzeyindeki y^+ değerleri J=0.5 için Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Model ölçeğinde y^+ değerleri görüldüğü üzere viskoz alt tabakada ($y^+ \leq 5$) tutulmuştur. Tam ölçekte ise Logaritmik bölgededir ($30 \leq y^+ \leq 300$).

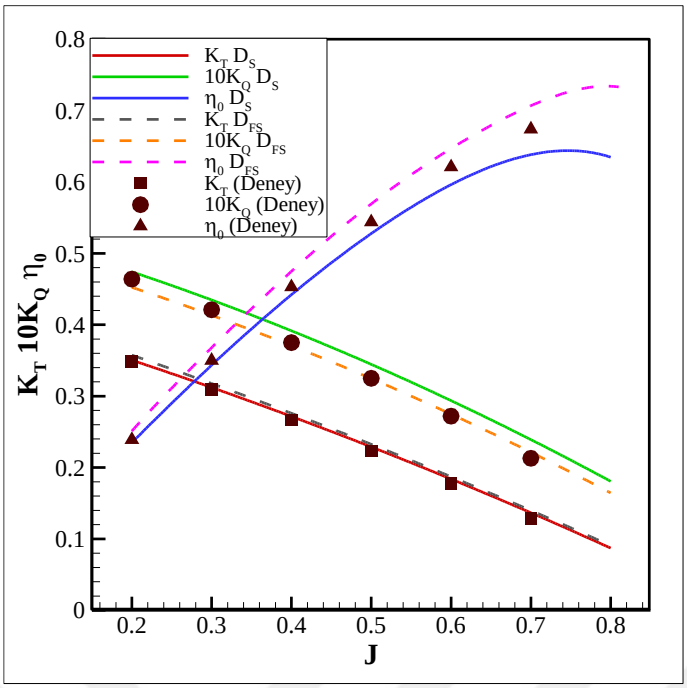


Şekil 4.8 : Açık su y+ dağılımları, a) D_S b) D_M c) D_B d) D_{FS}.

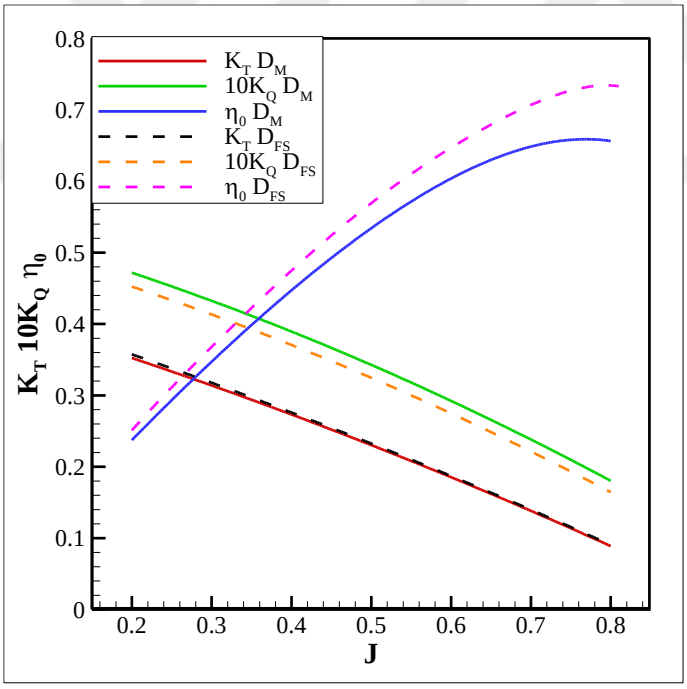
4.8 Ölçek Etkisinin İncelenmesi

Bu kısımda Bölüm 4.7'de verilen sonuçlar için ölçek etkisi incelenecektir. Öncelikle Şekil 4.9'da açık su grafiği üzerinde 173 mm çapındaki pervanenin (D_S) HAD ve deney sonuçları ve tam ölçekteki pervanenin (D_{FS}) HAD sonuçlarına yer verilmiştir. Şekil 4.9 ve Çizelge 4.7'den görüldüğü üzere model ölçeğinden tam ölçeğe geçerken tüm ilerleme sayılarında, itme katsayısı (K_T) değerleri artmış, tork katsayısı (K_Q) değerleri azalmış ve buna bağlı olarak denklem 3.23'e göre açık su verimi (η_0) değerleri artmıştır. K_T değerlerindeki artış K_Q'ya göre düşüktür. Ayrıca grafik üzerinde model ölçeğindeki deneysel sonuçlara da yer verilmiştir.

Şekil 4.10'da ise açık su grafiği üzerinde 246.4 mm çapındaki pervanenin (D_M) ve tam ölçekteki pervanenin (D_{FS}) HAD sonuçlarına yer verilmiştir.



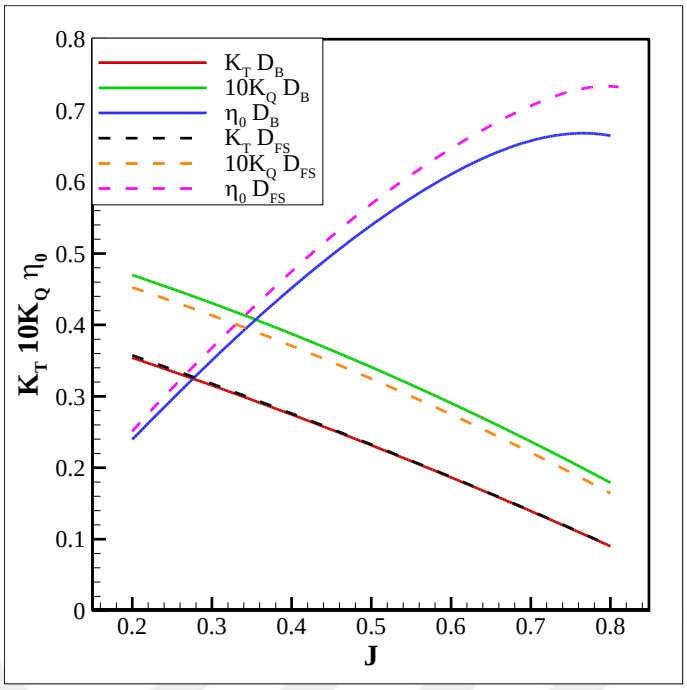
Şekil 4.9 : D_S, D_{FS}, D_S (deney) açık su grafiği.



Şekil 4.10 : D_M, D_{FS} açık su grafiği.

D_M ve D_{FS} pervanesi karşılaştırıldığında K_T değerleri artmakta, K_Q değerleri azalmakta ve η_0 değerleri artmaktadır. K_T değerlerindeki artış K_Q'ya göre düşüktür.

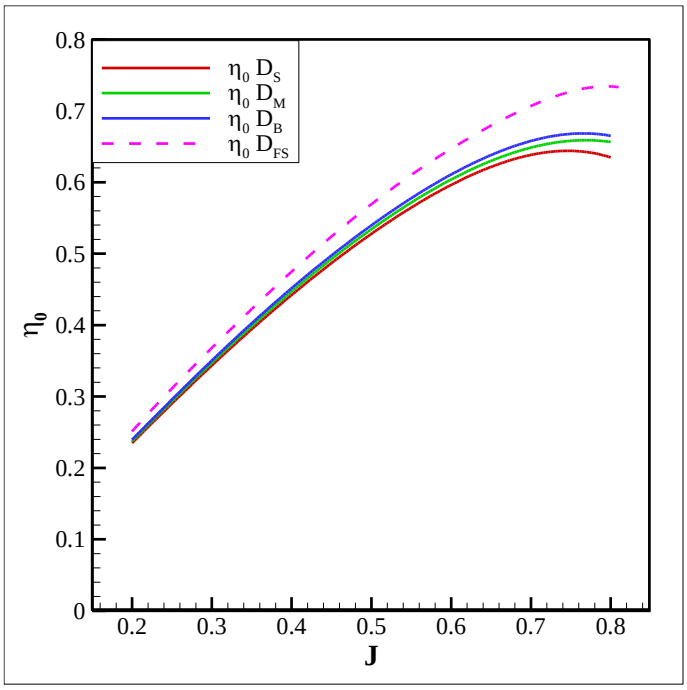
Şekil 4.11'de ise açık su grafiği üzerinde 350.9 mm çapındaki pervanenin (D_B) ve tam ölçekteki pervanenin (D_{FS}) HAD sonuçlarına yer verilmiştir.



Şekil 4.11 : D_B, D_{FS} açık su grafiği.

D_B ve D_{FS} pervanesi karşılaştırıldığında K_T değerleri artmakta, K_Q değerleri azalmakta ve η_0 değerleri artmaktadır. K_T değerlerindeki artış K_Q'ya göre düşüktür.

Şekil 4.12'de açık su grafiğinde tüm model ölçeklerindeki ve tam ölçekteki açık su verimi HAD sonuçlarına yer verilmiştir.



Şekil 4.12 : D_S, D_M, D_B, D_{FS} açık su verimi grafiği.

Açık su grafiğinden görüldüğü üzere model pervane boyu büyüdükçe (ölçek azaldıkça) açık su verimi (η_0) artmıştır. Artış miktarı düşük ilerleme sayılarından büyük ilerleme sayılarına doğru gidildikçe artmaktadır.

Model ölçeğinde elde edilen sonuçlar, Bölüm 3.3.1'deki ITTC 1978 metodu prosedürüne göre tam ölçeğe ekstrapole edilmiştir. Çizelge 4.8'de 173 mm çapındaki (D_S), 246.4 mm çapındaki (D_M) ve 350.9 mm çapındaki (D_B) pervanenin, model ölçeğinden tam ölçeğe, ITTC 1978 metoduyla ekstrapole edilmiş sonuçlarına yer verilmiştir.

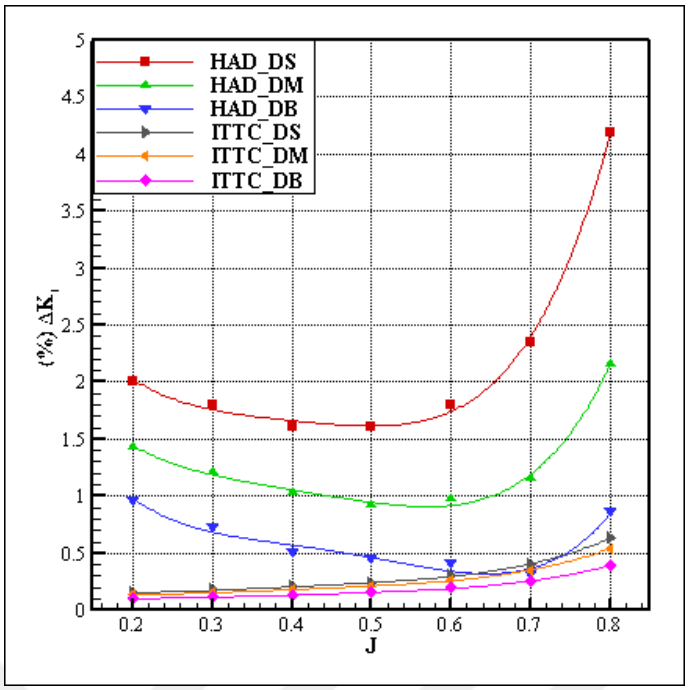
Çizelge 4.8 : D_S, D_M, D_B'nin ITTC 1978 metodu ektrapolasyon sonuçları.

	D_S			D_M			D_B		
J	K_T	$10K_Q$	η_0	K_T	$10K_Q$	η_0	K_T	$10K_Q$	η_0
0.2	0.3509	0.4694	0.2380	0.3528	0.4676	0.2402	0.3543	0.4668	0.2416
0.3	0.3128	0.4287	0.3484	0.3145	0.4270	0.3517	0.3159	0.4263	0.3537
0.4	0.2722	0.3858	0.4492	0.2737	0.3842	0.4535	0.2750	0.3836	0.4564
0.5	0.2294	0.3397	0.5373	0.2309	0.3385	0.5427	0.2318	0.3378	0.5461
0.6	0.1843	0.2890	0.6090	0.1858	0.2884	0.6152	0.1867	0.2878	0.6194
0.7	0.1373	0.2333	0.6554	0.1388	0.2330	0.6637	0.1398	0.2328	0.6692
0.8	0.0877	0.1719	0.6494	0.0893	0.1713	0.6639	0.0903	0.1708	0.6733

Hesaplamalı çalışma ile ITTC 1978 ekstrapolasyonu arasındaki ilişkiyi görmek ve HAD ve ITTC yönteminde model ve tam ölçek arasındaki K_T, K_Q ve η_0 değerleri arasındaki farkı görmek için sonuçlar denklem 4.10'da verilen şekilde yüzde (%) fark olarak grafik üzerinde karşılaştırılmıştır.

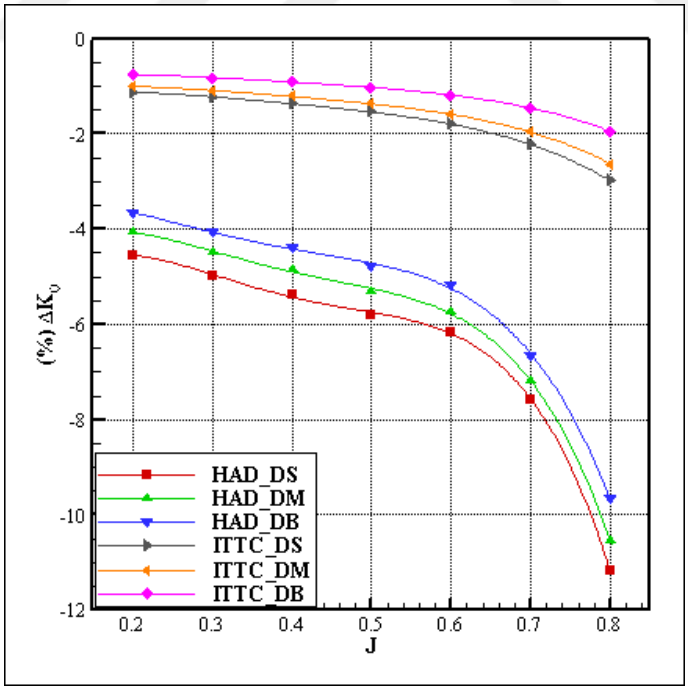
$$\Delta K_T(\%)=\frac{\left(K_{T_{FS}}-K_{T_{S,M,B}}\right)}{K_{T_{S,M,B}}}*100,\ \Delta K_Q(\%)=\frac{\left(K_{Q_{FS}}-K_{Q_{S,M,B}}\right)}{K_{Q_{S,M,B}}}*100 \qquad (4.10)$$

Şekil 4.13'te HAD çalışması ve ITTC1978 metodu için model ve tam ölçek arasında, K_T fark değerleri grafik üzerinde verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere HAD ve ITTC 1978 metodunda, K_T değerleri model boyu büyüdükçe (ölçek küçüldükçe) artmıştır. Model boyu büyüdükçe tüm ilerleme sayılarında, tam ölçek ve model ölçeği arasında K_T değerlerindeki fark, HAD ve ITTC 1978 metodunda azalmıştır. ITTC 1978 metodu, HAD'a göre model ve tam ölçek arasındaki farkı tüm ilerleme sayılarında daha düşük hesaplamıştır. HAD çalışmasında tüm ölçeklerde fark değeri J=0.2-0.6 arasında çok az azalma gösterirken, J=0.7-0.8'de büyük artış göstermiştir. ITTC 1978 metodunda ise tüm ölçeklerde ilerleme sayısı büyüdükçe fark değeri artış göstermiştir.



Şekil 4.13 : Açık su K_T değerleri farkları (%).

Şekil 4.14'te HAD çalışması ve ITTC1978 metodu için model ve tam ölçek arasında, K_Q fark değerleri grafik üzerinde verilmiştir.

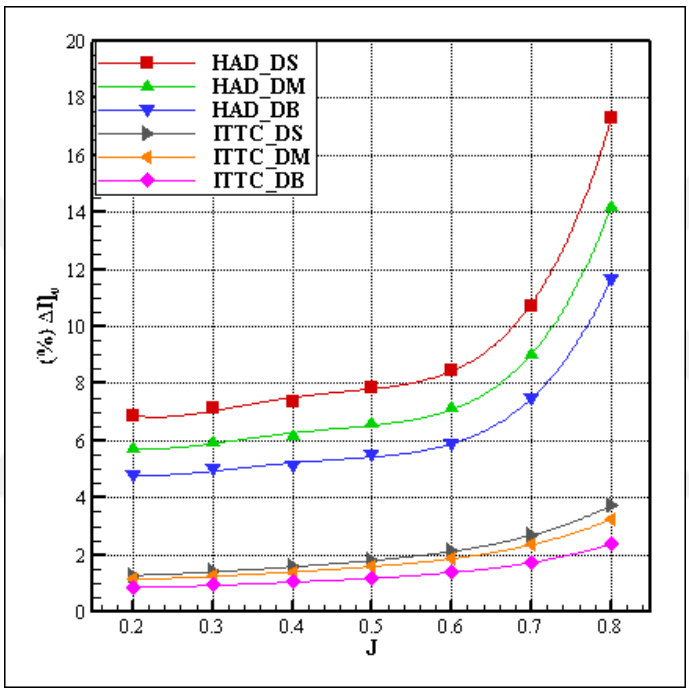


Şekil 4.14 : Açık su K_Q değerleri farkları (%).

Grafikten görüldüğü üzere HAD ve ITTC 1978 metodunda, K_Q değerleri model boyu büyüdükçe azalmıştır. Model boyu büyüdükçe tüm ilerleme sayılarında, tam ölçek ve

model ölçeği arasında K_Q değerlerindeki fark, HAD ve ITTC 1978 metodunda azalmıştır. ITTC 1978 metodu, HAD'a göre model ve tam ölçek arasındaki farkı tüm ilerleme sayılarında daha düşük hesaplamıştır. HAD çalışmasında tüm ölçeklerde fark değeri J=0.2-0.6 arasında çok az artış gösterirken, J=0.7-0.8'de büyük artış göstermiştir. ITTC 1978 metodunda ise tüm ölçeklerde ilerleme sayısı büyüdükçe fark değeri artış göstermiştir.

Şekil 4.15'te ise HAD çalışması ve ITTC1978 metodu için model ve tam ölçek arasındaki η_0 fark değerleri grafik üzerinde verilmiştir.



Şekil 4.15 : Açık su η_0 değerleri farkları (%).

Şekil 4.15'ten görüldüğü üzere HAD ve ITTC 1978 metodunda, η_0 değerleri model boyu büyüdükçe artmıştır. Model boyu büyüdükçe tüm ilerleme sayılarında, tam ölçek ve model ölçeği arasında η_0 değerlerindeki fark, HAD ve ITTC 1978 metodunda azalmıştır. ITTC 1978 metodu, HAD'a göre model ve tam ölçek arasındaki farkı tüm ilerleme sayılarında daha düşük hesaplamıştır. HAD çalışmasında tüm ölçeklerde fark değeri J=0.2-0.6 arasında çok az artış gösterirken, J=0.7-0.8'de büyük artış göstermiştir. ITTC 1978 metodunda ise tüm ölçeklerde ilerleme sayısı büyüdükçe fark değeri artış göstermiştir.

Detaylı olarak, model ölçekleri ile tam ölçek arasındaki farklar HAD çalışması için Çizelge 4.9'da, ITTC 1978 yöntemi için ise Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 : HAD tam ölçek ve model ölçekleri arasındaki farklar.

J	ΔK_{TS}	ΔK_{TM}	ΔK_{TB}	ΔK_{QS}	ΔK_{QM}	ΔK_{QB}	$\Delta \eta_{0S}$	$\Delta \eta_{0M}$	$\Delta \eta_{0B}$
0.2	2.01%	1.44%	0.97%	-4.54%	-4.07%	-3.65%	6.86%	5.74%	4.79%
0.3	1.80%	1.21%	0.74%	-4.98%	-4.48%	-4.07%	7.13%	5.96%	5.00%
0.4	1.61%	1.03%	0.51%	-5.38%	-4.85%	-4.39%	7.38%	6.18%	5.13%
0.5	1.61%	0.93%	0.46%	-5.80%	-5.30%	-4.77%	7.87%	6.58%	5.50%
0.6	1.80%	0.97%	0.41%	-6.17%	-5.75%	-5.19%	8.49%	7.13%	5.90%
0.7	2.35%	1.15%	0.31%	-7.57%	-7.19%	-6.64%	10.73%	8.99%	7.45%
0.8	4.18%	2.15%	0.86%	-11.17%	-10.54%	-9.66%	17.28%	14.19%	11.65%

Çizelge 4.10 : ITTC 1978 yöntemi tam ölçek ve model ölçekleri arasındaki farklar.

J	ΔK_{TS}	ΔK_{TM}	ΔK_{TB}	ΔK_{QS}	ΔK_{QM}	ΔK_{QB}	$\Delta \eta_{0S}$	$\Delta \eta_{0M}$	$\Delta \eta_{0B}$
0.2	0.16%	0.14%	0.10%	-1.12%	-1.00%	-0.75%	1.29%	1.15%	0.86%
0.3	0.18%	0.16%	0.12%	-1.22%	-1.09%	-0.82%	1.42%	1.26%	0.94%
0.4	0.20%	0.18%	0.13%	-1.36%	-1.21%	-0.91%	1.58%	1.41%	1.05%
0.5	0.24%	0.21%	0.16%	-1.54%	-1.37%	-1.02%	1.81%	1.60%	1.19%
0.6	0.30%	0.26%	0.19%	-1.80%	-1.59%	-1.19%	2.14%	1.89%	1.40%
0.7	0.40%	0.35%	0.26%	-2.22%	-1.96%	-1.45%	2.69%	2.35%	1.73%
0.8	0.63%	0.54%	0.39%	-2.99%	-2.63%	-1.95%	3.73%	3.26%	2.39%

Çizelge 4.9 ve 4.10'a göre HAD çalışmasındaki itme katsayısı (K_T), tüm ölçeklerde ITTC 1978 yöntemine göre daha yüksek hesaplanmıştır. Bunun nedeni, ITTC 1978 yönteminin ölçek etkisini hesaplarken sadece sürtünme kuvvetindeki düzeltmeyi dikkate alması ancak kaldırma kuvvetindeki etkiyi dikkate almamasıdır. Pervane itme kuvveti (T), kaldırma kuvveti (L) ile doğru orantılıdır ve Re sayısı arttıkça kaldırma kuvvetinin arttığı dikkate alınmalıdır.

Pervane itme kuvveti (T) üzerinde ölçek etkisini incelersek, sürtünme kuvvetlerinin (F) itme kuvvetine katkısı küçüktür, itme üzerinde ölçek etkisinin en büyük kısmının basınç bileşeniyle ilişkili olduğunu ve bunun esas olarak tam ölçekte sınır tabaka kalınlığının azalmasından kaynaklandığını söylemek yerinde olur. Çizelge 4.11'de tüm ölçeklerde 0.3, 0.5 ve 0.7 ilerleme sayılarında toplam itme katsayısının (K_T), basınç ve sürtünme bileşenleri gösterilmiştir. Çizelge 4.11'de yukarıdaki ifadeyi desteklemektedir.

Çizelge 4.11 : K_T'deki basınç ve sürtünme bileşenleri.

J	K_T	D_S	D_M	D_B	D_{FS}
0.3	Toplam	0.3122	0.3140	0.3155	0.3178
	Basınç	0.3155	0.3171	0.3183	0.3193
	Sürtünme	-0.0033	-0.0030	-0.0028	-0.0015
0.5	Toplam	0.2288	0.2304	0.2315	0.2325
	Basınç	0.2325	0.2338	0.2346	0.2342
	Sürtünme	-0.0037	-0.0034	-0.0031	-0.0017
0.7	Toplam	0.1367	0.1383	0.1395	0.1399
	Basınç	0.1408	0.1420	0.1430	0.1418
	Sürtünme	-0.0041	-0.0037	-0.0035	-0.0019

Pervane torku (Q) üzerinde ölçek etkisini incelersek, sürtünme kuvvetinin (F) torka katkısı çok önemlidir. Sürtünme bileşinin etkisi yüksek ilerleme sayılarında, düşük ilerleme sayılarına göre daha yüksektir. Ayrıca tam ölçekte sürtünme kuvveti azalır. Bu nedenle model boyu büyüdükçe tork katsayısının azalması beklenir. Çizelge 4.12'de tüm ölçeklerde 0.3, 0.5 ve 0.7 ilerleme sayılarında toplam tork katsayısının (K_Q), basınç ve sürtünme bileşenleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.12 : K_Q'daki basınç ve sürtünme bileşenleri.

J	K_Q	D_S	D_M	D_B	D_{FS}
0.3	Toplam	0.0434	0.0432	0.0430	0.0412
	Basınç	0.0405	0.0405	0.0405	0.0399
	Sürtünme	0.0029	0.0027	0.0025	0.0013
0.5	Toplam	0.0345	0.0343	0.0341	0.0325
	Basınç	0.0314	0.0314	0.0314	0.0311
	Sürtünme	0.0031	0.0029	0.0026	0.0014
0.7	Toplam	0.0239	0.0238	0.0236	0.0221
	Basınç	0.0207	0.0207	0.0207	0.0206
	Sürtünme	0.0032	0.0030	0.0028	0.0015

Çizelge 4.12'de görüldüğü üzere K_Q üzerinde model çapı büyüdükçe basınç kuvvetleri çok az değişiklik gösterirken, sürtünme kuvvetlerinin etkisi büyük önem taşır. Yukarıda da ifade edildiği gibi yüksek ilerleme sayılarında ve tam ölçekle model ölçekleri arasında K_Q'daki farkın büyük olması, sürtünme kuvvetinin etkisi ile ilişkilidir.

5. HESAPLAMALI KAVİTASYON VE EROZYON OLUŞUMU ÇALIŞMASI

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan DTMB 5415 pervanesinin hesaplamalı kavitasyon ve erozyon oluşumu tahminlerine yer verimiştir. Kavitasyon oluşumu tahminleri için, hesaplama bölgesi ve sınır koşulları, ağdan bağımsızlık çalışması, incelenen akış koşulları, hesaplama sonuçları ve ölçek etkisinin incelenmesi bu kısımda anlatılmıştır.

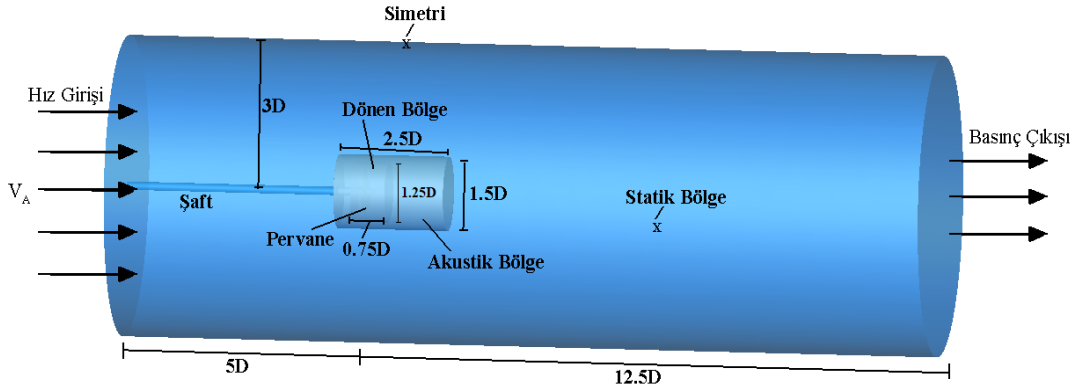
5.1 Çözüm Metodolojisi ve Hesaplama Bölgesi

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen hesaplamalı analizler, İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Hesaplamalı Hidrodinamik Laboratuvarında bulunan çok çekirdekli bilgisayarlarda, Star-CCM+ yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında Navier-Stokes denklemlerini çözmek için RANS modeli kullanılmıştır. Denklerimler sonlu hacim tekniği ile ayrıklaştırılmıştır. Türbülans modeli için, k-ω SST yöntemi kullanılmıştır. Hız ve basınç arasındaki bağlantı için sıralı algoritma olan SIMPLE yöntemi ve basınç, momentum, türbülans kinetik enerjisinin ayrıklaştırılması için ikinci derece şema tercih edilmiştir. Kavitasyon oluşumunu modellemek için Schnerr-Sauer kavitasyon modeli kullanılmıştır. Erozyon şiddeti tahminlerinde ise Erozyon Gücü Yöntemi (EPM) kullanılmıştır. Pervanenin dönüşünü modellemek için kayıcı ağ (Sliding mesh) yöntemi kullanılmıştır. Zamana bağlı hesaplamalarda, her bir zaman adımında pervanenin 1 derecelik dönüşüne karşılık gelen değer kullanılmıştır. Zaman ayrıklaştırması için ikinci derece şema kullanılmıştır.

Pervane açık su analizlerinde pervanenin bulunduğu kısım dönen bölge, geri kalan kısım ise statik bölge olacak şekilde silindirik hesaplama bölgesi oluşturulmuştur. Çözüm bölgesinde akışın başladığı yer hız girişi, bittiği yer basınç çıkışı, pervane yüzeyi duvar, dönen ve statik bölge arasındaki kısım arayüzey ve statik bölgenin yanları simetri olarak tanımlanmıştır. Tüm ölçeklerde pervane çapını D olarak

düşünürsek, dönen bölgenin çapı 1.25D ve uzunluğu 0.75D, statik bölgenin çapı 6D, pervane öncesinde 5D ve pervane iz bölgesinde 12.5D olacak şekilde hesaplama bölgesi oluşturulmuştur. Ayrıca tez çalışmasına dahil olmayan, bu çalışmadan sonra düşünülen akustik incelemeler için 1.5D çapında ve 2.5D uzunluğunda akustik bölge oluşturulmuştur. Akustik bölge de statik bölge gibi akış hacminin bir parçasıdır. Tüm ölçekler için açık su analizlerinde kullanılan hesaplama bölgesi ve sınır koşulları Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Kavitasyon ve erozyon analizleri hesaplama bölgesi ve sınır koşulları.

5.2 Ağ Örgüsünün Oluşturulması

Kavitasyon ve erozyon oluşumunu modellemek için oluşturulan ağ örgüsü, açık su analizlerinde oluşturulan ağ örgüsüne benzer yapıda oluşturulmuştur. Bu analizlerde model ölçeğinde y^+ değeri 1 ve tam ölçekte 50 olacak şekilde ağ örgüsü oluşturulmuştur. Model ölçeğinde sınır tabaka kalınlığı amprik olarak hesaplanmış ve sınır tabaka içerisinde 30 hücre katmanı kalacak şekilde 1.2 büyüme oranı ile ağ örgüsü oluşturulmuştur. Tam ölçekte ise sınır tabaka içerisinde 20 hücre katmanı ve 1.2 büyüme oranı ile ağ örgüsü modellenmiştir.

Ağ örgüsü oluşturulurken dikkat edilen diğer bir önemli nokta, model ve tam ölçekte, maksimum yan oranlarının aynı olmasıdır. 3 farklı model ölçeğinde ve tam ölçekte ağ örgüsü oluşturulurken bu koşul sağlanmıştır. Yan oran, ağ örgüsünün kalitesini belirleyen önemli bir parametredir ve yan oranın 1'e yakın olması beklenir.

Çizelge 5.1'de tüm ölçekler için pervanenin dönme merkezindeki, 0.2D gerisindeki ve 0.2D önündeki kesitlerde ortalama yan oranları dönen bölge, akustik bölge ve statik

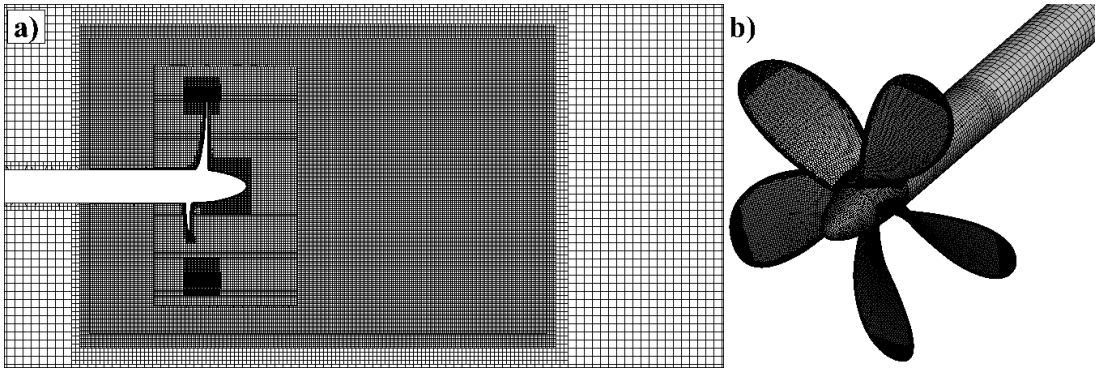
bölgede ayrı ayrı verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere tüm ölçeklerde yan oranları benzerdir ve 1'e yakındır.

Çizelge 5.1 : Tüm ölçeklerde ortalama yan oranları.

x/D	Bölge	D_S	D_M	D_B	D_{FS}
	Dönen	0.990	0.990	0.991	0.993
-0.2	Akustik	0.984	0.981	0.982	0.987
	Statik	0.994	0.995	0.995	0.995
	Dönen	0.959	0.960	0.962	0.965
0	Akustik	0.989	0.981	0.982	0.985
	Statik	0.994	0.995	0.995	0.995
	Dönen	0.991	0.992	0.993	0.994
0.2	Akustik	0.984	0.981	0.982	0.988
	Statik	0.994	0.994	0.995	0.995

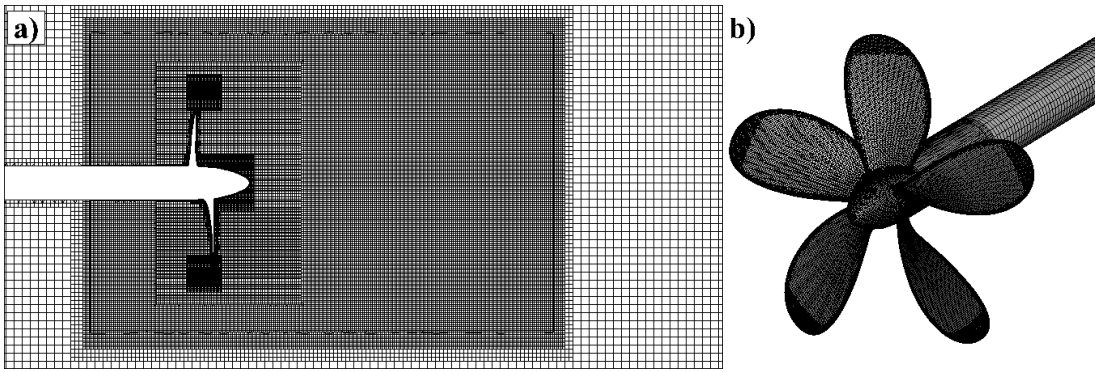
Ağın yoğunluğu ve sıklığı çözümün doğruluğu açısından diğer önemli parametredir. Bu nedenle, pervane önder ve izler kenarında, dönen ve akustik bölge içerisinde ve iz bölgesinde ağ örgüsü sıklaştırılarak daha fazla eleman kullanılmış, statik bölgede ise daha az eleman kullanılarak hücre sayısının çok fazla artmaması sağlanmıştır. Ayrıca özellikle kavitasyon oluşumu beklenen kanat uçlarında ve şaft ucunda ağ örgüsü sıklaştırılmıştır.

Pervane kavitasyon ve erozyon oluşumu analizlerinde, model ve tam ölçekte ağ örgüsü Durum 1 için oluşturulmuş ve diğer tüm durumlarda aynı ağ örgüsü kullanılmıştır. Şekil 5.2'de D_S (173 mm) çapındaki pervane için oluşturulan ağ örgüsünün profil ve pervane üzerindeki görünüşüne yer verilmiştir.



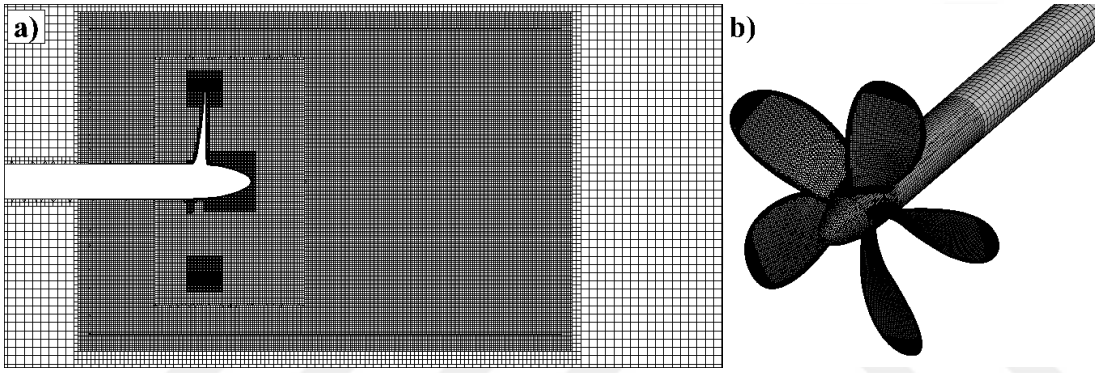
Şekil 5.2 : D_S için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey.

Şekil 5.3'de D_M (246.4 mm) çapındaki pervane için oluşturulan ağ örgüsünün profil ve pervane üzerindeki görünüşüne yer verilmiştir.



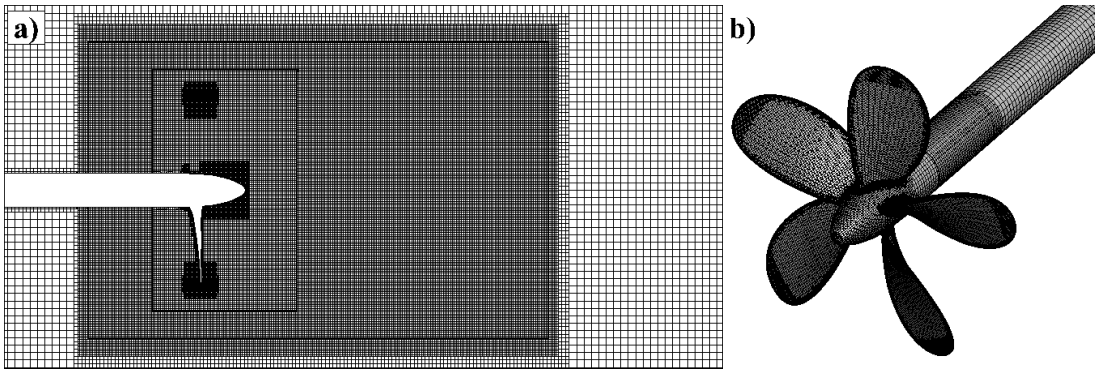
Şekil 5.3 : D_M için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey.

Şekil 5.4'de D_B (350.9 mm) çapındaki pervane için oluşturulan ağ örgüsünün profil ve pervane üzerindeki görünüşüne yer verilmiştir.



Şekil 5.4 : D_B için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey.

Şekil 5.5'de D_{FS} (6138 mm) çapındaki pervane için oluşturulan ağ örgüsünün profil ve pervane üzerindeki görünüşüne yer verilmiştir.



Şekil 5.5 : D_{FS} için ağ örgüsü görünüşleri, a) profil b) yüzey.

Şekillerden görüldüğü üzere kavitasyon ve erozyon oluşumu için oluşturulan ağ örgüsü açık su analizlerine göre farklıdır ve daha fazla hücre içerir. Bu nedenle iki analiz için iki farklı ağ örgüsü kullanılmıştır.

5.3 İncelenen Akış Koşulları

DTMB 5415 pervanesinin kavitasyon ve erozyon oluşumu tahmini analizleri açık su analizlerinde olduğu gibi 3 farklı model ölçeğinde ve tam ölçekte incelenmiştir. Akış koşulları belirlenirken DTMB 5415 gemisinin literatürdeki sevk koşulları incelenmiştir. Song ve diğ. (2019) çalışmasında DTMB 5415 gemisinin 4 farklı durumda sevk koşulları verilmiştir. Bu çalışmadaki durumlar dikkate alınarak 4 farklı durum için kavitasyon sayıları hesaplanmış, kavitasyon ve erozyon oluşumu analizleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.2'de incelenen durumlar gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 : Kavitasyon oluşumu incelenen akış koşulları.

	Durum 1				Durum 2			Durum 3			Durum 4		
	D_S	D_M	D_B	D_{FS}	D_S	D_M	D_B	D_S	D_M	D_B	D_S	D_M	D_B
J	0.747	0.747	0.747	0.747	0.788	0.788	0.788	0.795	0.795	0.795	0.808	0.808	0.808
σ_N	0.787	0.787	0.787	0.787	1.208	1.208	1.208	1.545	1.545	1.545	2.137	2.137	2.137
n (rps)	32.42	27.16	22.76	3.04	30.73	25.75	21.57	30.45	25.51	21.38	29.96	25.10	21.04
P_a (bar)	14036	19282	26751	142276	18715	32170	36242	23085	32170	45106	30340	42504	59821
P_V (bar)	1706	1706	1706	1671	1706	1706	1706	1706	1706	1706	1706	1706	1706
V_A (m/s)	4.190	5.000	5.967	13.941	4.190	5.000	5.967	4.190	5.000	5.967	4.190	5.000	5.967

Çizelgedeki P_0 (P_0=Patm+ρgH) hidrostatik basıncı ifade etmektedir. P_V ise buhar basıncını ifade etmektedir ve sıcaklık değerine karşı gelen buhar basıncı değeri ITTC (2011) Tatlı ve Deniz Suyu Özellikleri prosedüründen alınmıştır. Hesaplamalı çalışmalar 15° sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.2'de verilen dört duruma ek olarak kavitasyon sayısı ve erozyon gücü (EP) arasındaki ilişkiyi görmek için 246.4 mm çapındaki (D_M) pervanede, Çizelge 5.3'de verilen 3 durum daha incelenmiştir.

Çizelge 5.3 : D_M çapı, EP ve σ_N arasındaki ilişki için incelenen ek durumlar.

Parametreler	Durum 5	Durum 6	Durum 7
J	0.650	0.530	0.460
σ_N	0.600	0.400	0.300
n (rps)	31.08	38.06	43.95
P_a (bar)	19282	19282	19282
P_V (bar)	1706	1706	1706
V_A (m/s)	5.000	5.000	5.000

5.4 Ağdan Bağımsızlık Çalışması

Bu bölümde, açık su analizlerinde elde edilen sonuçların ağ yoğunluğundan bağımsız olduğunu göstermek için 3 farklı yoğunlukta ağ örgüsü oluşturulmuştur. Tüm ölçeklerde A, B ve C kodları sırasıyla seyrek, orta ve sık ağları ifade etmektedir. A kodlu ağdaki hücre boyutu $\sqrt[3]{2}$ kat küçültülürek B kodlu ağ örgüsü, benzer şekilde B kodlu ağ örgüsünün hücre boyutu küçültülerek C kodlu ağ örgüsü oluşturulmuştur. Hücre boyutunun küçültülmesi, ağ örgüsü içerisinde tüm bölgelere uygulanmış ancak sadece sınır tabaka içerisinde değişiklik yapılmıştır. Ağdan bağımsızlık çalışmasında uygun ağın seçimi için pervanenin 0.747 ilerleme sayısındaki K_T değeri ve yüzey üzerindeki kavitasyon alanı referans alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında ayrıca zamandan bağımsızlık analizleride yapılmıştır. A, B ve C yoğunluğundaki ağ örgülerinden tercih edilen ağ örgüsü için zamandan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Pervanenin bir derecelik dönüşe karşılık gelen zaman değeri yine 2 kez $\sqrt[3]{2}$ kat büyütürülerek 3 farklı zaman adımında incelemeler yapılmıştır.

Çizelge 5.4'te tüm ölçeklerde A, B, C kodlu ağ örgülerine karşılık hücre sayıları, temel hücre boyutları (h), K_T değerleri ve yüzey kavitasyon alanları verilmiştir.

Çizelge 5.4 : J=0.747 için ağdan bağımsızlık çalışması sonuçları.

Çap (mm)	Çözüm Ağı	Hücre sayısı	K_T	Kav. alanı (m^2)	h (m)
173	A_S	4.0E+06	0.1072	8.987E-03	0.028
	B_S	6.2E+06	0.1074	8.909E-03	0.035
	C_S	1.0E+07	0.1075	8.876E-03	0.044
246.4	A_M	5.1E+06	0.1038	1.814E-02	0.035
	B_M	8.2E+06	0.1043	1.844E-02	0.044
	C_M	1.4E+07	0.1045	1.857E-02	0.056
350.9	A_B	6.1E+06	0.1019	3.873E-02	0.046
	B_B	1.0E+07	0.1027	3.848E-02	0.058
	C_B	1.7E+07	0.1029	3.840E-02	0.073

Çizelge 5.4 incelendiğinde tüm ölçeklerde B ağından C ağına göre olan değişim, A ağından B ağına olan değişime göre oldukça düşüktür. Bu nedenle B ve C ağlarında değişim miktarı çok az olduğu için sonuçlar artık ağa bağlı değildir. Bu çalışmada tüm ölçeklerde C ağ örgüsü kullanılmıştır.

Tüm ölçeklerde seçilen C ağ örgüsü için zamandan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Çizelge 5.5'te tüm ölçeklerde Δt_1, Δt_2, Δt_3 zaman adımlarına karşılık, K_T değerleri ve yüzey kavitasyon alanları verilmiştir.

Çizelge 5.5 : J=0.747 için zamandan bağımsızlık çalışması sonuçları.

Çap (mm)	Zaman Adımı	Δt (s)	K_T	Kav. alanı (m^2)
173	Δt_{1S}	8.6E-05	0.1075	8.876E-03
	Δt_{2S}	1.1E-04	0.1076	8.862E-03
	Δt_{3S}	1.4E-04	0.1079	8.836E-03
246.4	Δt_{1M}	1.0E-04	0.1045	1.857E-02
	Δt_{2M}	1.3E-04	0.1043	1.838E-02
	Δt_{3M}	1.6E-04	0.1037	1.791E-02
350.9	Δt_{1B}	1.2E-04	0.1029	3.840E-02
	Δt_{2B}	1.5E-04	0.1027	3.847E-02
	Δt_{3B}	1.9E-04	0.1023	3.856E-02

Çizelgeden görüldüğü üzere Δt_1 ve Δt_2 ağlarında değişim çok azdır. Bu nedenle tüm ölçeklerde Δt_1 zaman adımı tercih edilmiştir. Hesaplamalı sonuçlar neticesinde elde edilen sonuçların hassasiyeti Bölüm 4.4'te verilen ağ yakınsama indeksi (GCI), prosedürüne göre hesaplanmıştır. GCI hesabında K_T ve yüzey kavitasyon alanı referans olarak kullanılmıştır ve bu iki değer için GCI hesaplanmıştır.

Çizelge 5.4'teki değerler kullanılarak itme katsayısı (K_T) için ağdan bağımsızlık ağ yakınsama indeksi (GCI) değeri tüm ölçeklerde hesaplanmıştır ve Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 : K_T ağdan bağımsızlık ayrıklaştırma hatası değerleri.

Çap (mm)	Çözüm Ağı	Φ	ε_{21}	ε_{32}	p	Φ_{ext}^{21}	e_a^{21}	$GCI_{sık}^{21}$
173	A_S	0.1072						
	B_S	0.1074	-1.063E-04	-1.722E-04	1.433	0.108	0.001	0.31%
	C_S	0.1075						
246.4	A_M	0.1038						
	B_M	0.1043	-1.621E-04	-5.195E-04	6.989	0.105	0.002	0.05%
	C_M	0.1045						
350.9	A_B	0.1019						
	B_B	0.1027	-2.760E-04	-7.750E-04	4.702	0.103	0.003	0.17%
	C_B	0.1029						

Çizelge 5.5'teki değerler kullanılarak itme katsayısı (K_T) için zamandan bağımsızlık ağ yakınsama indeksi (GCI) değeri tüm ölçeklerde hesaplanmıştır ve Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7 : K_T zamandan bağımsızlık ayrıklaştırma hatası değerleri.

Çap (mm)	Zaman adımı	Φ	ε_{21}	ε_{32}	p	Φ_{ext}^{21}	e_a^{21}	$GCI_{sık}^{21}$
173	Δt_{1S}	0.1075	1.251E-04	2.637E-04	2.333	0.107	0.001	0.20%
	Δt_{2S}	0.1076						
	Δt_{3S}	0.1079						
246.4	Δt_{1M}	0.1045	-1.892E-04	-6.005E-04	6.781	0.105	0.002	0.06%
	Δt_{2M}	0.1043						
	Δt_{3M}	0.1037						
350.9	Δt_{1B}	0.1029	-2.335E-04	-3.945E-04	1.536	0.103	0.002	0.67%
	Δt_{2B}	0.1027						
	Δt_{3B}	0.1023						

Toplam belirsizlik hesabı denklem 5.1'e göre bulunmuştur.

$$GCI_{Top} = \sqrt{(GCI_{ağ})^2 + (GCI_{zaman})^2} \quad (5.1)$$

Bu denklemde $GCI_{ağ}$ ifadesi ağdan bağımsızlık çalışmasındaki GCI değerini, GCI_{zaman} ifadesi ise zamandan bağımsızlık çalışmasındaki GCI değerini ifade etmektedir. Buna göre K_T değeri için 173 mm çapta GCI_{Top} %0.375, 246.4 mm çapta GCI_{Top} %0.077 ve 350.9 mm çapta GCI_{Top} %0.687 hesaplanmıştır.

Çizelge 5.4'teki değerler kullanılarak yüzey kavitasyon alanı için ağdan bağımsızlık ağ yakınsama indeksi (GCI) değeri tüm ölçeklerde hesaplanmıştır ve Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8 : Kavitasyon alanı ağdan bağımsızlık ayrıklaştırma hatası değerleri.

Çap (mm)	Çözüm ağı	Φ	ε_{21}	ε_{32}	p	Φ_{ext}^{21}	e_a^{21}	$GCI_{sık}^{21}$
173	A_S	0.0090	3.221E-05	7.800E-05	3.195	0.009	0.004	0.42%
	B_S	0.0089						
	C_S	0.0089						
246.4	A_M	0.0181	-1.259E-04	-3.052E-04	3.202	0.019	0.007	0.77%
	B_M	0.0184						
	C_M	0.0186						
350.9	A_B	0.0387	8.831E-05	2.478E-04	4.692	0.038	0.002	0.15%
	B_B	0.0385						
	C_B	0.0384						

Çizelge 5.5'teki değerler kullanılarak yüzey kavitasyon alanı için zamandan bağımsızlık ağ yakınsama indeksi (GCI) değeri tüm ölçeklerde hesaplanmıştır ve Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9 : Kavitasyon alanı zamandan bağımsızlık ayrıklaştırma hatası değerleri.

Çap (mm)	Zaman adımı	Φ	ε_{21}	ε_{32}	p	Φ_{ext}^{21}	e_a^{21}	$GCI_{sık}^{21}$
173	Δt_{1S}	0.0089	-1.495E-05	-2.513E-05	1.523	0.009	0.002	0.50%
	Δt_{2S}	0.0089						
	Δt_{3S}	0.0088						
246.4	Δt_{1M}	0.0186	-1.835E-04	-4.702E-04	3.678	0.019	0.010	0.92%
	Δt_{2M}	0.0184						
	Δt_{3M}	0.0179						
350.9	Δt_{1B}	0.0384	7.368E-05	9.147E-05	0.982	0.038	0.002	0.94%
	Δt_{2B}	0.0385						
	Δt_{3B}	0.0386						

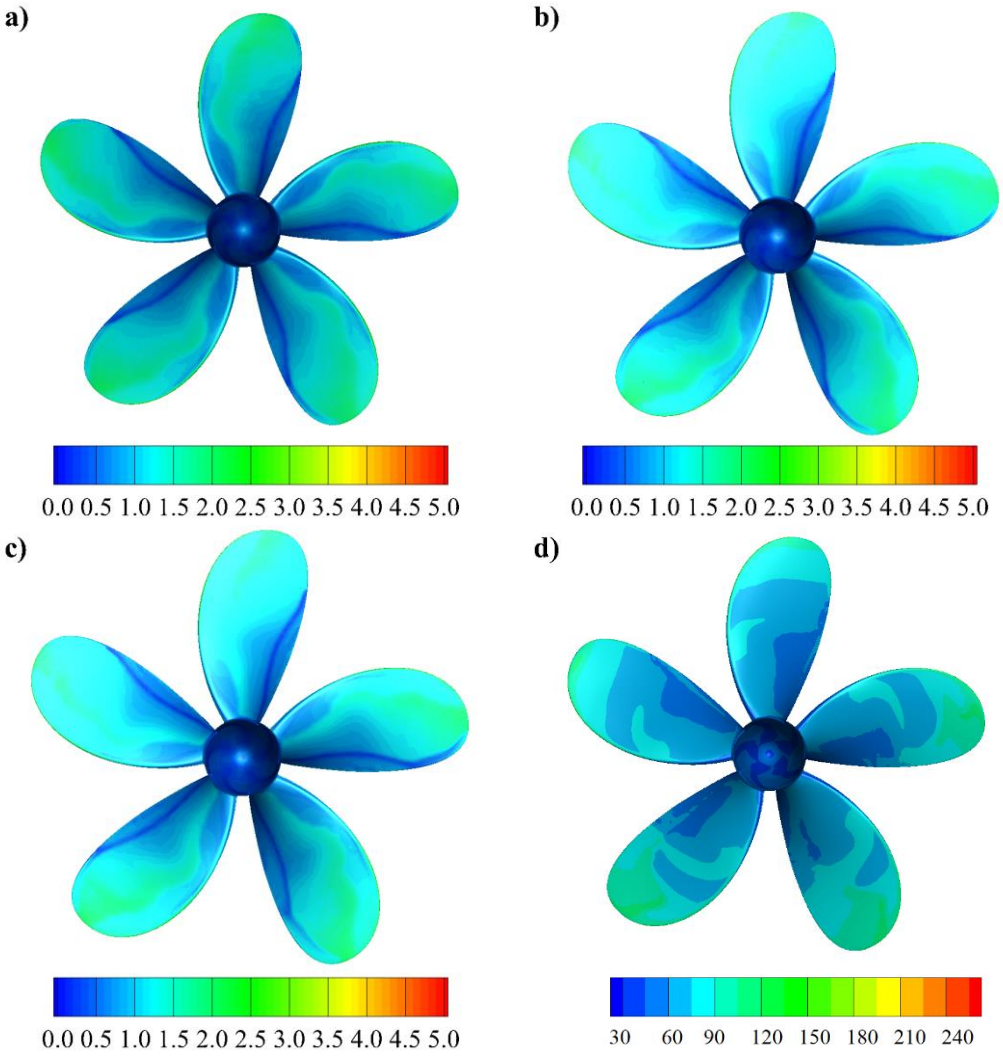
Buna göre K_T değeri için 173 mm çapta GCI_{Top} %0.649, 246.4 mm çapta GCI_{Top} %1.204 ve 350.9 mm çapta GCI_{Top} %0.953 hesaplanmıştır.

5.5 Kavitasyon ve Erozyon Oluşumu Sonuçları

DTMB 5415 pervanesinin kavitasyon oluşumu analizleri Bölüm 5.4'te verilen akış koşullarına göre incelenmiş, 3 model ölçeği ve tam ölçekte itme katsayısı (K_T), tork katsayısı (K_Q), açık su verimi (η_0) ve yüzey kavitasyon alananın boyutsuz hali (C_{KA}), Bölüm 3.4.2'deki denklemlere göre elde edilmiştir. Tüm ölçeklerde elde edilen boyutsuz değerler karşılaştırmalı olarak Bölüm 5.6'da verilecektir.

DTMB 5415 pervanesi için erozyon oluşumu analizleri ise Bölüm 5.4'te verilen akış koşullarına göre incelenmiş, 3 model ölçeği ve tam ölçekte boyutsuz erozyon gücü (C_{EP}), Bölüm 3.4.2'deki denklemlere göre elde edilmiştir. Tüm ölçeklerde elde edilen boyutsuz değerler karşılaştırmalı olarak Bölüm 5.7'de verilecektir.

Pervane yüzeyindeki y^+ değerleri Durum 1 için Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Model ölçeğinde y^+ değerleri görüldüğü üzere viskoz alt tabakada ($y^+ \leq 5$) tutulmuştur. İncelenen diğer 6 durumda da y^+ değerleri viskoz alt tabakadadır. Tam ölçekte ise Logaritmik bölgededir ($30 \leq y^+ \leq 300$).



Şekil 5.6 : Kavitasyon oluşumu y+ dağılımları, a) D_S b) D_M c) D_B d) D_{FS}.

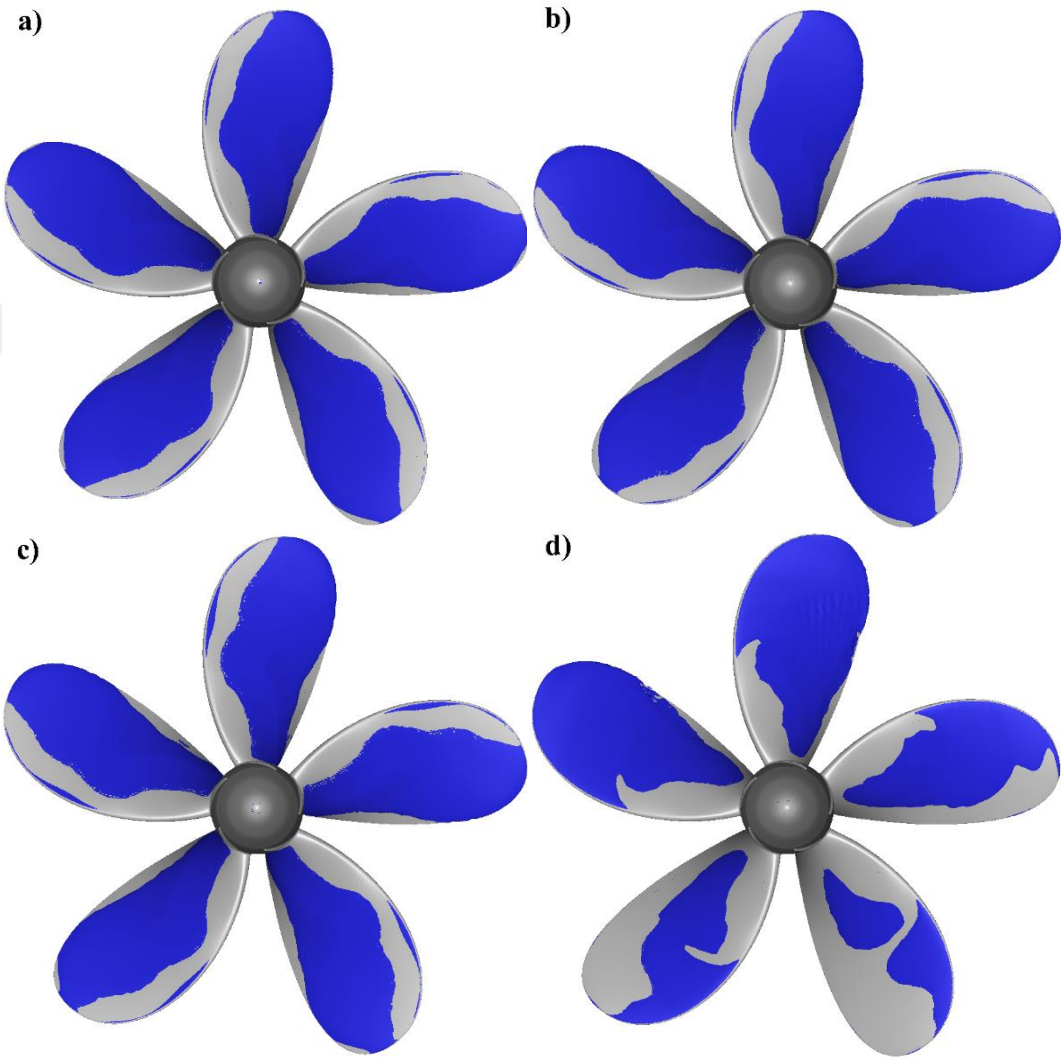
5.6 Kavitasyon Oluşumu Ölçek Etkisinin İncelenmesi

Bu bölümde kavitasyon analizi gerçekleştirilen durumlar model ölçeğinde ve tam ölçekte karşılaştırmalı olarak verilecektir. Çizelge 5.10'da Durum 1 için elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

Çizelge 5.10 : Durum 1 D_S, D_M, D_B ve D_{FS} için sonuçlar.

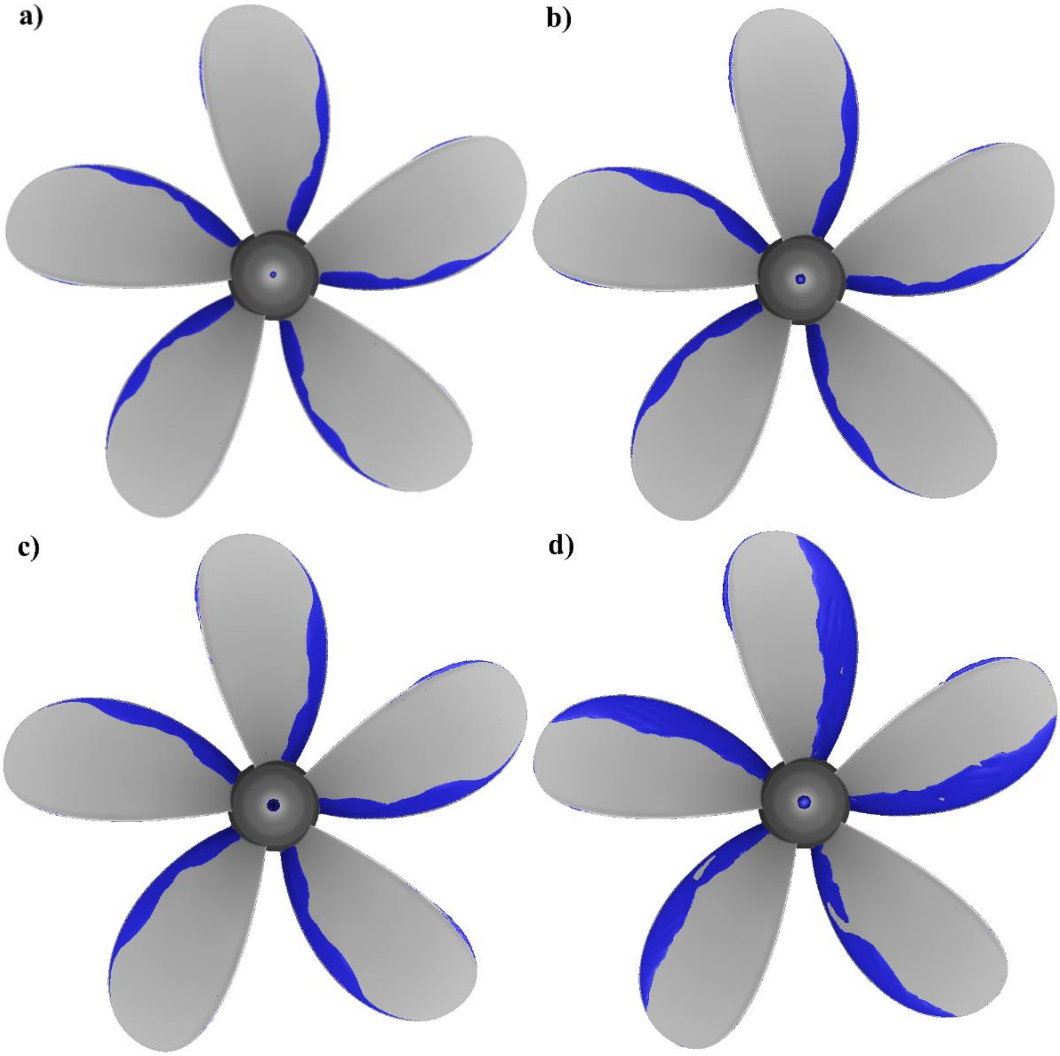
	D_S	D_M	D_B	D_{FS}
σ_N	0.787	0.787	0.787	0.787
J	0.747	0.747	0.747	0.747
K_T	0.1075	0.1045	0.1030	0.1103
$10K_Q$	0.2049	0.1992	0.1971	0.1953
η_0	0.624	0.624	0.621	0.671
C_{KA}	33.04%	34.07%	34.73%	35.91%

Çizelgeden görüldüğü üzere model ölçeğinde, model boyu büyüdükçe K_Q ve K_T değerleri azalmıştır ancak tam ölçekte K_T değeri artmıştır. Yüzey üzerindeki kavitasyon alanının yüzey alanına oranı ise artmıştır. Şekil 5.7'de Durum 1 için kavitasyon oluşumları pervanenin emme yüzeyinde tüm ölçeklerde gösterilmiştir. Bu tez çalışması boyunca kavitasyon oluşumlarında buhar hacmi oranı %50 alınmıştır.



Şekil 5.7 : Durum 1 emme yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B d) D_{FS}.

Şekil 5.7'den görüldüğü üzere bu durum için pervanenin emme yüzeyinde kanat ucundan kanat köküne kadar tabaka kavitasyonu gözlemlenmiştir. Model ölçeğindeki çalışmalar detaylı incelendiğinde önder kenarda 0.5 r/R'den kanat ucuna kadar olan kavitasyon oluşumu 173 mm'lik pervanede az iken model boyu büyüdükçe artmıştır. Tam ölçekteki pervanede ise kavitasyon oluşumu model ölçeğindeki kavitasyon oluşumlarından farklı bir paterndedir. Şekil 5.8'de Durum 1 için kavitasyon oluşumları, pervanenin basınç yüzeyinde tüm ölçeklerde gösterilmiştir.



Şekil 5.8 : Durum 1 basınç yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B d) D_{FS}.

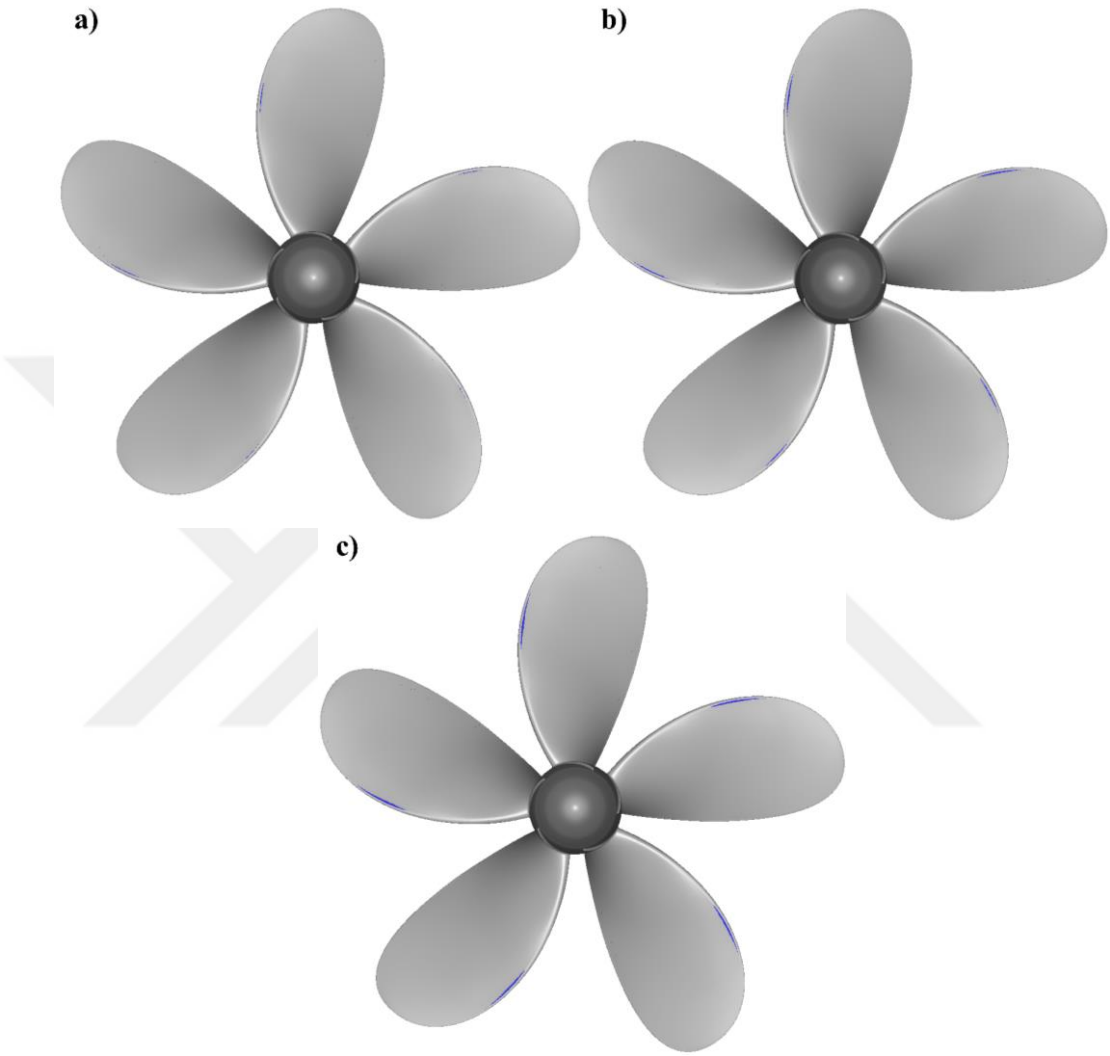
Şekil 5.8'den görüldüğü üzere tüm ölçeklerde, pervanenin önder kenarında kanat ucundan kanat köküne kadar tabaka kavitasyonu oluşumu mevcuttur. Model boyu büyüdükçe kavitasyon oluşumunun arttığı net olarak görülmektedir.

Çizelge 5.11'de Durum 2 için elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

Çizelge 5.11 : Durum 2 D_S, D_M ve D_B için sonuçlar.

	D_S	D_M	D_B
σ_N	1.208	1.208	1.208
J	0.788	0.788	0.788
K_T	0.0924	0.0935	0.0941
$10K_Q$	0.1852	0.1831	0.1802
η_0	0.626	0.641	0.655
C_{KA}	2.18%	2.40%	2.82%

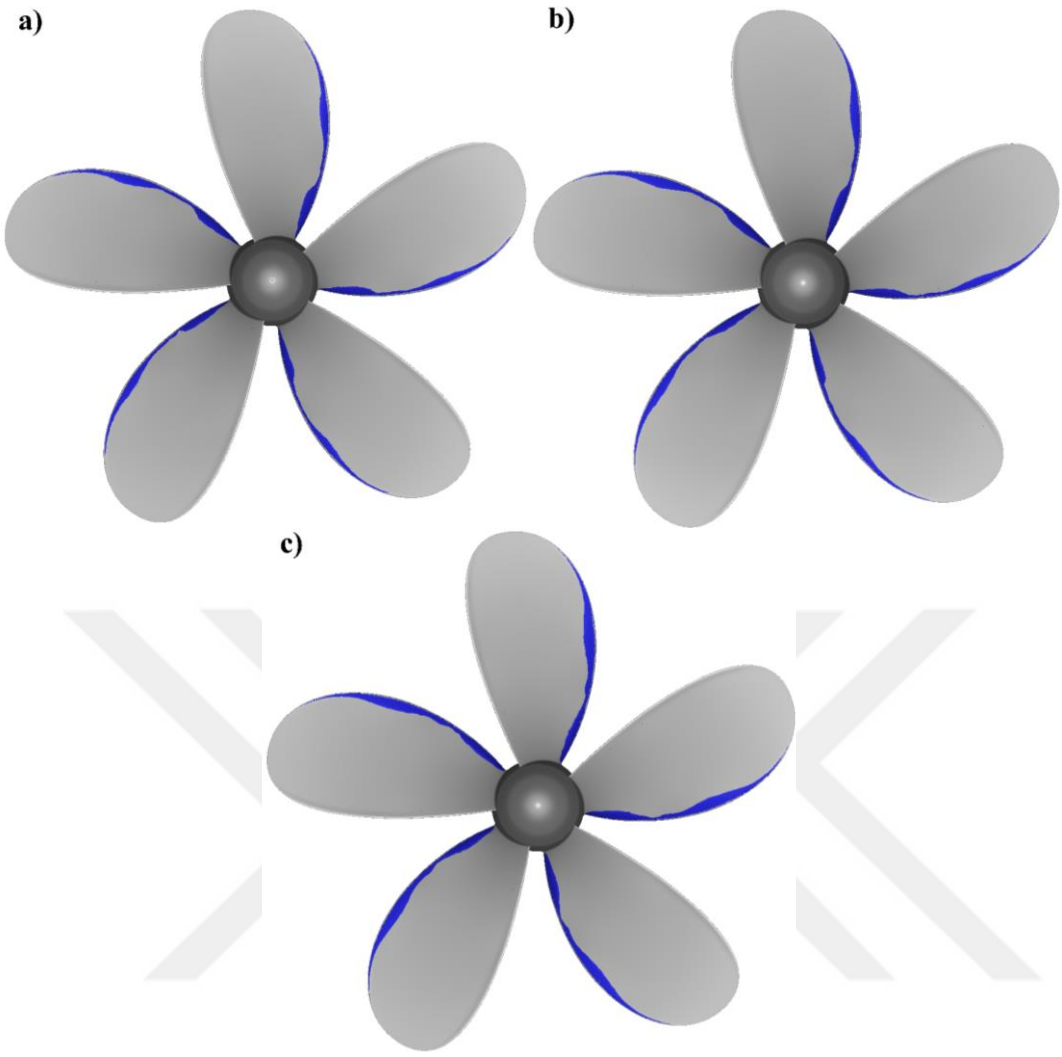
Çizelgeden görüldüğü üzere model ölçeğinde, model boyu büyüdükçe K_T değerleri ve yüzey üzerindeki kavitasyon alanının yüzey alanına oranı artmış, K_Q değerleri ise azalmıştır. Şekil 5.9'da Durum 2 için kavitasyon oluşumları pervanenin emme yüzeyinde tüm ölçeklerde gösterilmiştir.



Şekil 5.9 : Durum 2 emme yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B.

Şekilden görüldüğü üzere tüm ölçeklerde, pervanenin emme yüzeyinde, önder kenarda 0.5 r/R'den 0.65 r/R'ye kadar tabaka kavitasyonu mevcuttur. Model boyu büyüdükçe kavitasyon oluşumu artmıştır. Durum 1 ile karşılaştırıldığında ise pervane çok az kavitasyona uğramıştır. Durum 2 için kavitasyon oluşumları, pervanenin basınç yüzeyinde Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

Şekil 5.10'dan görüldüğü üzere tüm ölçeklerde, pervanenin önder kenarında kanat ucundan kanat köküne kadar tabaka kavitasyonu oluşumu mevcuttur. Model boyu büyüdükçe kavitasyon oluşumunun arttığı net olarak görülmektedir.



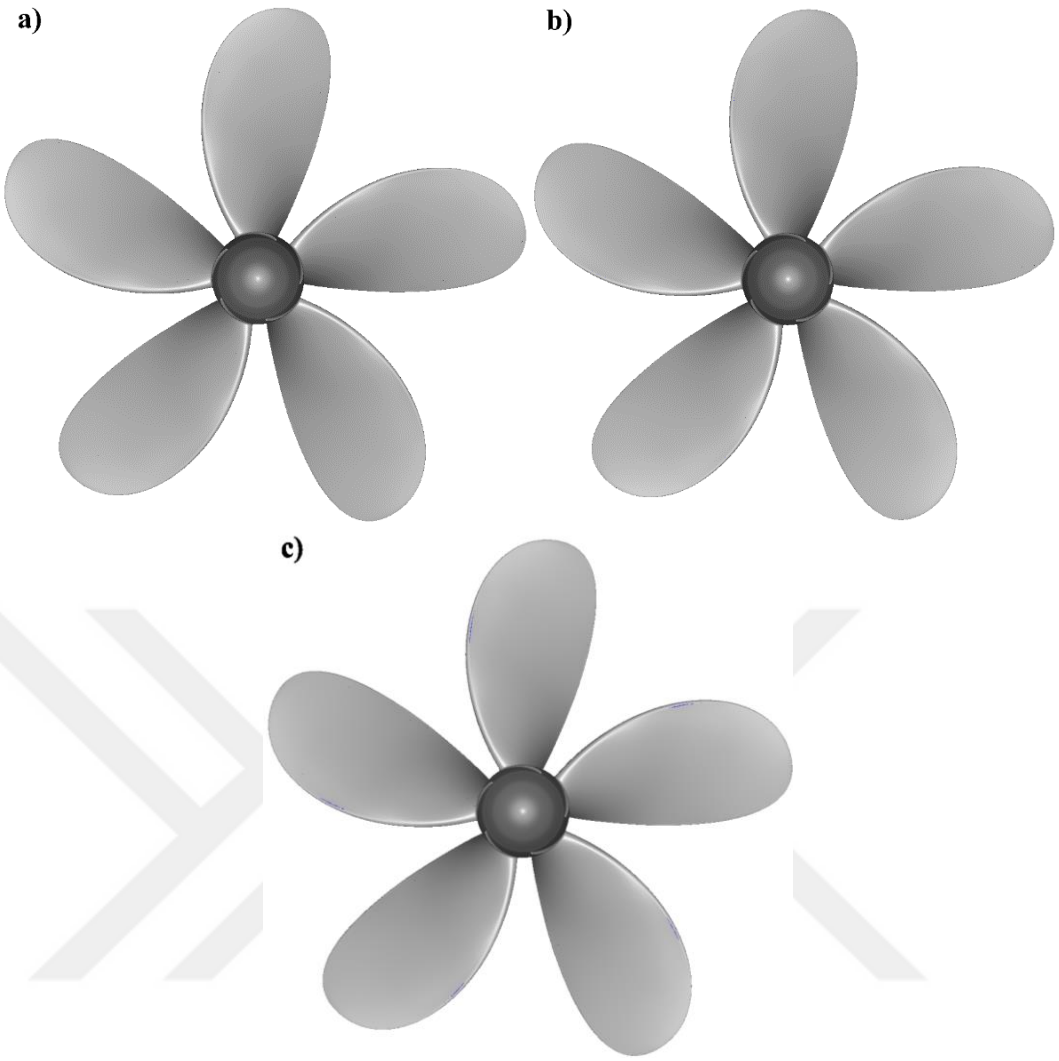
Şekil 5.10 : Durum 2 basınç yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B.

Çizelge 5.12'de Durum 3 için elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

Çizelge 5.12 : Durum 3 D_S, D_M ve D_B için sonuçlar.

	D_S	D_M	D_B
σ_N	1.545	1.545	1.545
J	0.795	0.795	0.795
K_T	0.0890	0.0899	0.0910
$10K_Q$	0.1807	0.1781	0.1758
η_0	0.624	0.639	0.656
C_{KA}	1.26%	1.42%	1.65%

Çizelgeden görüldüğü üzere model ölçeğinde, model boyu büyüdükçe K_T, η_0 değerleri ve yüzey üzerindeki kavitasyon alanının yüzey alanına oranı artmış, K_Q değerleri ise azalmıştır. Şekil 5.11'de Durum 3 için kavitasyon oluşumları pervanenin emme yüzeyinde tüm ölçeklerde gösterilmiştir.

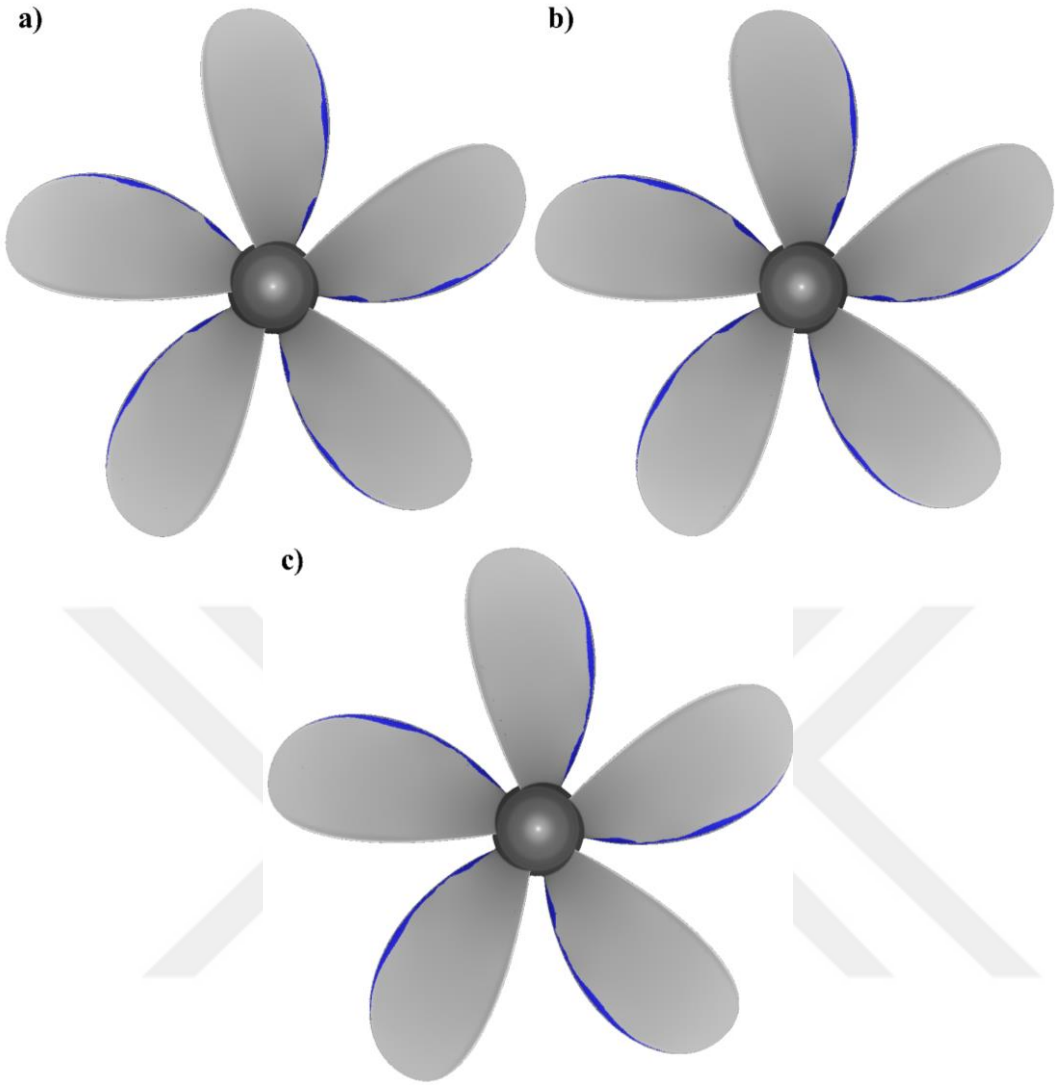


Şekil 5.11 : Durum 3 emme yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B.

Şekilden görüldüğü üzere, pervanenin emme yüzeyinde, 173 mm ve 246.4 mm'lik çaplarda kavitasyon oluşumu yoktur. 350.9 mm çaptaki pervanede ise önder kenarda 0.5 r/R'den 0.6 r/R'ye kadar olan bölgede zayıf tabaka kavitasyonu mevcuttur. Durum 1 ve 2 ile karşılaştırıldığında ise pervane çok az kavitasyona uğramıştır. Durum 3 için kavitasyon oluşumları, pervanin basınç yüzeyinde Şekil 5.12'de gösterilmiştir.

Şekil 5.12'den görüldüğü üzere tüm ölçeklerde, pervanenin önder kenarında kanat ucundan kanat köküne kadar tabaka kavitasyonu oluşumu mevcuttur. Model boyu büyüdükçe kavitasyon oluşumunun arttığı net olarak görülmektedir. Durum 1 ve 2 ile karşılaştırıldığında kavitasyon oluşumu giderek azalmaktadır.

Çizelge 5.13'de Durum 4 için elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü üzere model ölçeğinde, model boyu büyüdükçe K_T, η_0 değerleri ve yüzey üzerindeki kavitasyon alanının yüzey alanına oranı artmış, K_Q değerleri ise azalmıştır.

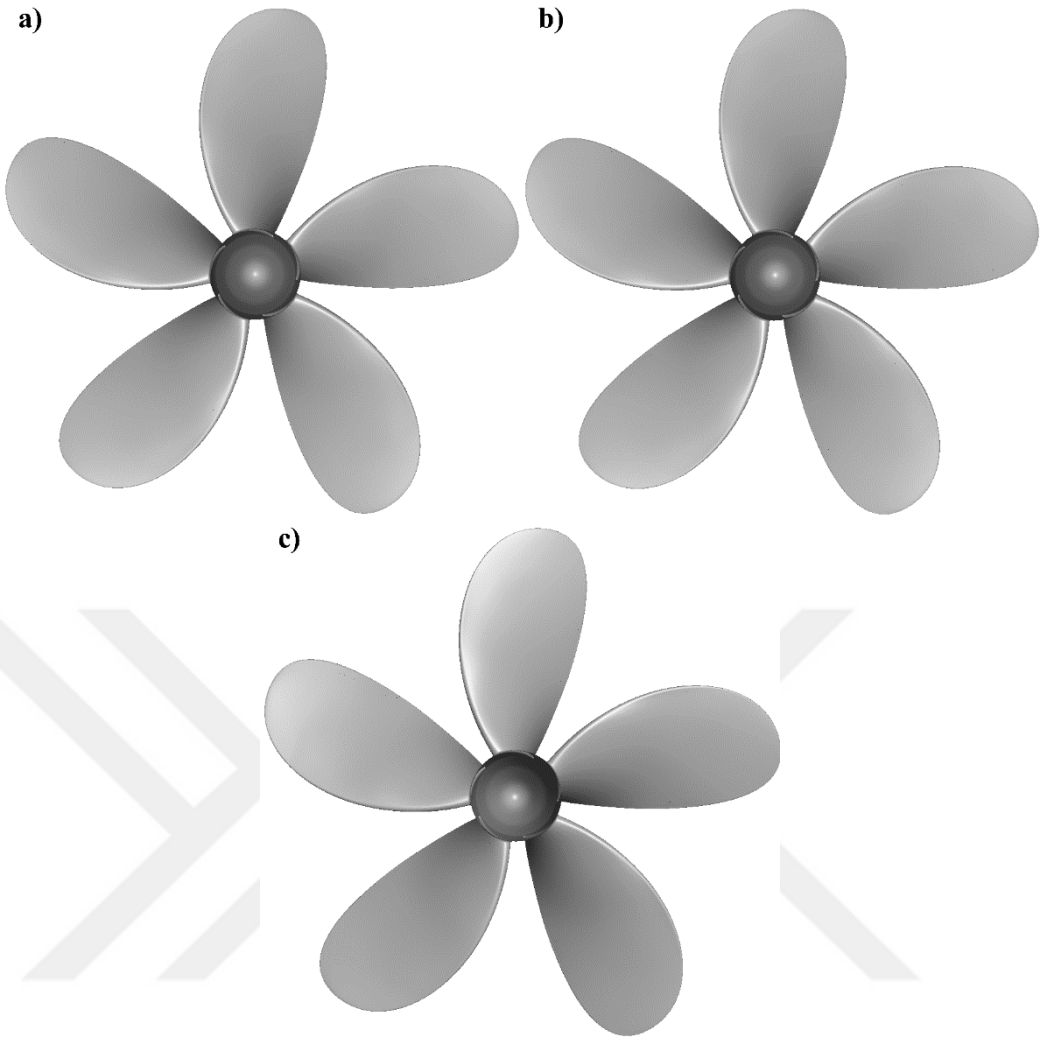


Şekil 5.12 : Durum 3 basınç yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B.

Çizelge 5.13 : Durum 4 D_S, D_M ve D_B için sonuçlar.

	D_S	D_M	D_B
σ_N	2.137	2.137	2.137
J	0.808	0.808	0.808
K_T	0.0825	0.0835	0.0848
$10K_Q$	0.1721	0.1695	0.1671
η_0	0.617	0.634	0.653
C_{KA}	0.52%	0.68%	0.82%

Şekil 5.13'de Durum 4 için kavitasyon oluşumları pervanenin emme yüzeyinde tüm ölçeklerde gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, pervanenin emme yüzeyinde kavitasyonu oluşumu yoktur. Durum 4 için kavitasyon oluşumları, pervanenin basınç yüzeyinde Şekil 5.14'de gösterilmiştir.

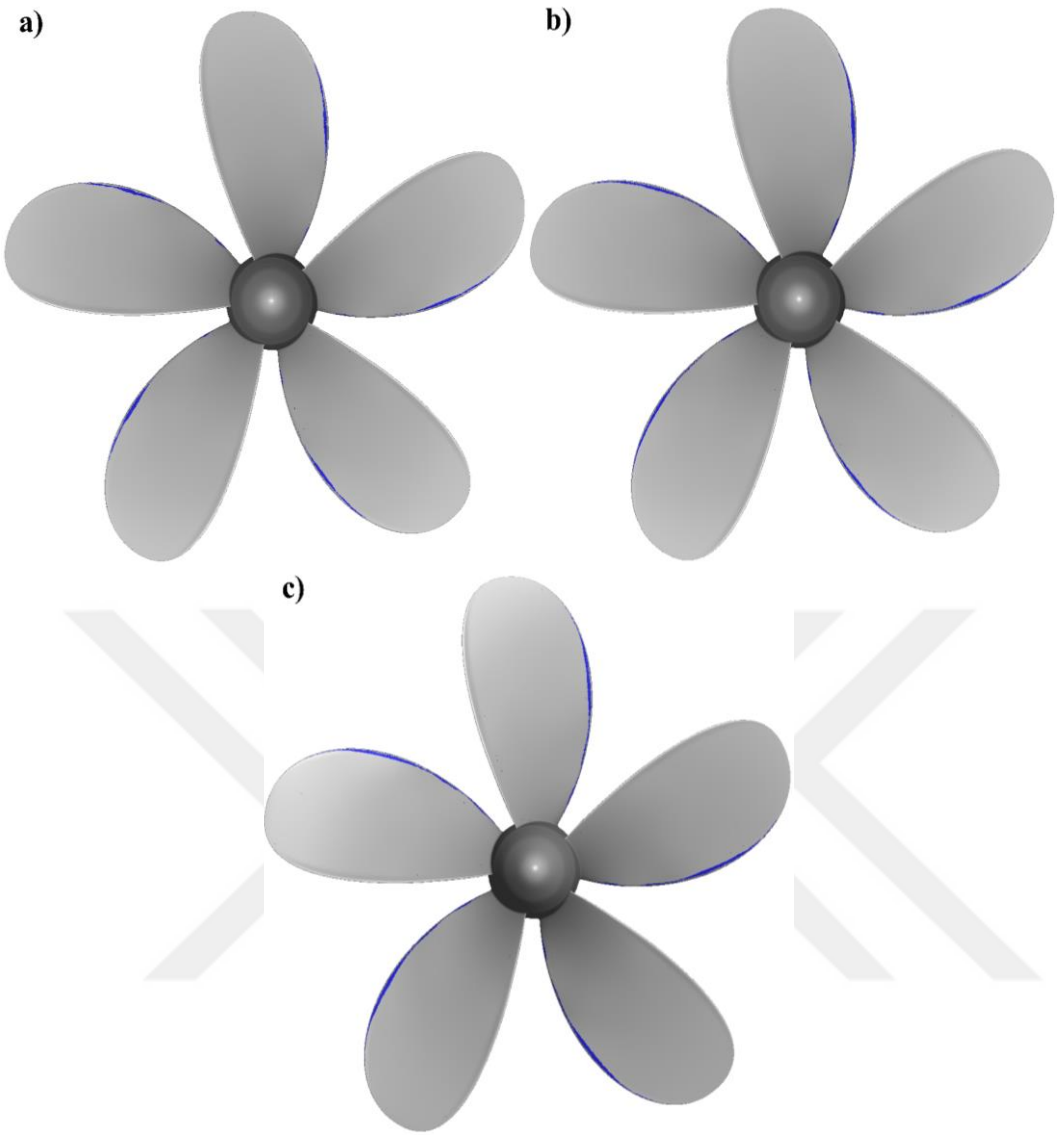


Şekil 5.13 : Durum 4 emme yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B.

Şekil 5.14'den görüldüğü üzere pervanenin önder kenarında 173 mm çapında pervane için 0.5 r/R ile 0.7 r/R arasında, 246.4 mm çapında pervane için 0.4 r/R ile 0.75 r/R arasında ve 350.9 mm çapında pervane için 0.2 r/R ile 0.8 r/R arasında kavitasyon oluşumu mevcuttur. Model boyu büyüdükçe kavitasyon oluşumunun arttığı net olarak görülmektedir. Durum 1, 2 ve 3 ile karşılaştırıldığında kavitasyon oluşumu giderek azalmaktadır.

Dört durumda incelendiğinde yüzey üzerindeki kavitasyon alanı model boyu büyüdükçe artmıştır. Pervanenin itme katsayısı (K_T) değerlendirildiğinde ise Durum 1 hariç K_T, model boyu büyüdükçe artmıştır. Tork katsayısı (K_Q) tüm durumlarda model boyu büyüdükçe azalmıştır.

Tez çalışması kapsamında kavitasyon görülme kavitasyon sayısıda tüm ölçeklerde (tam ölçek hariç) incelenmiştir ve Çizelge 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.14 : Durum 4 basınç yüzeyi kavitasyon oluşumu, a) D_S b) D_M c) D_B.

Çizelge 5.14 : Kavitasyon görülme kavitasyon sayıları.

	D_S	D_M	D_B
σ_N	5.100	5.336	5.631

Şekilden görüldüğü üzere model boyu büyüdükçe kavitasyon, daha büyük kavitasyon sayılarında görülmeye başlanmıştır. Diğer bir ifade ile aynı kavitasyon sayısında yukarıdaki 4 durumdaki gibi model boyu büyüdükçe kavitasyon oluşumu artacaktır. Buna göre tam ölçekte kavitasyon daha erken görülecektir ve pervane dizaynında bu etken dikkate alınmalıdır.

5.7 Erozyon Tahminleri Ölçek Etkisinin İncelenmesi

Bu bölümde kavitasyon analizi gerçekleştirilen durumlarda erozyon gücü yöntemi (EPM) ile kavitasyon erozyonu şiddeti değerleri hesaplanmıştır ve Bölüm 3.4.2'de verilen boyutsuzlaştırma adımlarına göre elde edilen verilen boyutsuzlaştırılmıştır.

Ölçek etkisi incelenirken pervane kanatlarındaki ortalama erozyon şiddeti değerleri kullanılmıştır. Erozyon şiddeti değerleri periyodik olarak değişmektedir. Bu nedenle analiz yakınsadıktan sonra pervanenin 3 tam turundaki değerlerin ortalaması kullanılmıştır. Çizelge 5.15'de boyutsuz erozyon gücü (C_{EP}) değerleri verilmiştir.

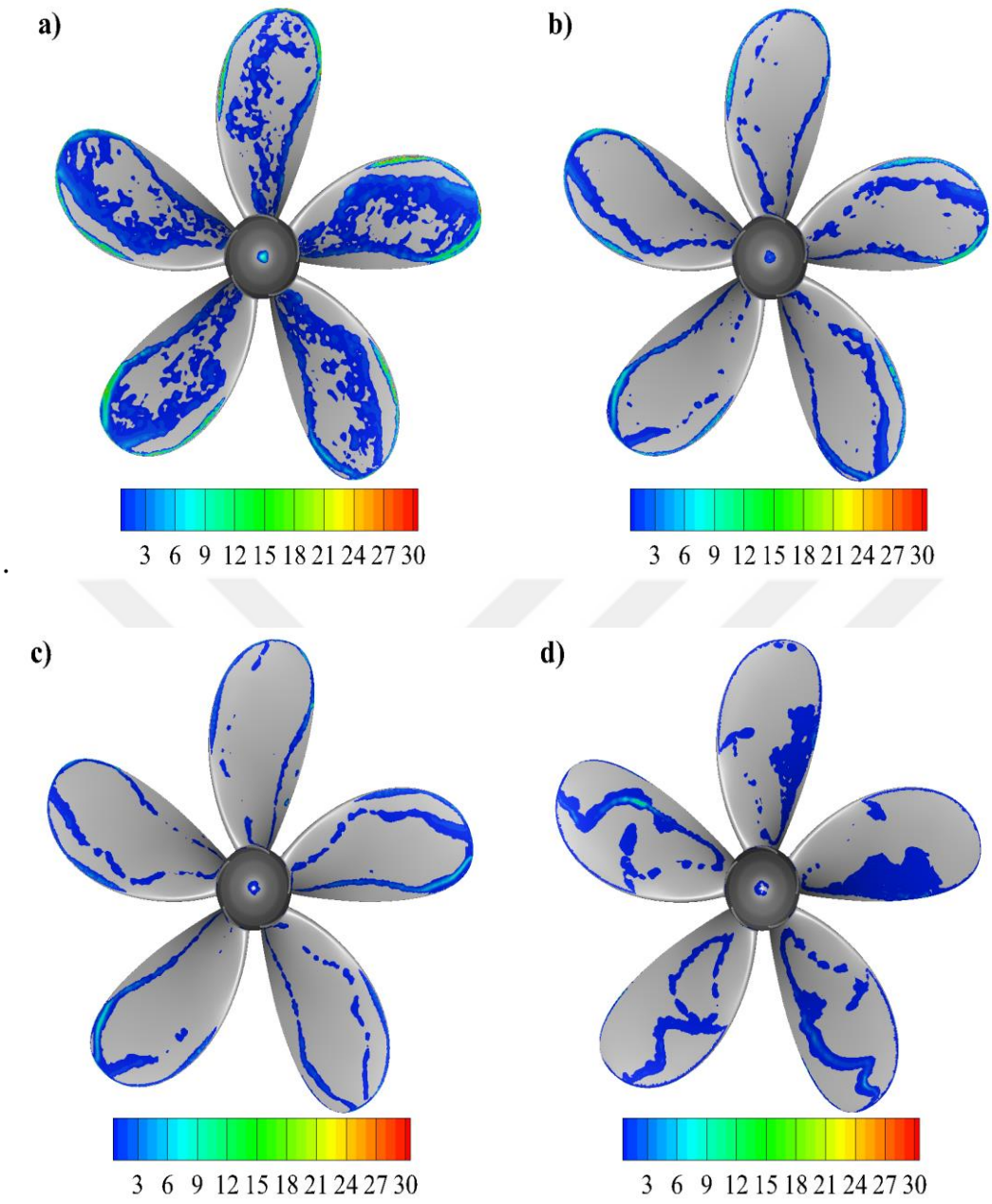
Çizelge 5.15 : Boyutsuz ortalama erozyon gücü (C_{EP}) değerleri.

Durum	σ	C_{EP}			
		D_S	D_M	D_B	D_{FS}
4	2.137	0.1577	0.1450	0.1277	
3	1.545	0.2310	0.1918	0.1494	
2	1.208	0.2835	0.2345	0.1629	
1	0.787	0.6273	0.4298	0.3132	0.0789

Çizelgeden görüldüğü üzere incelenen tüm durumlarda model boyu büyüdükçe ortalama erozyon gücü (C_{EP}) azalmıştır. Bu durum model ölçeğinde gerçekten fazla kavitasyon erozyon olduğunu göstermektedir.

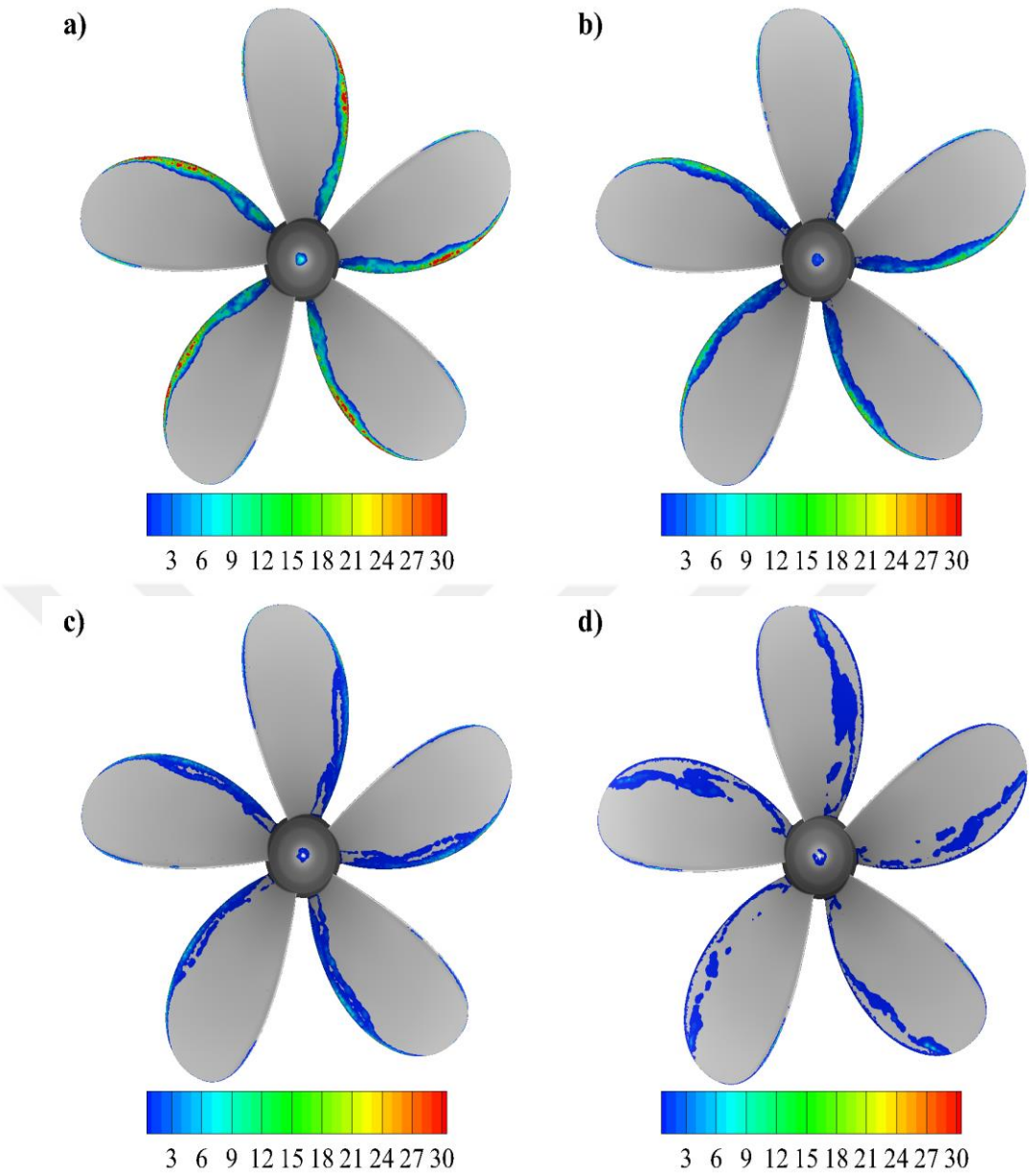
Kavitasyon analizlerinde incelenen dört durum için C_{EP} değerleri şekil üzerinde gösterilerek Çizelge 5.15'teki sonuçlar net bir şekilde ifade edilecektir.

Şekil 5.15'de Durum 1 için C_{EP} değerleri pervanenin emme yüzeyinde tüm ölçeklerde gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere erozyon oluşumları kavitasyon oluşumları ile benzerdir. 173 mm çaptaki pervanede erozyon şiddeti en yüksek iken model boyu büyüdükçe erozyon şiddeti azalmıştır. 173 mm çaptaki pervanede 0.5 r/R den kanat ucuna kadar önder ve izler kenar yüksek erozyona maruz kalırken, 246.4 mm çaptaki pervanede yine aynı böge daha az erozyana uğramıştır. 350.9 mm çaptaki pervanede 0.7 r/R den kanat ucuna kadar izler kenardaki ufak bir bölge yüksek erozyona uğramıştır. Tam ölçekte ise yalnızca tek bir kanatta 0.6 r/R ile 0.7 r/R arasındaki bir bölgede yüksek erozyon mevcuttur.



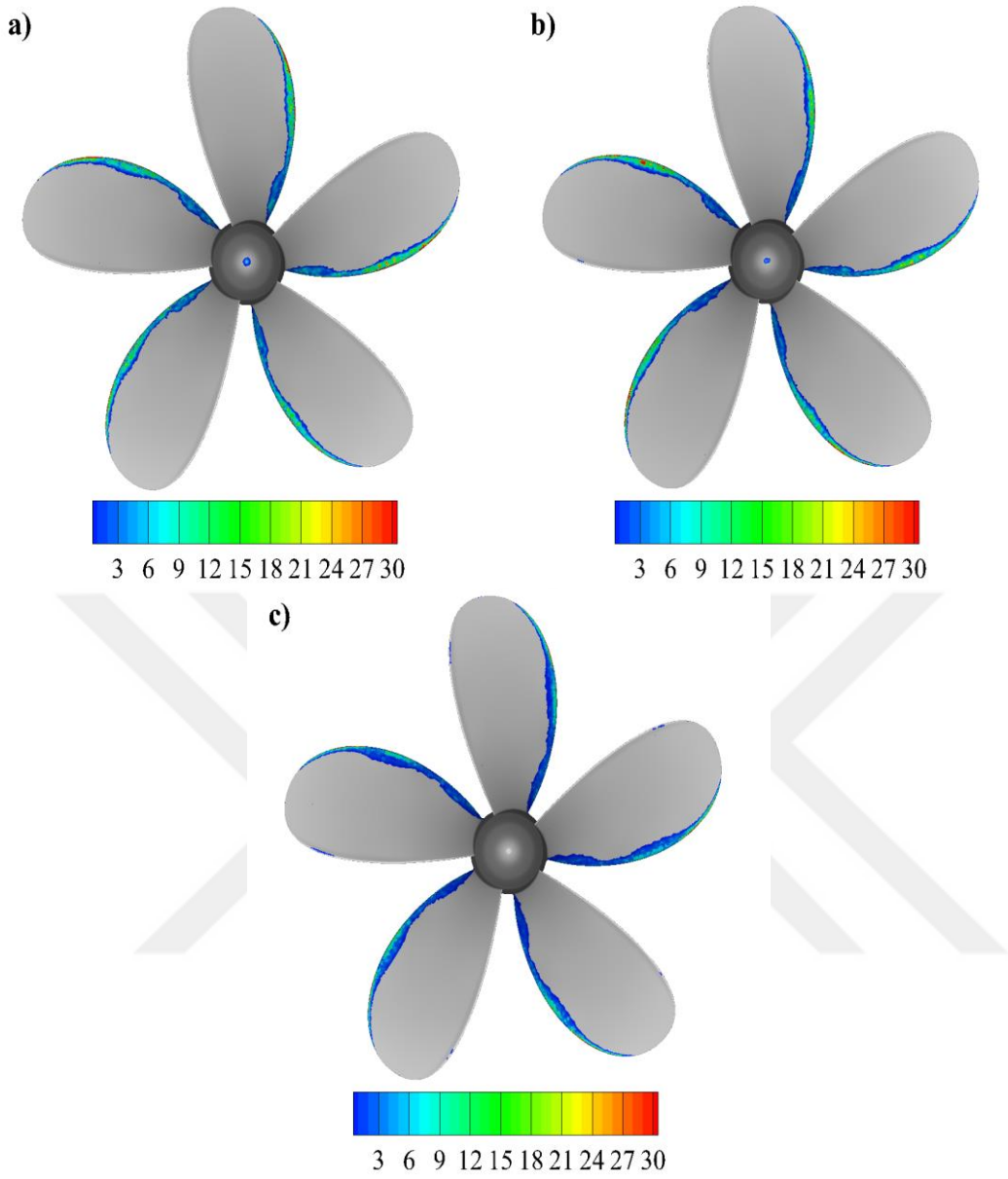
Şekil 5.15 : Durum 1 emme yüzeyi C_{EP} değerleri, a) D_S b) D_M c) D_B d) D_{FS}.

Şekil 5.16'da Durum 1 için C_{EP} değerleri pervanenin basınç yüzeyinde gösterilmiştir. Bu şekilden Çizelge 5.15'te gösterilen model boyu büyüdükçe boyutsuz erozyon gücü değerlerlerinin azaldığı net olarak görülmektedir. 173 mm çapındaki pervanede önder kenarda yüksek erozyon şiddeti görülürken, tam ölçekte ise çok az erozyon şiddeti görülmüştür. 246.4 mm çapında pervanedeki erozyon gücü 173 mm çapındaki pervaneye göre daha az, 350.9 mm çapında pervanedeki erozyon gücü ise 246.4 mm çapındaki pervaneye göre daha azdır.



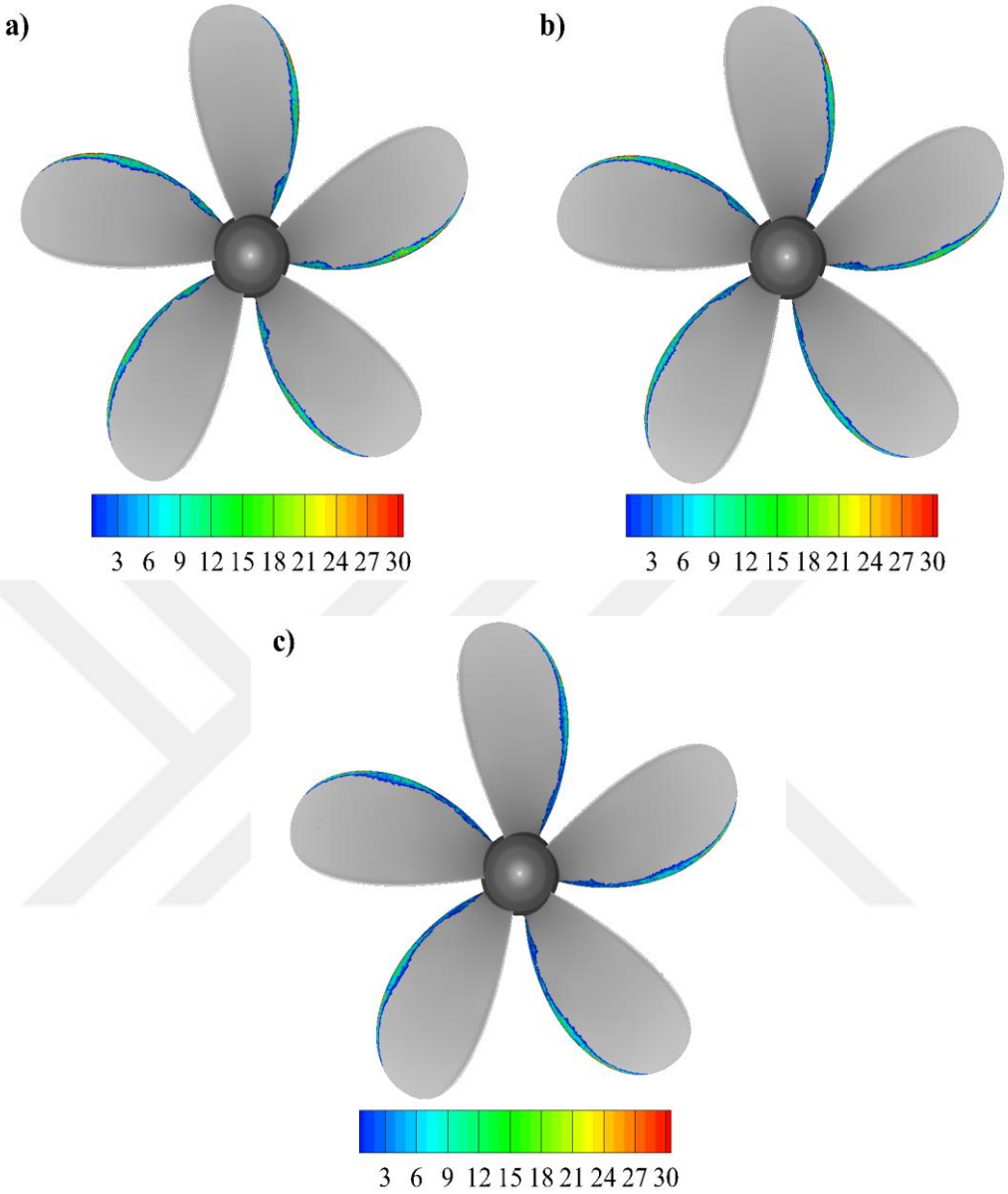
Şekil 5.16 : Durum 1 basınç yüzeyi C_{EP} değerleri, a) D_S b) D_M c) D_B d) D_{FS}.

Şekil 5.17'de Durum 2 için C_{EP} değerleri pervanenin basınç yüzeyinde gösterilmiştir. 173 mm çapındaki pervanede önder kenarda yüksek erozyon şiddeti görülürken model boyu büyüdükçe erozyon şiddeti azalmaktadır. Erozyon şiddeti Şekil 5.10'da verilen kavitasyon oluşumuna benzer bölgelerdedir. Durum 1 ile karşılaştırıldığında, Çizelge 5.15'de de görüldüğü gibi erozyon şiddeti Durum 2'de Durum 1'e göre daha azdır. Pervanenin emme yüzeyinde ise kavitasyon oluşumlarında da verildiği üzere pervanede çok fazla kavitasyon oluşumu olmadığından erozyon da çok az görülmüştür.



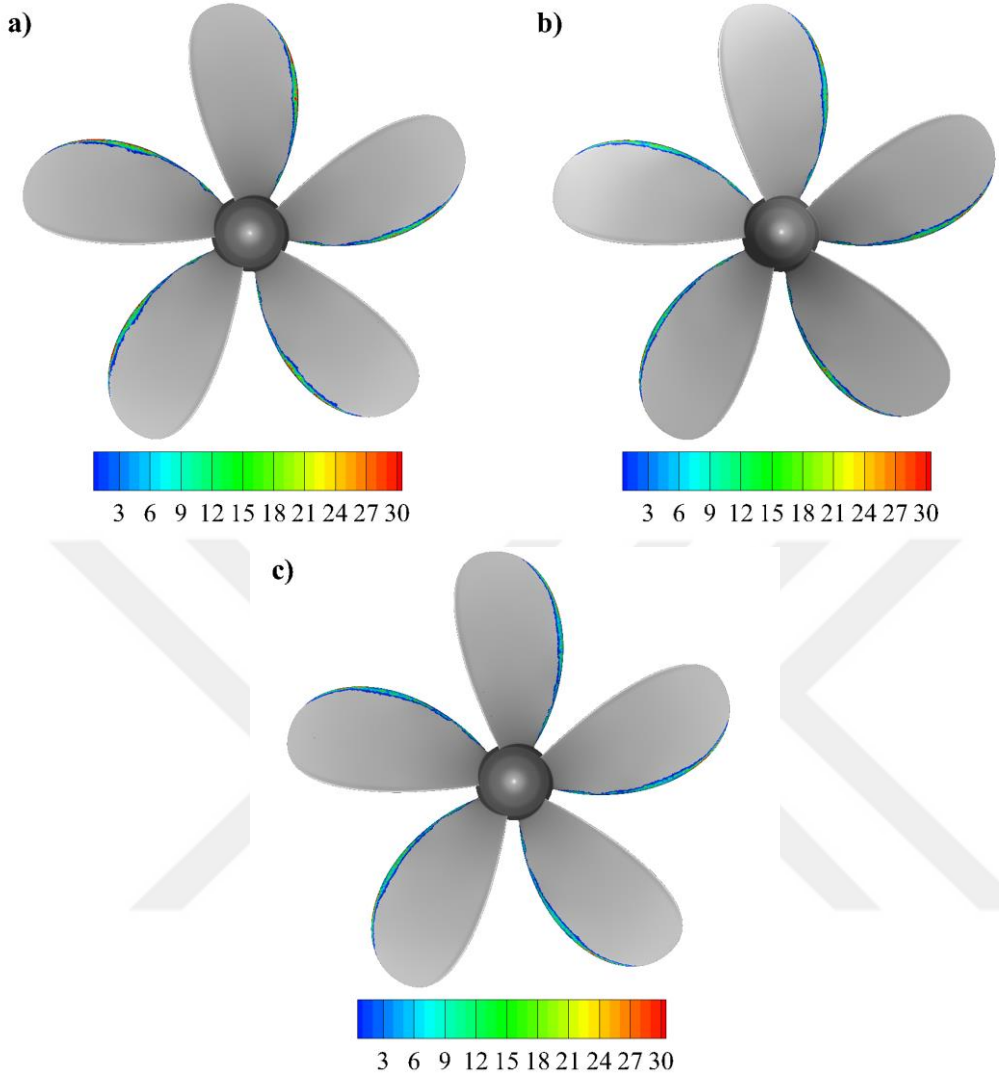
Şekil 5.17 : Durum 2 basınç yüzeyi C_{EP} değerleri, a) D_S b) D_M c) D_B.

Şekil 5.18'de Durum 3 için C_{EP} değerleri pervanenin basınç yüzeyinde gösterilmiştir. 173 mm çapındaki pervanede önder kenarda yüksek erozyon şiddeti görülürken model boyu büyüdükçe erozyon şiddeti azalmaktadır. Erozyon şiddeti Şekil 5.12'de verilen kavitasyon oluşumuna benzer bölgelerdedir. Durum 1 ve 2 ile karşılaştırıldığında, Çizelge 5.15'de de görüldüğü gibi erozyon şiddeti Durum 3'de Durum 1 ve 2'ye göre daha azdır. Pervanenin emme yüzeyinde ise kavitasyon oluşumlarında da verildiği üzere pervanede çok fazla kavitasyon oluşumu olmadığından erozyon da çok az görülmüştür.



Şekil 5.18 : Durum 3 basınç yüzeyi C_{EP} değerleri, a) D_S b) D_M c) D_B.

Şekil 5.19'da Durum 4 için C_{EP} değerleri pervanenin basınç yüzeyinde gösterilmiştir. 173 mm çapındaki pervanede önder kenarda yüksek erozyon şiddeti görülürken model boyu büyüdükçe erozyon şiddeti azalmaktadır. Erozyon şiddeti Şekil 5.14'de verilen kavitasyon oluşumuna benzer bölgelerdedir. Durum 1, 2 ve 3 ile karşılaştırıldığında, Çizelge 5.15'de de görüldüğü gibi erozyon şiddeti Durum 4'de Durum 1, 2 ve 3'e göre daha azdır. Pervanenin emme yüzeyinde ise kavitasyon oluşumlarında da verildiği üzere pervanede kavitasyon oluşumu olmadığından erozyon oluşumu da görülmemiştir.



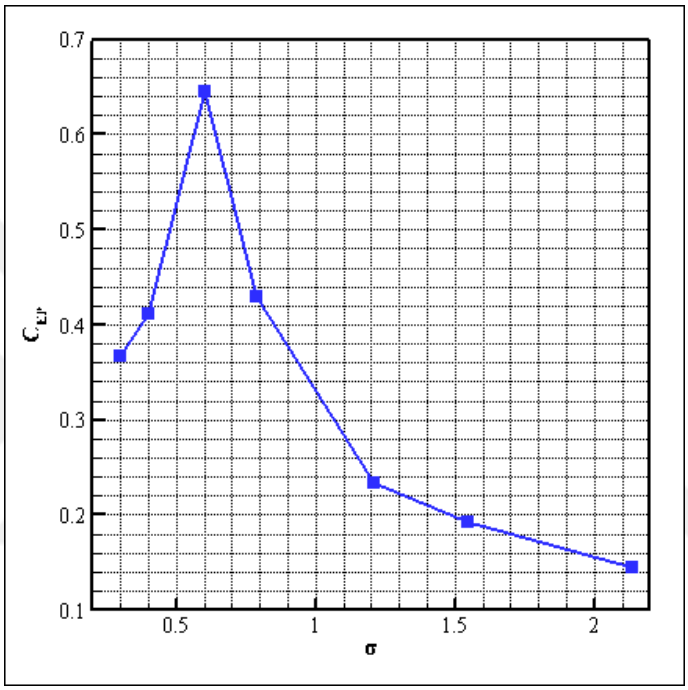
Şekil 5.19 : Durum 4 basınç yüzeyi C_{EP} değerleri, a) D_S b) D_M c) D_B.

5.8 Kavitasyon Sayısı ve Erozyon Gücü Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Bu bölümde 246.4 mm çapında (D_M) pervane için kavitasyon sayısı ve erozyon gücü gücü arasındaki ilişki incelenecektir. Bunun için Çizelge 5.3'te verilen ek 3 durum içinde analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde kavitasyon sayısı giderek düşürülmüştür. Analiz sonucunda bölüm 5.7'ye benzer olarak pervane kanatlarındaki ortalama erozyon şiddeti değerleri boyutsuzlaştırılarak kullanılmıştır. Erozyon şiddeti değerleri periyodik olarak değişmektedir. Bu nedenle analiz yakınsadıktan sonra pervanenin 3 tam turundaki değerlerin ortalaması kullanılmıştır. Çizelge 5.16'da boyutsuz erozyon gücü (C_{EP}) değerleri verilmiştir. Şekil 5.20'de ise grafik üzerinde kavitasyon sayısına göre C_{EP} değerlerinin değişimi verilmiştir.

Çizelge 5.16 : D_M C_{EP} Değerleri

Durum	σ	D_M C_{EP}
4	2.137	0.1450
3	1.545	0.1918
2	1.208	0.2345
1	0.787	0.4298
5	0.600	0.6460
6	0.400	0.4116
7	0.300	0.3671



Şekil 5.20 : σ_N- C_{EP} grafiği.

Şekil ve grafikten görüldüğü üzere kavitasyon sayısı (σ_N) azaldıkça C_{EP} değerleri başlangıçta artmıştır ve σ_N=0.6 olduğunda maksimuma ulaşmıştır. Sonraki iki durumda ise kavitasyon sayısı düştükçe C_{EP} değerleri azalmıştır. Bunun anlamı kavitasyon sayısı küçüldükçe pervane yüzeyindeki erozyon bir noktaya kadar artacak ancak daha sonra erozyonun etkisi azalacaktır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında DTMB 5415 pervanesinin, 3 farklı model ölçeğinde ve tam ölçekte açık su, kavitasyon ve erozyon oluşumu için ölçek etkisi HAD ile incelenmiştir. Açık su analizleri sonucu elde edilen değerler, ITTC 1978 yöntemi ile tam ölçeğe ekstrapolere edilerek, HAD ile karşılaştırılmıştır. Aşağıda elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

6.1 Sonuç

Açık su analizlerinde, pervane karakteristikleri için ölçek etkisinin pervane yüklemesine bağlı olduğu görülmüştür. Model çapı büyüdükçe K_T, yüksek ilerleme sayılarında (düşük yükleme), düşük ilerleme sayılarına (yüksek yükleme) göre daha fazla artış göstermiştir. K_Q'da ise model çapı büyüdükçe yüksek ilerleme sayılarındaki azalış, düşük ilerleme sayılarına göre oldukça yüksektir. Model çapı büyüdükçe K_T'nin artması ve K_Q'nun azalması sonucu açık su verimi de (η_0) artmıştır.

Model ölçeklerinden tam ölçeğe geçerken K_T'deki değişimin K_Q'ya göre düşük olduğu görülmüştür. Basınç kuvvetlerinin K_T üzerinde, sürtünme kuvvetlerinin K_Q üzerinde baskın olması ve Re sayısının sürtünme kuvvetleri üzerindeki etkisinin fazla olması nedeniyle bu durum açıklanabilir. DTMB 5415 gibi konvansiyonel pervanelerde model ile tam ölçek arasında basınç kuvvetlerinin değişimi çok azdır. Ancak yüksek çalıklığa, eğikliğe sahip konvansiyonel olmayan pervanelerde model ve pervane arasındaki basınç kuvvetlerinin değişimi fazladır. Bu nedenle sürtünme kuvvetlerinin yanında basınç kuvvetleri de ölçek etkisinde belirgin rol oynar.

Açık su çalışmasında HAD ve ITTC 1978 yöntemi ile hesaplanan ölçek etkisi incelendiğinde, ITTC 1978 yöntemi ölçek etkisini HAD'a göre daha düşük hesaplamıştır. ITTC 1978 yönteminin yalnızca sürtünme kuvvetindeki etkileri dikkate alması buna neden olur.

HAD ve ITTC 1978 yönteminde, pervane karakteristikleri üzerindeki ölçek etkisi model boyu büyüdükçe azalmıştır. Model deneylerinde ya da model HAD çalışmalarında büyük çaplı modeller kullanmak ölçek etkisini azaltmaktadır.

Hesaplamalı kavitasyon oluşumu analizlerinde ise açık su analizlerine benzer olarak aynı ölçeklerde analizler gerçekleştirilmiştir. Model ölçeklerinde 4 ve tam ölçekte 1 farklı kavitasyon sayısında ölçek etkisi incelenmiştir. Pervanede tüm durumlarda tabaka kavitasyonu görülmektedir. Ancak kanat ucu girdap kavitasyonu görülmemiştir.

Kavitasyon analizleri sonucunda ölçek etkisi pervane karakteristikleri üzerinde incelendiğinde, açık su çalışmasına benzer değişiklikler görülmüştür. Model çapı büyüdükçe K_T artmış, K_Q azalmış ve η_0 artmıştır.

Kavitasyon analizlerden çıkarılan bir diğer önemli sonuç, model boyu büyüdükçe yüzey üzerindeki kavitasyon alanının yüzey alanına oranının (C_{KA}) artmasıdır. Bu durum model ölçeğinde yüzey üzerinde görülen kavitasyonun tam ölçekte daha genişlemiş olarak görülmesi anlamına gelir. Diğer taraftan kavitasyon başlangıç kavitasyon sayısı, model boyu büyüdükçe artmıştır. Buna göre tam ölçekte kavitasyon daha erken görülecektir ve pervane dizaynında bu etken dikkate alınmalıdır.

Tam ölçekli kavitasyon analizi sonuçlarında pervanenin emme yüzeyindeki kavitasyon oluşumu model ölçeklerine göre farklılık göstermektedir. Yapılan çalışmada farklı zaman adımlarındaki kavitasyon oluşumları incelendiğinde zaman adımının değişmesi ile kavitasyon görünümünde değişiklik olmamıştır. Yani kavitasyonun karakteristiği aynıdır.

Erozyon gücü için ölçek etkisinin incelenmesinde ise kavitasyon oluşumunda analizi gerçekleştirilen durumlar kullanılmıştır. Ölçek etkisi incelenirken pervane kanatlarındaki ortalama erozyon şiddeti değerleri kullanılmıştır ve bu değerler çalışmada verilen adımlara göre boyutsuzlaştırılmıştır. Elde edilen değerlere göre incelenen tüm durumlarda model boyu büyüdükçe ortalama erozyon şiddeti (C_{EP}) azalmıştır. Erozyonun tahrip gücü azalmıştır.

Kavitasyon sayısı (σ_N) ve erozyon gücü arasındaki ilişki için D_M pervanede 3 ek durum incelenmiştir. Bu inceleme için pervane kanatlarındaki ortalama boyutsuz erozyon şiddeti (C_{EP}) değerleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre σ_N azaldıkça C_{EP} değerleri başlangıçta artmış, 0.6 kavitasyon sayısında maksimuma ulaşmış ve diğer iki

düşük kavitasyon sayısında azalmıştır. Bu durum kavitasyon sayısının azalmasının erozyon şiddetinin üzerinde bir yere kadar etkisinin olduğunu göstermektedir.

6.2 Öneriler

Model ölçeği ve tam ölçekte kavitasyon karakteristiği farklıdır. Bunun nedeni tam ölçekli çalışmada y^+ değerlerinin model ölçeklerine göre farklı olması olabilir. İlerleyen aşamalarda tam ölçekte model ölçekleri ile benzer y+ değerlerinde analizler gerçekleştirilerek bu durum incelenecektir. Ayrıca tam ölçekteki pervane deniz suyunda çalışacağından deniz suyunun özellikleri tatlı suya göre çok farklıdır. Özellikle deniz suyundaki çözünmüş hava miktarı ve dağılımı farklılık gösterir. Tam ölçekli çalışmada bu etkiler üzerinde ayrıca çalışmalar gerçekleştirilerek ortam koşullarının etkisi incelenebilir.

Kanat ucu girdap kavitasyonun görülememesinde RANS modelinin kullanılması bir neden olabilir. Bu nedenle DES veya LES modeli ile analiz tekrarlanarak kanat ucu girdap kavitasyonuna bakılabilir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm analizlerde giriş hızı düzgün hız olarak verilmiştir. Ölçek etkisinin, gemi izi arkasındaki hız profili kullanılarak incelenmesi önerilebilir. Çalışmada kullanılan DTMB 5415 pervasine ait olan DTMB 5415 gemisinin gemi kıçındaki hız profili kullanılarak analizler tekrarlanabilir.

Yapılan çalışmalara ek olarak DTMB 5415 gemisinin model ve tam ölçekte sevk analizleri gerçekleştirilerek sevk katsayıları üzerinde ve bu durumdaki kavitasyon oluşumundaki ölçek etkisi incelenebilir.

Çalışma bir adım ileriye taşınarak yapılan analizlere hidroakustik çalışmalar eklenerek ölçek etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

Alfonsi, G. (2009). Reynolds-averaged Navier–Stokes equations for turbulence modeling.

Bertram, V. (2012). *Practical ship hydrodynamics*. Elsevier.

Bugalski, T., Streckwall, H., & Szantyr, J. A. (2013). Critical review of propeller performance scaling methods, based on model experiments and numerical calculations. *Polish Maritime Research*.

Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H., & Raad, P. E. (2008). Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications, *Journal of Fluids Engineering*, *130*(7), 78001-1, 78001-4.

Carlton, J. (2018). *Marine propellers and propulsion*. Butterworth-Heinemann.

Çengel, Y.A. ve. Cimbala, J.M. (2008). *Akışkanlar Mekaniği*, Güven Kitabevi, İzmir, 938s.

Dong, X. Q., Li, W., Yang, C. J., & Noblesse, F. (2018). RANSE-based simulation and analysis of scale effects on open-water performance of the PPTC-II benchmark propeller. *Journal of Ocean Engineering and Science*, *3*(3), 186-204.

Eskilsson, C. & Bensow R. E. (2015). Estimation of cavitation erosion intensity using CFD: Numerical Comparison of Three Different Methods, *Fourth International Symposium on Marine Propulsors, smp'15*. Austin, Texas, USA, June 2015.

Ferziger, J. H., & Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (3rd ed), ISNB:3540420746

Fluent Inc. (2014). *Fluent User's Guide.* Canonsburg, PA.

González-Adalid, J., Sobrino, M. P., Gomez, A. G., Gennaro, G., Gaggero, S., Viviani, M., & Sanchez-Caja, A. (2014). Comparison of different scaling methods for model tests with CLT propellers. In *11th International Conference on Hydrodynamics [ICHD]*. Singapore, 19-24 October 2014.

Helma, S. (2015). An extrapolation method suitable for scaling of propellers of any design. In *Fourth International Symposium on Marine Propulsors*.

Helma, S., Streckwall, H., & Richter, J. (2018). The effect of propeller scaling methodology on the performance prediction. *Journal of Marine Science and Engineering*, *6*(2), 60.

Hoffmann, K. A. K. A., & Chiang, S. T. (2000). *Computational Fluid Dynamics Volume II*. McGraw-Hill, ISBN: 0-9623731-0-9.

International Maritime Organization (IMO). (2011). Reduction of GHG Emissions from Ships, Detail Treatment of İnnovative Energy Efficiency Technologies for Calculation of the Attained EEDI. Marine Environment Protection Committee Meeting, London,UK.

ITTC, 1951. (1951). *Subject 1-Reynolds numbers for model propeller experiments.* In: Proceedings of the 6th ITTC.

ITTC, 1978. (1978). *Report of the performance committee.* In: Proceedings of the 15th ITTC.

ITTC Recommended Procedures and Guidelines. (2002). *Testing and Extrapolation Methods Propulsion; Cavitation Description of Cavitation Appearances*. 7.5-02 -03-03.2.

ITTC Recommended Procedures and Guidelines. (2011). *Fresh water and seawater properties*. 7.5-02 -01-03.

ITTC Recommended Procedures and Guidelines. (2017). *1978 ITTC Performance Prediction Method*. 7.5-02 -03-01.4.

ITTC, 2014. (2014). *Proceedings of 27th International Towing Tank Conference (ITTC).* Volume I, Copenhagen, Denmark, 2014.

Kalitzin, G., Medic, G., Iaccarino, G., & Durbin, P. (2005). Near-wall behavior of RANS turbulence models and implications for wall functions, *Journal of Computational Physics, 204*(1), 265–291.

Keller, A. P. (2001). Cavitation scale effects-empirically found relations and the correlation of cavitation number and hydrodynamic coefficients. *http://resolver. caltech. edu/cav2001: lecture. 001*.

Korkut, E., Atlar, M., & Odabasi, A. Y. (1999). On the viscous scale effects in cavitation inception of marine propellers. In *Proc. 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conf.: Symp. on Cavitation Inception, San Francisco, CA, USA*.

Krasilnikov, V., Sun, J., & Halse, K. H. (2009). 'CFD Investigation in Scale Effect on Propellers with Different Magnitude of Skew in Turbulent Flow'. Proc. of 1st Intl. Symp. on Marine Propulsors SMP'09, Tronheim, Norway

Kuiper, G. (1981). Cavitation inception on ship propeller models. Ph.D. thesis, Delft University of Technology.

Kuiper, G. (2006). Resistance and Propulsion 1 (mt527). *(mt527)*.

Kundu, P. K., & Cohen, I. M. (2002). *Fluid mechanics*, Elsevier.

Li, Z., Pourquie, M. & Tervisga, T. V. (2014). Assessment of cavitation erosion with a URANS method, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 136.

Menter, F. R. (1992a). Influence of Freestream Values on k-ω Turbulence Model Predictions, *AIAA Journal*, *30*(6), 1657–1659.

Menter, F. R. (1992b). Performance of Popular Turbulence Models for Attached and Separated Adverse Pressure Gradient Flows. *AIAA Journal*, *30*(8), 2068–2072.

Menter, F.R. (1993). Zonal Two Equation k-ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Report*, AIAA-93-2906, Orlando, Florida, USA.

Nohmi, M., Iga, Y., & Ikohagi, T. (2008). Numerical prediction method of cavitation erosion, *Proceedings of FEDSM2008*, Jacksonville, Florida USA.

Rijpkema, D., Baltazar, J., & Falcao de Campos, J. (2015). Viscous flow simulations of propellers in different Reynolds number regimes. In *Proceedings of the Fourth International Symposium on Marine Propulsors, Austin, TX, USA* (Vol. 31).

Salvatore, F., Streckwall, H., & Terwisga, T. (2009). Propeller Cavitation Modelling by CFD-Results from the VIRTUE 2008 Rome Workshop. SMP-09, Norway.

Schlichting, H., & Gersten, K. (2017). *Boundary-layer theory*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 978- 3-662-52917-1, 9th edition 805pp.

Schnerr, G. H. & Sauer, J. (2001). Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamic, *4th International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans, USA.

Shahzad, U. (2015). Global warming: Causes, effects and solutions. *Durreesamin Journal*, *1*(4), 1-7.

Shin, K. W., & Andersen, P. (2017). CFD analysis of scale effects on conventional and tip-modified propellers. In *Fifth International Symposium on Marine Propulsors, Espoo, Finland*.

Song, K. W., Guo, C. Y., Wang, C., Sun, C., Li, P., & Wang, W. (2019). Numerical analysis of the effects of stern flaps on ship resistance and propulsion performance. *Ocean Engineering*, *193*, 106621.

Stanier, M. (1998)**.** 'Investigation into propeller skew using a RANS code. Part 2: Scale effects', International Shipbuilding Progress, **45**, no.443, pp.253-265.

Streckwall, H., Greitsch, L., & Scharf, M. (2013). An advanced Scaling Procedure for Marine Propellers. In *Proc. of The 3rd International Symposium on Marine Propulsors smp* (Vol. 13).

Streckwall, H., Greitsch, L., Müller, J., Scharf, M., & Bugalski, T. (2013). Development of a strip method proposed as new standard for propeller performance scaling. Ship technology research, 60(2), 58-69.

Szantyr, J. A. (2006). Scale effects in cavitation experiments with marine propeller models. *Polish Maritime Research*, 3-10.

Sodja, J. (2007). Turbulence models in CFD. *University of Ljubljana*, 1-18.

Tukker, J., Kuiper, G. (2004). High-speed video observations and erosive cavitation, *PRADS 2004*, Luebeck-Travemuende, 941–948.

Usta, O. (2018). *Gemi Pervanelerinde Kavitasyon ve Kavitasyon Erozyonu Modellemesi.* (Doktora Tezi). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Viitanen, V., Siikonen, T., & Sánchez-Caja, A. (2020). Cavitation on model-and full-scale marine propellers: steady and transient viscous flow simulations at different Reynolds numbers. *Journal of Marine Science and Engineering*, *8*(2), 141.

Vladimir I. Krasilnikov. (2011). First Introduction into Computational Fluid Dynamics for Marine Applications, Page 72-152.

White, F. M., & Majdalani, J. (2006). *Viscous fluid flow* (Vol. 3, pp. 433-434). New York: McGraw-Hill.

Wilcox, D. C. (1988). Multiscale Model for Turbulent Flows. *AIAA journal*, *26*(11), 1311–1320.

Wilcox, D. C. (1991). A Half Century Historical Review of the k-omega Model, *AIAA Paper*, (615), 1–10.

Wilcox, D. C. (1998). Turbulence Modeling for CFD. California: DCW Industries

Yang, Q., Wang, Y., & Zhang, Z. (2013). Scale effects on propeller cavitating hydrodynamic and hydroacoustic performances with non-uniform inflow. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, *26*(2), 414-426.

Yusvika, M., Prabowo, A. R., Baek, S. J., & Tjahjana, D. D. D. P. (2020). Achievements in Observation and Prediction of Cavitation: Effect and Damage on the Ship Propellers. *Procedia Structural Integrity*, *27*, 109-116.

Zhao, Y. (2015). *Investigation in scale effects on propellers with different magnitude of skew by CFD methods.* (Master's thesis).

URL-1<http://www.simman2008.dk/5415/combatant.html>, erişim tarihi 29.11.2021

URL-2<http://www.simman2008.dk/5415/5415_geometry.htm>, erişim tarihi 29.11.2021

URL-3<https://www.oecd.org/ocean/topics/ocean-shipping>, erişim tarihi 29.11.2021

URL-4<https://web.stanford.edu/class/me469b/handouts/turbulence.pdf>, erişim tarihi 29.11.2021

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Selahattin ÖZSAYAN

- **Lisans** **:** 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 24 Nisan 2019 tarihinde İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesinde başlamış olduğu araştırma görevlisi görevine devam etmektedir.
- Kasım 2017 ve Nisan 2019 tarihleri arasında RMK Marine A.Ş'de dizayn tekne ve donatım mühendisi olarak çalışmıştır.
- İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesini 2018 yılında dönem 1.'si olarak tamamlamıştır.

DİĞER YAYINLAR:

- Ozsayan, S., Taylan, M., Another Blow on the Torn Down Wall- The Inclining Experiment. Journal Brodogradnja, pp.(135-153), 2019.