T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROFOİLLERDE BÜKÜM, YÜZEY OLUKLULUĞU VE GİRİŞ UCU TÜBERKÜL ETKİLERİNİN KAVİTASYONLU AKIŞ KOŞULLARINDA DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Sinem ÖKSÜZ

DOKTORA TEZİ
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Anabilim Dalı
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Programı

Danışman
Prof. Dr. Fahri ÇELİK

Eş Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Onur USTA

Şubat, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROFOİLLERDE BÜKÜM, YÜZEY OLUKLULUĞU VE GİRİŞ UCU TÜBERKÜL ETKİLERİNİN KAVİTASYONLU AKIŞ KOŞULLARINDA DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Sinem ÖKSÜZ tarafından hazırlanan tez çalışması 24.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Fahri ÇELİK Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Onur USTA Milli Savunma Üniversitesi Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Fahri ÇELİK, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Seyfettin BAYRAKTAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ali DOĞRUL, Üye
Milli Savunma Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Yasemin ARIKAN ÖZDEN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Şakir BAL, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Fahri ÇELİK sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Hidrofoillerde Büküm, Yüzey Olukluluğu ve Giriş Ucu Tüberkül Etkilerinin Kavitasyonlu Akış Koşullarında Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Sinem ÖKSÜZ

İmza

Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FBA-2024-6032” numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Aileme

TEŞEKKÜR

Dört yıllık doktora çalışmamı bitirmiş olmanın mutluluğu ve buruk hüznü ile, bu bitişin daha güzel başlangıçlara ilerlemenin ilk basamağı olacağını umuyorum. Doktoraya ilk başladığım gün planladığımız yol haritasına hep bağlı kalarak ilerlememde bana rehberlik eden, çalışmalarım boyunca karşılaştığım her zorluğun üstesiden gelmem için bana destek olan başta tez danışmanım Prof. Dr. Fahri ÇELİK'e, eş danışmanım Dr. Onur USTA'ya, yüksek lisans danışmanlığından sonra da rehberliğini eksik etmeyen Doç. Dr. Ali DOĞRUL'a, ilk yayın tecrübemizde emeği olan ve kıymetli görüşleriyle hep destek olan Prof. Dr. Seyfettin BAYRAKTAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarımın bir kısmını gerçekleştirdiğim the University of Strathclyde'da danışmanım olan Dr. Batuhan AKTAŞ'a analizlerim için sağlamış olduğu iş istasyonları desteği için ayrıca minnettarım. Glasgow'daki süreçlerde bana her daim desteklerini hissettiren ve rehberlik eden Prof. Dr. Mehmet ATLAR'a, Prof. Dr. Atilla İNCECİK'e ve Prof. Dr. Selda ÖTERKUŞ'a en derin saygılarımı sunarım.

Glasgow'da tanışıp zorlu doktora sürecinde kendi tecrübeleriyle bana yol gösteren Önder CANBULAT'a, arkadaşlarım Seda CANBULAT'a, Kaan ve Zeynep İLTER'e, Yıldırım DİRİK'e, Başak ALVER'e, Seda ÖZAYDIN'a ve Alp OGANALP'a, Glasgow'da bana ikinci aile olan 516 numaranın sakinleri David BABB ve Loise Anderson ile çok sevgili anneleri Maggie'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Bana benden daha çok inanan, motive eden ve ilk yurtdışı konferansı tecrübesini paylaştığımız sevgili Evren Kağan GÜRSEL'e, inişli çıkışlı her anımda her zaman yanımda olan Gülçin YENER'e, uzakta olsa da her daim yanımda hissettiren, kısacık zamanlara çokça anı sığdırdığımız Betül KARAKAYA'ya, güzel sohbetiyle yurt hayatını çekilir kılan arkadaşım Havva BİLKAY'a, üniversite yıllarından beri tanıdığım, vazgeçmeme müsaade etmeyen, hep motive eden canım arkadaşım Ayşe

CANDAN'a ve eşi Bayram CANDERE'ye, dostluğunu uzakta da olsa hep hissettiren Havva NİŞANCI'ya destekleri için minnettarım.

Tez çalışmamın son aşaması olan deneysel çalışmaları gerçekleştirmemizde İstanbul Teknik Üniversitesi Kavitasyon Tüneli (İTÜKAT) imkanlarını bize sağlayan Prof. Dr. Uğur Oral ÜNAL'a ve deney düzeneği ve çalışmanın yürütülmesinde emeği çok büyük olan teknisyen ekibe, deney modellerimizin imalatında yaşadığımız sorunlara rağmen çözüm bulana kadar desteğini eksik etmeyen Ali Mert beye ayrıca teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm bu süreçte beni destekleyen aileme ve arkadaşlarıma kalpten teşekkür ederim.

Sinem ÖKSÜZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ iii

KISALTMA LİSTESİ v

ŞEKİL LİSTESİ vi

TABLO LİSTESİ x

ÖZET xi

ABSTRACT xiii

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 4

1.2 Tezin Amacı 9

1.3 Hipotez 9

2 MATEMATİKSEL MODELLEME 10

2.1 Türbülans Modeli 12

2.2 RANS Modeli 12

2.3 DES Modeli 13

2.4 Kavitasyon Modeli 16

2.5 Kaldırma, Direnç ve Basınç Katsayıları 17

3 KAVİTASYONSUZ AKIŞ ANALİZLERİ VE SONUÇLARI 19

3.1 Hesaplama modeli 20

3.2 Validasyon (Geçerleme) ve Belirsizlik analizi 25

3.2.1 Belirsizlik Analizi 28

3.3 Farklı Hidrofoil Geometrilerinin HAD Analizlerinin Sonuçları 30

3.3.1 Kanat kalınlığı ve bükümlülük etkileri 30

3.3.2 Üç boyutlu bükümlü hidrofoiller için akış hızı ve kalınlık etkileri 37

4 KAVİTASYONLU AKIŞ ANALİZLERİ VE SONUÇLARI 41

4.1 RANS metoduyla farklı hücum açılarının kıyaslanması 50

4.2 RANS ve DES metodlarının karşılaştırılması 57

4.3 Farklı zaman adımlarının kıyaslanması 58

4.4 Düşük hücum açılarının RANS ve DES metoduyla kıyaslanması 62

4.5 Sonuçlar 71

5 TÜBERKÜLLÜ KANATLAR İÇİN KAVİTASYONLU AKIŞ ANALİZLERİ VE SONUÇLARI 73

5.1 1 derece hücum açısı analizleri 74

5.2 3 derece hücum açısı analizleri 76

5.3 5 derece hücum açısı analizleri 79

5.4 7 derece hücum açısı analizleri 81

5.5 Sade, tüberküllü ve oluklu hidrofoillerin kıyaslanması 84

5.5.1 Kavitasyonsuz Akış Analizleri 84

5.5.2 Kavitasyonlu Akış Analizleri 87

5.5.3 Sade, Tüberküllü ve Oluklu (0.1 içeri dışarı) hidrofoillerin farklı hücum açılarında kıyaslanması 92

6 DENEY ÇALIŞMASI 101

6.1 Deney Düzeneği ve Deney Senaryoları 101

6.1.1 Deneyde Kullanılan Model Geometrileri 102

6.1.2 Deney Senaryoları ve Akış koşulları 104

6.2 Kavitasyon Testi Sonuçlarının Analizi 106

6.2.1 Oluk ve Ön Kenardaki Tüberkülün Etkileri 106

6.2.2 Reynolds ve Kavitasyon Sayılarının Etkileri 110

6.3 Sonuçlar 112

7 SONUÇ 114

8 KAYNAKÇA 116

9 TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 125

SİMGE LİSTESİ

V	Akış hızı (m/s)
P	Basınç (Pa)
n_{bubble}	birim sıvı hacmi başına kabarcık sayısı
Pv	Buharlaşma Basıncı
α_v	buhar hacim oranı
u'	Değişken hız
C_{DES}	DES Model katsayısı (DES için, k-ω türbülans modelinde 0.78)
C_D	direnç katsayısı
D	direnç kuvveti (Newton)
τ_{ij}	Gerilme tensörü
f_β	girdap gerdirme modifikasyon faktörü
R_{bubble}	Kabarcık yarıçapı
C_L	kaldırma katsayısı
L	kaldırma kuvveti (Newton)
α	kanat açıklığı boyunca değişen hücum açısı (derece)
β	Karıştırma fonksiyonu
F	Karıştırma fonksiyonu
σ	Kavitasyon sayısı
β^*	k-Omega model katsayıları
S_k, S_ω	kullanıcı tarafından belirlenen kaynak terimleri
L_{DES}	LES bölgelerindeki türbülans uzunluk ölçekleri
σ_k,σ_ω	model katsayıları
$\bar{u}$	Ortalama hız
p	Ortalama statik basınç
L_{RANS}	RANS bölgelerindeki türbülans uzunluk ölçekleri
Re	Reynolds sayısı
f_{β^*}	serbest kayma modifikasyon faktörü

P	sıvı basıncı (Pa)
τ_{SGS}	SGS stres tensörü
I	Tekil matris
k_0,ω_0	türbülans bozulmasına karşı koyan ortam türbülans değerleri
k	türbülans kinetik enerjisini
μ_e	Türbülanslı girdap viskozitesi
P_k,P_ω	üretim terimleri
ω	yayılım oranı
$\tilde{\omega}$	yayılım oranı (SST k-ω DES modeli için)
ρ	Yoğunluk (kg/m3)
A	yüzey alanı (m2)

KISALTMA LİSTESİ

AoA	Hücum açısı (Angle of Attack)
CFD	Computational Fluid Dynamics
DES	Detached Eddy Simulation (Ayrık Girdap Simülasyonu)
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
PANS	Kısmi Ortalamalı Navier-Stokes (Partially Averaged Navier-Stokes)
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes)
SGS	alt örgü ölçekli stres tensörü (subgrid-scale stress tensor)
URANS	Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes (Zamana Bağlı Reynolds Ortalamalı Navier Stokes)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Bükümlü ve yarı bükümlü hidrofoiller için kanat açıklığı boyunca hücum açısı dağılımı.....19
Şekil 3.2 NACA 0009 (orta sütun) ve NACA 0015 (sağ sütun) kesitli bükümsüz, yarı bükümlü ve bükümlü 3 boyutlu hidrofoiller.....21
Şekil 3.3 Hesaplama alanı ve tanımlanan sınır koşulları.....22
Şekil 3.4 Ağ yapısının hidrofoil çevresi (a) , (b) hidrofoil yüzeyi, (c) hidrofoil yüzeyi ve sınır tabaka ve (d) sınır tabaka prizma ağı etrafında değişimi 23
Şekil 3.5 Farklı ağ yapılarına ait basınç katsayısının kanat ortasındaki (y/b=0.5'de) dağılımı 24
Şekil 3.6 Validasyonlar için kullanılan Delft Twist-11 hidrofoilinin 3 boyutlu görünümü 25
Şekil 3.7 Delft Twist-11'e ait negatif basınç katsayısı dağılımlarının a) y/b=0.5, b) y/b=0.4 ve c) y/b=0.3 kesitlerindeki deneysel verilerle karşılaştırılması. 26
Şekil 3.8 Farklı hücum açıları için kaldırma katsayısı dağılımları, V=6.75 m/s...31
Şekil 3.9 Farklı hücum açıları için direnç katsayısı dağılımları, V=6.75 m/s. 32
Şekil 3.10 Farklı geometrik konfigürasyonlar için kaldırma-direnç katsayılarının karşılaştırılması, V=6.75 m/s. 33
Şekil 3.11 Farklı kalınlıktaki hidrofoillerin yarı bükümlülerde a) AoA=1° b) AoA=3° ve bükümlülerde c) AoA=0° ve d) AoA=2° hücum açılarında meydana gelen basınç katsayısı dağılımları (y/b=0.4 kesitinde).....36
Şekil 3.12 V=6.75 akış hızı için orta kesitte (y/b=0.5) ve AoA=0° hücum açısı değerinde statik basınç dağılımının kontur grafikleri 36
Şekil 3.13 AoA=0°, V=6.75 m/s için y/b=0.5'de (orta kesitte) türbülanslı kinetik enerji dağılımının kontur grafikleri.....36
Şekil 3.14 Bükümlü NACA 0009 ve NACA 0015 için akış hızının kaldırma katsayıları üzerindeki etkileri.....37
Şekil 3.15 NACA 0009 ve NACA 0015 için akış hızlarının direnç katsayıları üzerindeki etkileri. 38
Şekil 3.16 Akış hızlarının kaldırma/direnç katsayısı oranı üzerindeki etkileri. 38
Şekil 3.17 Bükümlü NACA 0009 ve NACA 0015 kesitli hidrofoillerin AoA=0° hücum açısında ve orta kesitte (y/b=0.5'de) türbülanslı kinetik enerji dağılımının kontür grafikleri. 39
Şekil 4.1 Hidrofoil üzerinde Courant sayısı dağılımının (a) RANS yöntemi (4.5 milyon hücreli ağ), (b) DES yöntemi (12 milyon hücreli ağ) ile değişimi. 42
Şekil 4.2 Mevcut çalışmada (sol-üstte RANS ve altta DES yöntemi ile) ve deneyde (Foeth,2008a) elde edilen kavitasyon gelişimi (sağ-üstte). 44
Şekil 4.3 Bükümlü NACA 0009 hidrofoiline ait negatif basınç katsayılarının kavitasyonlu akış durumunda y/b=0.5 (orta kesitte) (a), y/b=0.4 (b), y/b=0.3 (c)'de, kavitasyonlu ve kavitasyonsuz akış durumlarında y/b=0.5 (orta kesitte) (d) kıyaslanması.....46
Şekil 4.4 Kavitasyonsuz ve kavitasyonlu akışta bükümlü ve yarı bükümlü geometrilerin kaldırma katsayıları (a, b), direnç katsayıları (c, d) ve kaldırma/ direnç katsayısı oranı değerleri (e, f). 48

Şekil 4.5 Bükümlü NACA 0009'un farklı hücum açılarında boyutsuz kavitasyon alanı.....51
Şekil 4.6 Yarı bükümlü NACA 0009'un farklı hücum açılarında boyutsuz kavitasyon alanı kıyaslanması 51
Şekil 4.7 Bükümsüz NACA 0009'un farklı hücum açılarında boyutsuz kavitasyon alanı.....52
Şekil 4.8 Bükümlü NACA 0015'in farklı hücum açılarında boyutsuz kavitasyon alanı.....52
Şekil 4.9 Yarı bükümlü NACA 0015'in farklı hücum açılarında boyutsuz kavitasyon alanı 53
Şekil 4.10 Bükümsüz NACA 0015'in farklı hücum açılarında boyutsuz kavitasyon alanı.....54
Şekil 4.11 Farklı kesitlere sahip bükümlü geometrilerin boyutsuz kavitasyon alanı 54
Şekil 4.12 Bükümlü NACA 0009 (solda) ve NACA 0015 (sağda) hidrofoiller üzerinde 0.12 saniyede 0 derece hücum açısında kavitasyon görüntüsü.....55
Şekil 4.13 Farklı kesitlere sahip yarı bükümlü geometrilerin boyutsuz kavitasyon alanı.....56
Şekil 4.14 Farklı kesitlere sahip bükümsüz geometrilerin boyutsuz kavitasyon alanı 56
Şekil 4.15 NACA 0009 (solda) ve NACA 0015 (sağda) bükümsüz geometrilerin 0.12. saniyede 4 derece hücum açısında kavitasyon alanı.....57
Şekil 4.16 Bükümlü NACA 0009 hidrofoilinin AoA= -2^o hücum açısında zamana göre kavitasyon gelişimi (RANS ve DES) 58
Şekil 4.17 Bükümlü NACA 0009 hidrofoili için $\Delta t=1x10^{-5}$ s ve $\Delta t=2x10^{-5}$ s zaman adımlarında boyutsuz kavitasyon alanlarının kıyaslanması.....59
Şekil 4.18 $\Delta t=10^{-5}$ s ve $\Delta t=2x10^{-5}$ s olmak üzere iki farklı zaman adımı değeri için NACA 0009 bükümlü hidrofoiline ait (AoA=-2 derece) kaldırma katsayısı eğrileri. 60
Şekil 4.19 $\Delta t=10^{-5}$ s ve $\Delta t=2x10^{-5}$ s olmak üzere iki farklı zaman adımı değeri ile -2 derece hücum açısına sahip NACA 0009 bükümlü hidrofoil için direnç katsayısı eğrileri.....61
Şekil 4.20 Bükümlü NACA 0009 hidrofoili üzerinde zamana göre kavitasyon gelişimi.....61
Şekil 4.21 Bükümlü NACA 0015 hidrofoili (AoA= -2^o) için zamana göre kavitasyon gelişimi (RANS ve DES).....62
Şekil 4.22 Bükümlü NACA 0015 hidrofoil üzerinde RANS ve DES ile elde edilen kavitasyon gelişimi. 63
Şekil 4.23 Bir döngü boyunca Bükümlü NACA 0015 ve NACA 0009 hidrofoilleri üzerindeki kavitasyon oluşumu görünümleri.....65
Şekil 4.24 Yarı bükümlü NACA 0009 ve NACA 0015'in AoA= +1 derece hücum açısında boyutsuz kavitasyon alanı eğrileri. 65
Şekil 4.25 Yarı bükümlü NACA 0009 ve NACA 0015 üzerinde, AoA= $+1^o$'de (RANS) kavitasyon oluşumu görüntüleri. 66
Şekil 4.26 Bir döngü boyunca yarı bükümlü NACA 0015 hidrofoili üzerindeki kavitasyon oluşumu görüntüleri.....67
Şekil 4.27 Bükümsüz NACA 0009'un hücum açısına bağlı olarak kaldırma ve direnç katsayıları.....69
Şekil 4.28 AoA=+4 derece hücum açısında bükümsüz NACA 0009 ve NACA 0015'in boyutsuz kavitasyon alanı eğrileri.....69

Şekil 4.29 Bükümsüz NACA 0009 hidrofoil (a) ve NACA 0015 hidrofoil (b) için 2 boyutlu hacim oranı konturları ve 3 boyutlu kavitasyon gelişim görüntüleri (AoA= +4 derecede (RANS). 70
Şekil 5.1 Tüberküllü hidrofoil 73
Şekil 5.2 AoA=1º hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz yarı bükümlü hidrofoillerin boyutsuz kavitasyon alanı.....74
Şekil 5.3 Yarı bükümlü tüberkülsüz (a) ve tüberküllü(b) hidrofoil üzerindeki maksimum kavitasyon oluşumu (+1º hücum açısında) 75
Şekil 5.4 1 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin kaldırma katsayısının kıyaslanması 76
Şekil 5.5 1 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin direnç katsayısının kıyaslanması 76
Şekil 5.6 AoA=3º hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz yarı bükümlü hidrofoillerin boyutsuz kavitasyon alanı.....77
Şekil 5.7 Yarı bükümlü tüberkülsüz (a) ve tüberküllü(b) hidrofoiller üzerindeki maksimum kavitasyon oluşumu (+3º hücum açısında) 77
Şekil 5.8 3 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin kaldırma katsayısının kıyaslanması 78
Şekil 5.9 3 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin direnç katsayısının kıyaslanması 78
Şekil 5.10 AoA=5º hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz yarı bükümlü hidrofoillerin boyutsuz kavitasyon alanı.....79
Şekil 5.11 Yarı bükümlü tüberkülsüz (a) ve tüberküllü (b) hidrofoiller üzerindeki maksimum kavitasyon oluşumu (+5º hücum açısında) 80
Şekil 5.12 5 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin kaldırma katsayısının kıyaslanması 80
Şekil 5.13 5 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin direnç katsayısının kıyaslanması 81
Şekil 5.14 AoA=7º hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz yarı bükümlü hidrofoillerinin boyutsuz kavitasyon alanı 82
Şekil 5.15 7 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin kaldırma katsayısının kıyaslanması 82
Şekil 5.16 7 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin direnç katsayısının kıyaslanması 82
Şekil 5.17 Yarı bükümlü tüberkülsüz (a) ve tüberküllü (b) hidrofoiller üzerindeki maksimum kavitasyon oluşumu (+7º hücum açısında) 83
Şekil 5.18 Sade, Tüberküllü ve Oluklu geometrilerin farklı hücum açılarındaki kaldırma katsayılarının kıyaslanması (kavitasyonsuz akış koşullarında) 85
Şekil 5.19 Sade, Tüberküllü ve Oluklu geometrilerin farklı hücum açılarındaki direnç katsayıları (kavitasyonsuz akış koşullarında) 86
Şekil 5.20 Sade, Tüberküllü ve Oluklu hidrofoillere ait hidrodinamik verimlerin (C_L/C_D) farklı hücum açılarında kıyaslanması (kavitasyonsuz akış koşullarında) 86
Şekil 5.21 Sade, tüberküllü ve oluklu geometrilerin yüzeydeki kavitasyon alanının (m^2) kıyaslanması (Hücum açısı: 3 derece) 87
Şekil 5.22 Sade, tüberküllü ve oluklu geometrilerin yüzeydeki kaldırma katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 3 derece).....88
Şekil 5.23 Sade, tüberküllü ve oluklu geometrilerin yüzeydeki direnç katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 3 derece).....88
Şekil 5.24 Sade, tüberküllü ve oluklu geometrilerin yüzeydeki hidrofoil performanslarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 3 derece) 89

Şekil 5.25 Sade, Tüberküllü ve Oluklu hidrofoillerin ortalama kavitasyon alanı, ortalama kaldırma katsayısı ve hidrodinamik performans değerlerinin (C_L/C_D) kıyaslanması.....91
Şekil 5.26 Sade, Tüberküllü ve Oluklu 0.1 içeri dışarı geometrilerinin yüzeydeki kavitasyon alanının (m^2) kıyaslanması (Hücum açısı: 1 derece).....92
Şekil 5.27 Sade, Tüberküllü ve Oluklu 0.1 içeri dışarı geometrilerin kaldırma katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 1 derece).....93
Şekil 5.28 Sade, Tüberküllü ve Oluklu 0.1 içeri dışarı geometrilerin direnç katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 1 derece).....93
Şekil 5.29 Sade, Tüberküllü ve 0.1 içeri dışarı Oluklu geometrilerin yüzeydeki kavitasyon alanının (m^2) kıyaslanması (Hücum açısı: 5 derece).....94
Şekil 5.30 Sade, Tüberküllü ve 0.1 içeri dışarı Oluklu geometrilerin kaldırma katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 5 derece).....95
Şekil 5.31 Sade, Tüberküllü ve 0.1 içeri dışarı Oluklu geometrilerin direnç katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 5 derece).....95
Şekil 5.32 Sade, tüberküllü ve 0.1 içeri dışarı oluklu geometrilerin hidrofoil performanslarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 5 derece) 96
Şekil 5.33 Sade, Tüberküllü ve Oluklu 0.1 içeri dışarı geometrilerin yüzeydeki kavitasyon alanının (m^2) kıyaslanması (Hücum açısı: 7 derece).....96
Şekil 5.34 Sade, Tüberküllü ve Oluklu 0.1 içeri dışarı geometrilerin kaldırma katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 7 derece).....97
Şekil 5.35 Sade, Tüberküllü ve 0.1 içeri dışarı Oluklu geometrilerin direnç katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 7 derece).....97
Şekil 5.36 Sade, tüberküllü ve 0.1 içeri dışarı oluklu geometrilerin hidrofoil performanslarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 7 derece) 98
Şekil 5.37 Sade, tüberküllü ve oluklu (içeri dışarı 0.1) hidrofoillerin kavitasyon alanı ve kavitasyon periyotlarının hücum açısıyla değişimi.....99
Şekil 5.38 Sade, tüberküllü ve oluklu (içeri dışarı 0.1) hidrofoillerin performans değerlerinin hücum açısıyla değişimi 100
Şekil 6.1 İTÜ-KAT'ın 3 boyutlu çizimi ve test bölgesinin görünümü 101
Şekil 6.2 Tüberküllerin imalatı.....102
Şekil 6.3 Sade, Oluklu ve Tüberküllü hidrofoil geometrileri 103
Şekil 6.4 Kavitasyon periyotlarının 15 döngü boyunca değişimi.....107
Şekil 6.5 Kavitasyon alanları(a) ve Maksimum kavitasyon uzunluğunun (b) 15 döngü için zamana bağlı olarak değişimi. 108
Şekil 6.6 Hidrofoiller için bir tam döngüde meydana gelen 5 kavitasyon gelişim aşamasının kavitasyon görüntüleri.....109
Şekil 6.7 Ek deneylerden elde edilen kavitasyon görüntüleri 111

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Modellemede kullanılan kavitasyonsuz akış koşulları 22
Tablo 3.2 Farklı ağ yapılarında elde edilen kaldırma kuvvetleri 24
Tablo 3.3 Kaldırma ve direnç katsayılarının mevcut sayısal ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.....27
Tablo 3.4 Üç farklı ağ konfigürasyonu için sayısal detaylar ve sonuçlar. 28
Tablo 4.1 Modellemede kullanılan kavitasyonlu akış koşulları.....42
Tablo 4.2 Mevcut çalışmada elde edilen direnç ve kaldırma katsayılarının literatürdeki değerlerle karşılaştırılması 43
Tablo 4.3 Bükümlü NACA 0015 ve NACA 0009 hidrofoillerinin -2º hücum açısında kaldırma ve direnç katsayıları.....64
Tablo 4.4 Yarı bükümlü NACA 0009 ve NACA 0015'in AoA= +1º'deki kaldırma ve direnç katsayıları. 66
Tablo 4.5 AoA=+4 derecede bükümsüz hidrofoillerin kaldırma ve direnç katsayıları.....71
Tablo 5.1 Yarı bükümlü tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin kaldırma ve direnç katsayılarının 1 derece hücum açısında karşılaştırılması.....75
Tablo 5.2 Yarı bükümlü tüberkülsüz ve tüberküllü hidrofoillerin kaldırma ve direnç katsayılarının 3 derecelik hücum açısında karşılaştırılması 78
Tablo 5.3 Yarı bükümlü kesitli hidrofoillerin kaldırma ve direnç katsayılarının 3 derecelik hücum açısında karşılaştırılması 80
Tablo 5.4 Yarı bükümlü tüberkülsüz ve tüberküllü hidrofoillerin kaldırma ve direnç katsayılarının 7 derecelik hücum açısında karşılaştırılması 81
Tablo 5.5 Sade, tüberküllü ve oluklu hidrofoillerin 3 derece hücum açısında oluşan bir kavitasyon döngüsü için seçilmiş olan zaman aralıkları 89
Tablo 5.6 Bir kavitasyon periyoduna ait fazların Sade, Tüberküllü ve Oluklu hidrofoil geometrileri için değişimi (3 derece hücum açısında).....90
Tablo 6.1 Kavitasyon tünelindeki suyun özellikleri 104
Tablo 6.2 Test senaryoları ve akış koşulları.....105
Tablo 6.3 Ek kavitasyon deneylerine ait akış koşulları ve zaman aralıkları.....110

ÖZET

Hidrofoillerde Büküm, Yüzey Olukluluğu ve Giriş Ucu Tüberkül Etkilerinin Kavitasyonlu Akış Koşullarında Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi

Sinem ÖKSÜZ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Fahri ÇELİK

Eş-Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Onur USTA

Denizciliğin pek çok alanında (gemi pervanesi, dümen, hidrofoil tekne ayakları, akış türbini vb.) hidrodinamik kaldırma kuvveti üretmek için hidrofoiller kullanılmaktadır. Kavitasyonsuz ve kavitasyonlu akış koşullarında hidrofoiller üzerinde yapılan geometrik değişiklikler sayesinde daha stabil bir akış sağlamak, verimi arttırmak, kavitasyonu, yakıt tüketimini ve buna bağlı olarak maliyeti azaltmak mümkün olabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, 3-boyutlu hidrofoillere uygulanan büküm, tüberkül ve oluk modifikasyonlarının kavitasyonlu ve kavitasyonsuz akış koşullarındaki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla çalışmanın ilk kısmında bükümlü hidrofoillerin kavitasyonsuz akış koşullarında HAD yöntemiyle akış analizleri yapılmıştır. Doğrulama çalışması kapsamında RANS yöntemi ve k-omega türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilen analizler için farklı ağ örgüsü yoğunlukları ile ağ bağımsızlığı çalışması tamamlanmıştır. Geçerleme çalışmalarında, Delft Twist-11

olarak bilinen (Bükümlü NACA 0009) hidrofoil kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Sonrasında, kanat açıklık oranı 2 olacak şekilde, farklı bükümlülüğe ve kesit kalınlığına sahip hidrofoiller oluşturulmuştur. Oluşturulan bu hidrofoillerin basınç, kaldırma ve direnç katsayıları farklı hücum açılarında kıyaslanmıştır.

Çalışmanın devamında bu hidrofoillerin kavitasyonlu akış koşullarındaki analizleri RANS ve DES metotlarıyla gerçekleştirilmiştir. RANS metodunun kaldırma ve direnç katsayılarını elde etmede yeterli olduğu ancak kavitasyon periyodunun hassasiyetle elde edilebilmesinde yetersiz olduğu tespit edildiğinden, analizlere DES yöntemiyle devam edilmiştir. Bu kısımda, kaldırma ve direnç katsayıları, zamana bağlı kavitasyon oluşumu görselleri, kavitasyon alanı ve kavitasyon oluşum periyodu sayısal olarak elde edilmiştir.

Bir sonraki aşamada kalın kesitli, yarı bükümlü hidrofoile giriş ucu tüberkülü ilavesi yapılmış, tüberkülsüz hidrofoille kıyaslama analizleri yapılmıştır. Daha sonra tüberkülsüz hidrofoilin yüzeyine oluk uygulanarak yeni bir geometri oluşturulmuş, sade, tüberküllü ve oluklu hidrofoillerin kavitasyonsuz ve kavitasyonlu akışta HAD analizleri gerçekleştirilmiş; kavitasyon oluşumu görüntüleri, kavitasyon alanı, kavitasyon periyodu, kaldırma ve direnç katsayıları incelenmiştir.

Tez çalışmasının son aşamasında, belirlenen geometrilerin kavitasyonlu akış deneyleri kavitasyon tünelinde gerçekleştirilmiştir. Deney çalışmasında, farklı Reynolds ve kavitasyon sayısı koşullarında, tüberkül ve oluk etkilerinin incelenmesinde, yüksek çözünürlüklü kamerayla elde edilen kavitasyon görselleriyle kavitasyon alanı, boyu ve kavitasyon periyotlarından yararlanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kavitasyon, hidrofoil, tüberkül, olukluluk, HAD

ABSTRACT

Experimental and Numerical Investigation of Twist, Surface Corrugation and Leading Edge Tubercle Effects in Hydrofoils under Cavitating Flow Condition

Sinem ÖKSÜZ

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Fahri ÇELİK

Co-supervisor: Dr. Onur USTA

Hydrofoils are used in various maritime applications, including ship propellers, rudders, hydrofoil boat supports, and tidal turbines, to generate hydrodynamic lift. By implementing geometric modifications on hydrofoils under cavitating and non-cavitating flow conditions, it is possible to achieve a more stable flow, improve efficiency, and reduce cavitation, fuel consumption, and associated costs.

This thesis investigates the effects of twisting, tubercles, and corrugations applied to hydrofoils under cavitating and non-cavitating flow conditions. In the first part of the study, CFD analyses were performed on twisted hydrofoils under non-cavitating flow conditions. As part of the verification study, simulations were conducted using the RANS method with the k-omega turbulence model, and a grid-independence study was completed with different mesh densities. For validation, numerical results obtained from the Delft Twist-11 hydrofoil were compared with experimental data. Subsequently, hydrofoils with different twist configurations and section thicknesses were generated. The pressure, lift, and drag coefficients of these hydrofoils were analyzed across various angles of attack.

Then, hydrofoil analyses under cavitating flow conditions were conducted with RANS and DES methods. In this section, lift-drag coefficients, cavitation visualization, cavitation area, and period were numerically obtained.

In the following section, leading-edge tubercle was applied to half-twisted hydrofoil, and comparative analyses were conducted against the non-tubercled hydrofoil. Subsequently, a corrugation was added to the surface of the non-tubercled hydrofoil to form a new geometry. CFD analyses of the baseline, tubercled, and corrugated hydrofoils were performed examining cavitation formation, cavitation area, period, and lift-drag coefficients.

In the final stage of the study, cavitating flow experiments of the selected geometries were conducted in a cavitation tunnel. The effects of tubercles and corrugations were analyzed under different Reynolds and cavitation number conditions using high-resolution cavitation images to evaluate cavitation area, length, and period.

Keywords: Cavitation, hydrofoil, tubercle, corrugation, CFD

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

1

GİRİŞ

Hidrofoillerin denizcilik alanında türbinler, dümenler, gemi pervaneleri gibi pek çok uygulama alanları bulunmaktadır. Hidrofoil geometrisi tasarımlarında yapılan değişiklikler denizcilik alanındaki bu araçların performansını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu uygulamalarda en çok karşılaşılan sorunlar titreşim, gürültü, direnç artışı, verimde azalma, yakıt tüketiminin artması, kavitasyon ve buna bağlı olarak yüzeylerde meydana gelen erozyon olarak sıralanabilir. Bu çalışmada hidrofoil geometrisinde büküm ve tüberkül modifikasyonları yapılarak bu etkileri azaltıp, performansı artırmak hedeflenmektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan geçerleme (validasyon) çalışmalarında kullanılan Delft Twist-11 hidrofoil modeli, Foeth'in (2008a) doktora tez çalışmaları kapsamındaki deneylerde kullanmış olduğu NACA 0009 kesitine sahip bükümlü dikdörtgen bir kanattır. Bu geometrinin bükümlülüğü, kanat açıklığı boyunca kesitlere en uç çıkış kenarı -2 derece ve tam ortada +9 derece olacak şekilde değişen bir açı dağılımı verilmesiyle oluşturulmuştur.

Bölüm 2'de çalışmada gerçekleştirilen HAD analizlerinin dayandığı matematiksel modellemeye ait teorilerden bahsedilmiştir. Analizlerde kullanılan k-omega türbülans modeli kullanılmıştır. Kavitasyonsuz ve kavitasyonlu analizler RANS yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Kaldırma ve direnç katsayıları için deneysel verilere oldukça yakın sonuçlar bu yöntemle elde edilebilirken, kavitasyon periyodu belirlemede yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu sebeple 4. Bölüm'deki analizlere DES yöntemiyle devam edilmiştir. Kavitasyon modeli olarak Schnerr-Sauer kavitasyon modeli kullanılmıştır. Bu model, kavitasyon olayının sayısal olarak modellenmesi ve simülasyonu için kullanılan, özellikle sıvı içinde oluşan buhar boşluklarının (kavitasyon baloncuklarının) oluşumu, büyümesi ve çökmelerini anlamak için kullanılan bir modeldir.

Çalışmanın ilk kısmında (**3. Bölüm**) Delft Twist-11 hidrofoil geometrisi kavitasyonsuz akış koşulları için modellenerek deneysel çalışmalardan elde edilen

kaldırma kuvveti ve hidrofoilin farklı kesitlerinde okunan basınç değerlerine olabildiğince yakın değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Analizler RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) metodu ile zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir. Belirsizlik analizi ve ağ bağımsızlığı çalışmasıyla yapılan doğrulama ve geçerleme çalışmaları tamamlandıktan sonra, bükümlü, yarı bükümlü ve bükümsüz (orijinal) geometriler NACA 0009 ve NACA 0015 kesitleri için oluşturulmuştur. Daha sonra bu geometrilerin kavitasyonsuz akış koşullarında farklı hücum açılarında ($-2<AoA<8$) sayısal olarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı geometriler ve hücum açılarında elde edilen kaldırma ve direnç katsayıları ile kanat üzerindeki basınç dağılımları kıyaslanmıştır. Bu bölümde ayrıca bükümlü hidrofoiller için kavitasyonsuz akış koşullarında Reynolds sayısı etkisi de RANS yöntemi ile incelenmiştir.

Bölüm 4'te, bir önceki bölümde kavitasyonsuz akış durumunda gerçekleştirilen analizler kavitasyonlu durum için RANS ve DES (Detached Eddy Simulation) metodu kullanılarak yapılmıştır. RANS yöntemiyle performans değerlerinde tatmin edici sonuçlar elde edilmesine rağmen, kavitasyon oluşumunun doğada gözlemlendiği gibi tekrarlanan periyotlar şeklinde ve deney verileri ile uyumlu olarak elde edilebilmesi DES metoduyla sağlanabilmiştir. Bu sebeple her iki yöntem de bu kısımda kullanılmış, sonuçlar birbiriyle kıyaslanmıştır. Kavitasyonlu akış için validasyon çalışması, Delft Twist-11 hidrofoiline ait deneysel kavitasyon oluşumu görselleri ve kaldırma kuvveti değerleri kıyaslanarak gerçekleştirilmiştir. Referans alınan değerler Foeth (2008) tarafından Delft Üniversitesi'nde kavitasyon tünelinde gerçekleştirilmiş olan deney sonuçlarının sunulduğu raporlardan alınmıştır. Deney görselleri Delft Üniversitesi'nin yayınlamış olduğu deney verilerinden ve raporlarından elde edilmiştir. Kavitasyon oluşumu görselleri, hızlı kamera ile kaydedilen deney videosundan alınmıştır. Validasyon çalışması tamamlandıktan sonra oluşturulan tüm geometrilerin kavitasyonlu akışta analizleri gerçekleştirilmiştir. Geometriler üzerinde oluşan kavitasyonun boyutsuz alan değerleri ile kaldırma ve direnç katsayıları karşılaştırılmıştır. RANS analizlerinde kavitasyonun etkileri deneysel veriler ile uyumlu olarak elde edildikten sonra, kavitasyonun oluşmaya başlaması ve gelişerek kopması arasında geçen sürede (kavitasyon periyodu) boyutsuz kavitasyon alan değerleri üzerinden incelenmiştir. Analizlerde, düşük hücum açılarında, fiziksel zaman ile birlikte kavitasyon alanının

sabit kaldığı, bir başka ifade ile kavitasyon periyodunun oluşmadığı görülmüştür. Buradan, kavitasyon oluşumunun doğada olduğu gibi periyodik bir döngü halinde elde edilemediği sonucuna ulaşılarak daha gelişmiş bir modelleme yöntemine ihtiyaç duyulmuştur.

DES yöntemi ile, RANS'a kıyasla daha gelişmiş bir akış modellemesi yapılabilmesine karşın, işlemci gereksinimi ve hesaplama süresi bakımından daha pahalı bir yöntemdir. Zamana bağlı bir olgu olan kavitasyon oluşum periyotlarının daha gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için çalışmada DES yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmalara ait detaylar Bölüm 4'de verilmiştir.

5. Bölüm'de daha önceki bölümlerde analizi gerçekleştirilen geometrilerden kalın keside sahip, (NACA 0015) yarı bükümlü hidrofoil seçilerek bu geometrinin giriş ucuna sinüzoidal tüberkül yapıları eklenmiştir. Bu yapıların oluşturulmasında Lohry'nin (2012) yapmış olduğu çalışmadaki matematiksel ifadelerden yararlanılmıştır. Yarı bükümlü tüberküllü NACA 0015 hidrofoiline ait analizler farklı hücum açılarında (1, 3, 5 ve 7 derece) kavitasyonlu akış koşullarında gerçekleştirilmiş, elde edilen performans değerleri, boyutsuz kavitasyon alan değerleri ve kavitasyon oluşumu görselleri tüberkülsüz geometrilerle kıyaslanmıştır.

Kavitasyonsuz akışta kaldırma kuvveti katsayılarına bakıldığında, kesit etkisinin neredeyse görülmediği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar arasında kavitasyonlu akışta direnç katsayısının ince kesitli kanatta daha düşük olduğu, ancak belli bir hücum açısı değerinden sonra kalın kesitli kanatta daha düşük direnç oluştuğu elde edilmiştir. Bu sonuç, literatürdeki çalışmalarla da kıyaslanmış ve uyumlu olduğu görülmüştür. Tüberküllü kanatla yapılan çalışmalarda ise en büyük kaldırma kuvvetinin oluştuğu açıya (kritik hücum açısı) yakın değerlerde tüberkül etkisinin görülmeye başlandığı gözlemlenmiştir. Ek olarak tüberkül etkisini sadece oluklarla oluşturmanın mümkün olup olmadığı, bu bölümde incelenmiş olan tüberküllü hidrofoille aynı hizada ancak farklı derinliklerde oluklara sahip hidrofoiller oluşturularak analiz edilmiştir. Kavitasyonsuz ve kavitasyonlu akış koşullarında bu geometriler sade ve tüberküllü hidrofoiller ile kıyaslanmıştır.

Bölüm 6'da bir önceki bölümde HAD analizleri sonucunda seçilen Oluklu, Tüberküllü ve Sade hidrofoiller ile kavitasyon tünelinde deneyler

gerçekleştirilmiştir. 3.33 en/boy oranına sahip ahşap malzemeden üretilmiş kanat modelleri, İTÜ'de bulunan Büyük Kavitasyon Tüneli'nde (İTÜ-KAT) kavitasyonlu akış koşullarında farklı Reynolds ve kavitasyon sayısı koşullarında test edilmiştir. Elde edilen bulgular bu kısımda verilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Kanat geometrisindeki değişiklikler, performanslarını ve çalışma verimliliklerini artırmak amacıyla pek çok araştırmacının dikkatini çeken önemli bir inceleme alanı olmuştur. Amano and Xu (2003)'ya göre, bir kanadın tasarımını değiştirmek, giriş girdaplarından ve akıntı girdaplarından kaynaklanan ikincil akışları azaltır ve bu da gürültüyü azaltır (You *vd.,* 2019). Sağladığı birçok fayda nedeniyle, farklı kanat geometrileri sadece havacılık sektöründe değil, denizcilik (Goundar vd., 2012) ve turbo makine (Kaygan ve Ulusoy, 2018) gibi diğer alanlarda da kullanılmaktadır (Kangmin, 2009). Örneğin, kanat kalınlığındaki değişim ile türbinlerin verimliliği arttırılmaktadır. Doğada kelebek veya arı kanatlarında uçuş esnasında görülebilen bükümlü yapılar, kanadın geometrisini değiştirmenin bir yoludur (Le *vd.,* 2013). Büküm, kanat üzerinde parabolik bir kaldırma kuvveti dağılımı oluşturur ve bu da belirli bir kanat bölümünün hücum açısını yerel olarak değiştirerek oluşan direnci azaltır (Clancy, 1975). Bükümün etkileri, aerodinamik performans üzerinde araştırmak için havacılıkta incelenirken, bir pervaneye kavitasyon durumundaki etkisi deniz mühendisliğinde dikkate alınmıştır. Delft Twist-11'e ilişkin deneysel ve sayısal verilerin bolluğu nedeniyle, ilgili literatürde dikdörtgen planformlu kanatlar için bir model olarak kullanılmıştır. Kanadın her iki ucunda hücum açısı sıfır derece iken orta kesitte 11 derece olması sebebiyle bu model Twist-11 hidrofoil olarak adlandırılmıştır (Foeth, 2008a). Performansa ve kavitasyona olan doğrudan etkisi sebebiyle, kanat geometrisinin değiştirilmesi ve bu değişikliklerin kanadın hidrodinamik performansı üzerindeki etkilerinin incelendiği pek çok çalışma bulunmaktadır. NACA 0015 hidrofoil üzerindeki bir tabaka/bulut kavitasyonu, Wang ve Ostoja-Starzewski (2007) tarafından Büyük Girdap Simülasyonu (LES) yöntemi kullanılarak çeşitli hücum açıları ve değişen kavitasyon sayıları için incelenmiştir. Sayısal modellerinin, büyük ölçekli girdaplar ve kavitasyon

kabarcıkları arasındaki etkileşimi ve kavitasyon sürecinin evrimini analiz etmek için etkili bir araç olduğunu kanıtlamışlardır. Lu *vd.*, (2010) açık kaynaklı yazılım kullanarak Delft Twist-11 hidrofoil üzerinde deneysel ve sayısal araştırmalar yürütmüştür. Elde ettikleri sayısal sonuçların literatürde yayınlanan verilerle iyi bir uyum içinde olduğunu bildirmişlerdir. Delft Twist-11 hidrofoilinin kavitasyon özellikleri pervaneninkilerle karşılaştırılabilir olduğundan, kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Pervane yerine bu basit geometri kullanılarak pervanenin kavitasyon özellikleri incelenebilmektedir. Bensow (2014), sayısal ve deneysel yöntemler kullanarak boynuz tipi ve bükümlü dümenlerle donatılmış konteyner gemilerinin hız performansını incelemiştir. Çalışmalarında üç farklı bükümlü dümen çeşidi dikkate alınmıştır. Bükümlü dümenin, direnç ve kaldırma kuvvetleri boynuz tipinden daha az olsa bile tahrik performansını ve sonuç olarak geminin verimliliğini artırdığı söylenmektedir.

Literatürde kavitasyonlu akış koşullarında hidrofoillerle gerçekleştirilen pek çok sayısal ve deneysel çalışma bulunmaktadır. Leroux *vd.* (2004) NACA66 hidrofoili üzerindeki kısmi kavitasyon oluşumunu kavitasyon tünelinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışma ile incelemişlerdir. Çalışmada kavitasyon uzunluğuna bağlı kaldırma ve direnç katsayılarının yanı sıra basınç ve gürültü ölçümleri de yapılmıştır. Kord boyunun yarısını geçmeyecek şekilde oluşan kavitasyon boylarında, kavitasyonun daha stabil davrandığı gözlemlenmiştir. Bensow (2011), Delft Twist-11 hidrofoil üzerindeki kavitasyonlu akışı zamana bağlı olarak Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), Large Eddy Simulation (LES) ve Detached Eddy Simulation (DES) gibi sayısal yöntemleri kullanarak incelemiştir. RANS için Spalart-Allmaras türbülans modeli kullanılırken, DES'in Gecikmeli versiyonu kullanılmıştır. Beklendiği gibi, LES akış gelişimini başarılı bir şekilde tahmin etmiş, ancak RANS başarısız olmuştur. Kavitasyonlu akışlar, sayısal çözümde sorunlara neden olan kabarcıkların oluşması ve ardından çökmesi nedeniyle zorlu akışlardır. Bu nedenle, bu tür akışlar için uygun bir yaklaşım belirlemek büyük önem taşımaktadır. LES, kaldırma kuvvetini tam olarak tahmin edemese de genel anlamda karmaşık akışların çözümünde oldukça makul sonuçlar sunar. Park and Rhee (2013) kavitasyonlu ve kavitasyonsuz akış koşulları altında NACA66 üzerindeki akışı simüle etmek için RANS yöntemini kullanmıştır. Daha karmaşık türbülans modellerinin ve daha gelişmiş kavitasyon modellerinin

kullanılmasının daha kesin sonuçlar verdiğini öne sürmüşlerdir. Ji *vd.,* (2013), tarafından Delft Twist-11 hidrofoil üzerindeki kavitasyonlu türbülanslı akış koşullarında Kısmi Ortalamalı Navier-Stokes (Partially Averaged Navier-Stokes) yönteminin performansını RANS yaklaşımı ile karşılaştırmak için hibrit bir RANS-LES modeli kullanılmıştır. PANS yönteminin kaldırma katsayısı ve kavitasyon oluşumu açısından doğru sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Ancak LES yönteminin, Delft Twist-11 hidrofoili etrafında üç boyutlu akış modellemesinde daha iyi sonuç verdiğini belirtilmiştir (Bin *vd.,* 2013). LES yöntemi kullanılarak, ağ sayısının Delft Twisted-11 kanat modelinden geçen kararsız, üç boyutlu, kavitasyonlu ve kavitasyonsuz akışların doğruluğunu nasıl etkilediği bir başka çalışmada detaylı olarak incelenmiştir (Wu *vd.,* 2016). Kavitasyonlu akışlar için ince ağ gerekli olsa da kaba ağ yapısı ile de kavitasyonsuz akışlar için deneysel verilerle karşılaştırıldığında makul sonuçlar elde edilebileceği gösterilmiştir. Yazarlar, optimum kavitasyon uzunluğunun, kavitasyon salınımı frekansının ve kavitasyon akış modellerinin hepsinin büyük ölçüde ağ çözünürlüğüne bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Kavitasyonlu akışlarda, Delft Twist-11'in kendine özgü şekli bazı tuhaf olaylara yol açmaktadır. Chen *vd.,* (2017), NACA66 profili ve LES çözümünü kullanarak, kanat ortasına yakın bölgelerde akımın daha hızlı hareket ederken, artan yerel hücum açısı nedeniyle orta bölüme doğru daha kalın kavitasyon kalınlığı oluştuğunu ortaya koymuştur. Daha sonra, -2 derece hücum açısında akışa maruz kalan Delft Twist-11 hidrofoil için benzer sonuçlar Long *vd.,* (2018) tarafından rapor edilmiştir. Birincil ve ikincil kopmalardan sorumlu olan U tipi yapıların oluşumu ve büyümesi, LES modeli ve Eulerian tekniği ile başarılı bir şekilde yakalanmıştır. Önceki araştırmaların aksine, Movahedian *vd.* (2019), bükümlü bir NACA16012 hidrofoil kullanarak kanat üzerindeki kavitasyonlu akışı incelemiştir. Sayısal simülasyonların sonuçları, türbülanslı kinetik enerji, hız ve kanat üzerindeki basınç dağılımındaki değişiklikler gibi kavitasyonlu bir akışta etkili olan temel değişkenlerin önemini ortaya koymuştur. Chen vd. NACA66 hidrofoili etrafındaki kavitasyonlu akışı LES yöntemi ile modelleyerek kavitasyon periyodunu, kanat üzerindeki basınç dağılımını, tabaka kavitasyonundan bulut kavitasyonuna geçiş durumunu, kanat üzerinde oluşan hairpin (tokamsı) girdap yapıları ve türbülansın kavitasyona etkilerini incelemişlerdir (Chen *vd.,* 2019). Bir başka çalışmada, Delft Twist-11 hidrofoili etrafındaki akış, kavitasyonsuz ve kavitasyonlu durumu için Kararsız Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (URANS)

yöntemiyle çözülmüştür (Melissaris *vd.*, 2019). Su tünelinde boya testleriyle erozyon tahmini için gerçekleştirilmiş deneysel bir çalışmanın doğrulamasını yüksek oranda uyumlu bir şekilde elde edebilmişlerdir. Sayısal olarak gerçekleştirilen çalışmada hidrofoilde yüzey aşınmasının olası meydana gelebileceği yerlerin tahmini gerçekleştirilmiştir.

Roy ve Mukherjee, (2020) yaptıkları çalışmada NACA 0012 ve NACA 4415 kesitli kanat modellerinde alüminyum parça ekleyerek kaldırma kuvvetini aynı tutarak akım ayrılmasını önlemeyi ve stall açısını ötelemeyi hedeflemişlerdir. Sayısal olarak gerçekleştirdikleri analizlerde orijinal kanatları farklı şekillerde değiştirilmiş geometrilerle kıyaslanmışlardır. Oluşturulan yeni hidrofoiller daha sonra bir rüzgâr tünelinde orijinal kanatlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada geometride yapılan değişikliklerin stall durumunu geciktirebileceği ve geniş bir hücum açısı aralığı için kaldırma kuvvetini artırabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Klapwijk *vd.*, (2021) Delft Twist-11 hidrofoil ile yaptıkları sayısal çalışmada, türbülans modellemesinin kavitasyon oluşumu tahminindeki etkilerini incelemişlerdir. Laminer akış modellemesinde akım ayrılmalarının kanadın giriş kenarından itibaren başladığı, bu durumun türbülanslı akış modellemesiyle baskılanabildiği görülmüştür. Ayrıca ağ çözünürlüğünün çözümü önemli ölçüde etkilediğine vurgu yapılmıştır.

Tüberkül modifikasyonları ise stall açısını (kritik hücum açısını) geciktirmesi, pasif akış kontrolcüsü gibi kullanılabilmesi, buna bağlı olarak kavitasyonun olumsuz etkilerini azaltması vb. sebeplerle pek çok çalışmaya konu olmuştur. Fish *vd.* (1995) çalışmalarında kambur balinaların yüzgecinde görülen tüberküllü yapıların hidrofoillere uygulanması ile kanat performansını iyileştireceğini, bu yapıların pasif akış kontrolcüsü gibi davranarak kritik hücum açısını geciktireceğini ön görmüşlerdir. Chen, *vd.*, (2012), yapmış oldukları deneysel çalışmada NACA0012 kesitine sahip olan kanat modeline farklı sinusoidal dalgalarda tüberkül yapıları ekleyerek üç farklı tüberkül yapısını tüberkülsüz geometri ile karşılaştırmışlardır. Kanat performansları karşılaştırıldığında ise orijinal geometriye göre direnç kuvvetinde azalma, kanat performasında ise artma gözlemlenmiştir. Shi *vd.* (2016), S814 kesitli gelgit türbin kanatlarının hücum kenarına tüberkül geometrisini uygulayarak kavitasyon tünelinde deneysel olarak ve sayısal çalışma ile incelemişlerdir. Bu çalışmada tüberkül eklenen geometride kanat veriminin arttığı, maksimum kaldırma kuvvetini üreten kritik hücum açısının (stall açısı) ise geciktiği

gözlemlenmiştir. Lebeau ve Isaac (2018), sayısal yöntemler ile NACA 0009 kesiti kullanarak beş farklı tüberkül yapısının akış bölgesinde oluşan girdap yapıları üzerindeki etkilerini farklı hücum açılarında karşılaştırmıştır.

Custodio *vd*. (2018), kord boyuna bağlı farklı dalga boyu ve genliğe sahip tüberküllü hidrofoiller üzerindeki kavitasyon oluşumunu deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, kanat tünele dik olarak yerleştirilmiş, hücum açısının 30 dereceye kadar değiştirildiği çalışmada, kaldırma ve direnç kuvvetlerinin yanısıra özellikle tabaka kavitasyonunun farklı hidrofoiller üzerindeki değişimi kıyaslanmıştır. Shin vd. (2019), bükümlü dümen yapısı üzerine tüberkül uygulayarak gemilerin karaya oturma ve çarpışma gibi durumlarında büyük önem arz eden manevra kabiliyetini arttırmayı hedeflemişlerdir. Tüberküllü dümen yapısında yüksek hücum açılarında akım ayrılmalarının daha farklı olduğu, bu geometrinin maksimum kaldırma kuvvetini üreten hücum açısını geciktirdiği ve yüksek kanat verimi sağladığı gözlemlenmiştir. Li vd. (2021), kambur balina kanadı tasarımını, ön kenarda sinüsodial şekil kullanılarak hidrofoillere uygulamışlardır. Bu tasarım pasif kavitasyon kontrolcüsü olarak adlandırılmaktadır. Deneyler ilk olarak sade bir kanat modeli ve iki farklı sinusoidal dalga şekline sahip tüberküllü hidrofoil oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Stark ve Shi, (2021) gerçekleştirdikleri çalışmada su altı gürültüsünü azaltmak amacıyla pervaneye tüberkül yapıları ekleyerek DES yöntemiyle sayısal olarak incelemişlerdir. Bir başka çalışmada, bu yapılar türbin kanatlarına uygulanarak türbin verimi üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir (Fan vd., 2023). Posa *vd.,* (2024) pervane kanatlarının giriş ucuna tüberkül uygulamasını sayısal olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada tüberkülsüz ve tüberküllü pervane kıyaslanmış, tüberkülün performansta iyileşme sağlamadığı ancak yüzeydeki kavitasyon oluşumunu yönlendirerek pervane arkasındaki girdaplılığı azalttığı ve daha stabil bir akış alanı sağladığı görülmüştür.

Yüzey olukluluğu modifikasyonunun, ön kenar tüberkülü kadar yaygın olmasa da havacılık ve denizcilik alanlarında farklı mühendislik uygulamaları mevcuttur. Macduff'un (2004) patent çalışmasında, gemi dümeninin her iki yüzeyine, kord boyuna paralel ve sık bir şekilde yerleştirilmiş yüzey olukları uygulanarak hidrodinamik performansın iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu oluklar, dümen kordu uzunluğunun %90'ını kaplayacak şekilde tasarlanmıştır. Papadopoulos *vd.,* (2022) insansız hava araçlarının kanatlarına farklı tipte ön kenar tüberkülü ve çit

modifikasyonları yapmış, oluşturulan yeni kanat modellerinin kanat performansını ve taşıma kapasitelerini orijinal kanat geometrisiyle karşılaştırmıştır. Sonuçlar, her iki modifikasyonun da genel olarak kiritik hücum açısını geciktirdiğini, taşıma kapasitesini artırdığını ve direnci azalttığını göstermiştir. Bir diğer uygulama alanı ise, gemi pervanelerinin kanatlarına uygulanan yüzey oluklarıdır. Bu tür pervaneler ticari olarak piyasada bulunmaktadır (*Piranha Propellers*, 2025). Ayrıca, Shukla *vd.*, (2023) çalışmasında olduğu gibi, hidrofoil yüzeyine kanat açıklığı yönünde oluklar eklenerek hidrodinamik etkilerin araştırıldığı farklı çalışmalar da bulunmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Farklı kalınlıkta kesitlerdeki hidrofoil geometrileri üzerinde yapılan bükümlülük, tüberkül ve oluk değişikliklerinin kavitasyonsuz ve kavitasyonlu akışta kanat performansına ve kavitasyon oluşumuna etkilerinin incelenmesi ve buna bağlı olarak kavitasyondan kaynaklanan olumsuz etkilerin azaltılması hedeflenmektedir.

1.3 Hipotez

Denizcilikte pek çok alanda kullanılan temel yapılardan olan hidrofoillerin geometrilerinde yapılan değişikliklerin, performansa ve kavitasyon oluşumuna doğrudan etki ettiği bilinmektedir. Bu çalışmada, hidrofoillere yapılacak olan büküm, giriş ucu tüberkülü ve yüzey olukluluğu modifikasyonlarıyla performanslarının iyileştirilmesi, hidrofoil üzerinde oluşan kavitasyonun ve buna bağlı olarak ortaya çıkan olumsuz etkilerin azalması öngörülmektedir.

2

MATEMATİKSEL MODELLEME

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri, deneylerdeki akış özelliklerini gerçeğe yakın bir şekilde analiz etmek amacıyla Star-CCM+ ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hidrofoil etrafındaki akış özelliklerini modellemek amacıyla, öncelikle sıkıştırılamaz ve Kararsız Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (URANS) denklemleri Sonlu Hacimler Yöntemiyle çözülmüş ve hesaplamalarda ayrıntılı bir yaklaşım kullanılmıştır. Daha sonra, kavitasyonlu akış dinamiklerinin daha detaylı modellenmesi ihtiyacı ve RANS yöntemi kullanılarak kavitasyon döngülerinin (periyot) doğru bir şekilde elde edilememesi nedeniyle, çalışmaya Ayrık Girdap Simülasyonu (DES) yöntemi ile devam edilmiştir.

Kütle ve momentum korunum denklemleri aşağıda gösterildiği gibi Kartezyen tensör notasyonu kullanılarak temsil edilmektedir (Ferziger ve Perić, 2002):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\tau_{ij} - \rho \overline{u_j' u_i'}\right) \tag{2.2}$$

Bu denklemlerde, ρ, u, p ve u' sırasıyla akışkan yoğunluğu, ortalama hız, ortalama statik basınç ve değişken hız olarak kullanılmaktadır. τ_{ij} terimi, Denklem (2.2)'de, gerilme tensörünün viskoz bileşenini temsil ederken, $\rho\overline{u_j' u_i'}$ terimi, özellikle Reynolds gerilmeleri olarak bilinen türbülanslı dalgalanmalar tarafından üretilen gerilmeleri tanımlamaktadır. Üst çizgi ortalama almak için kısaltılmış bir gösterim olarak kullanılır.

Bu araştırmada, Reynolds gerilmeleri doğrusal girdap-viskozite modeli kullanılarak modellenmiştir. Bunun için doğrusal temel ilişki Denklem (2.3)'te aşağıdaki gibi verilmiştir.

Reynolds gerilmesi denklemleri:

$$-\rho\overline{u_j' u_i'} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \tag{2.3}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{2.4}$$

Bu denklemlerde μ_t türbülans viskozitesini, k ise türbülans kinetik enerjisini temsil etmektedir. Kronecker deltasını temsilen δ_{ij} ve ortalama gerilme oranı tensörünü temsilen S_{ij} kullanılmıştır.

RANS yöntemleri, akış değişkenlerinin zaman içinde ortalamasını alarak türbülanslı akışları modellemedeki verimliliği ile bilinir. RANS yönteminde Navier-Stokes denklemleri zaman ortalamalı bir şekilde çözülürken, tüm ölçeklerdeki türbülans etkileri modellenir. RANS yöntemi birçok mühendislik uygulaması için makul ölçüde doğru tahminler sağlarken, zamana bağlı akışı detaylı bir şekilde modellemek ve türbülans etkilerini detaylı incelemek için daha az uygundur. Bu kısıt girdap saçılması, akım ayrılması ve bu tez çalışmasında olduğu gibi çok fazlı akış dinamiklerinin özelliklerinin detaylı bir şekilde elde edilmesinde yetersizliğe yol açabilir.

Öte yandan, DES yöntemi RANS ve LES yöntemlerinin kombinasyonu olup RANS'ın yetersiz kaldığı noktaların geliştirilmesine olanak vermektedir. DES modellemesi, sınır tabaka bölgelerinde RANS yöntemi kullanırken, sınır tabakanın uzağında, akım ayrılması veya kararsızlık bölgelerinde türbülanslı akış yapılarını LES yönteminin denklemleri ile çözer. LES yönteminde, büyük ölçekli yapılar (büyük ölçekli girdaplar) doğrudan çözülürken, küçük ölçekli yapılar modellenir. LES'de denklemler hacim ortalamalı olarak filtrelenir. LES'te çözülen denklemler RANS'takilerle aynıdır, ancak çözümdeki filtreleme nedeniyle, başka bir deyişle büyük ölçekli türbülans terimleri de çözüldüğünden, çözüm daha karmaşık ve zordur. Bu nedenle, LES simülasyonları, özellikle karmaşık geometriler ve yüksek Reynolds sayılı akışlar için hesaplama açısından zor ve pahalı (yüksek hesaplama gücü ve zaman gereksinimi) olabilir ve bu da bazı mühendislik uygulamaları için pratikliğini sınırlamaktadır.

Bu çalışmada, hidrofoil etrafında kavitasyonlu akış gibi zamana bağlı, türbülanslı ve karmaşık bir problemin çözülmesi gerektiğinden, RANS yönteminin yetersiz kaldığı noktaları da daha doğru bir şekilde elde edebilmek için DES yöntemi de kullanılmıştır. Diğer yandan, hesaplama gereksinimleri pahalı olduğu için LES yöntemi tercih edilmemiştir.

2.1 Türbülans Modeli

Bu çalışmada, sınır tabaka etrafındaki Reynolds gerilme tensörünün çözümü, duvara yakın bölge için *All y+ Wall treatment* duvar fonksiyonu ile birlikte SST k-omega Ayrık Girdap (*SST K-Omega Detached Eddy)* türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir (*Star CCM+ User Guide version 9.04.*, 2022). SST k-omega Ayrık Girdap modeli, sınır katmanlardaki SST k-omega Reynolds Ortalama Navier Stokes modelinin özelliklerini, kararsız ayrılmış bölgelerdeki Büyük Girdap Simülasyonları (LES) ile birleştirmektedir.

SST K-Omega modelinin DES versiyonu, türbülanslı kinetik enerjiyi yöneten taşıma denklemindeki dağılma teriminde yapılan değişikliklerle elde edilir (*Star CCM+ User Guide version 9.04.*, 2022). Dış bölgede, alt ağ hücresi gerilimleri LES Smagorinsky modeli kullanılarak çözülmüştür. Türbülanslı uzunluk ölçekleri IDDES türbülanslı uzunluk ölçeği yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

2.2 RANS Modeli

RANS, türbülanslı akışları modellemek için Navier-Stokes denklemlerinin zaman ortalamasına alınmasına dayanır. Temel yaklaşım, u anlık hız alanını bir ortalama bileşen $\bar{u}$ ve bir değişken bileşen u' olarak ayrıştırmaktır:

$$\boldsymbol{u = \bar{u} + u'} \tag{2.5}$$

Zaman ortalamalı Navier-Stokes denklemleri aşağıdaki gibi yazılır:

$$\overline{\boldsymbol{u}.\boldsymbol{\nabla u}} = -\frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{\rho}}\boldsymbol{\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \bar{u} + RANS\ terms} \tag{2.6}$$

Türbülans etkileri, k-ε veya k-ω modelleri gibi türbülans modelleri kullanılarak hesaplanan Reynolds gerilme tensörü $\overline{u'\,u'}$ aracılığıyla modellenir:

$$\overline{\boldsymbol{u'\,u'}} = \boldsymbol{\mu_t}\,(\boldsymbol{\nabla \overline{u}} + \boldsymbol{\nabla \overline{u}^T}) - \frac{\mathbf{2}}{\mathbf{3}}\boldsymbol{k\,I} \tag{2.7}$$

Burada $\boldsymbol{I}$, tekil matrisi (identity matrix) ifade etmektedir.

2.3 DES Modeli

DES, her iki yöntemin avantajlarını birleştirmek için duvarların yakınında RANS ve serbest akışta (duvardan uzak bölgelerde) LES kullanarak LES'i RANS ile birleştirir. DES'in yönetici denklemleri LES'inkilere benzer ancak üzerinde değişiklik yapılmış bir türbülans modeline sahiptir:

$$\frac{\boldsymbol{\partial u}}{\boldsymbol{\partial t}} + \boldsymbol{u}.\boldsymbol{\nabla u} = -\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\rho}}\,\boldsymbol{\nabla \mathrm{p}} + \boldsymbol{\mu}\,\boldsymbol{\nabla^2 u} + \boldsymbol{S} \tag{2.8}$$

Burada $\boldsymbol{S}$, akışın RANS veya LES bölgesinde olmasına bağlı olarak farklı şekilde modellenen alt örgü ölçekli (subgrid-scale stress tensor- SGS) stres tensörünü temsil eder. Bu ifadeyi hesaplamak için DES yönteminde aşağıdaki denklem kullanılır:

$$S = \tau_{SGS} - \frac{2}{3}\,tr(\tau_{SGS})I \tag{2.9}$$

Burada τ_{SGS} SGS stres tensörünü temsil eder. RANS ve LES bölgeleri arasındaki geçiş, genellikle yerel ağ boyutunun ve türbülans uzunluk ölçeklerinin bir fonksiyonu olan bir birleştirme fonksiyonu tarafından yönetilir (Wilcox, 2006).

Türbülanslı ölçeklerin çözünürlüğü

DES, RANS'a kıyasla türbülanslı yapıların daha detaylı bir şekilde çözümlenmesini sağlar. RANS'ta türbülans modellemesi, özellikle kararsız veya büyük ölçekli yapıların belirgin olduğu karmaşık akışlarda önemli hatalara yol açabilen kapalı modeller kullanarak Reynolds gerilmelerine yaklaşır. Matematiksel olarak, RANS modelleri $\overline{u'\,u'}$ değerine yaklaşmak için kullanılan türbülans modelinin doğruluğu ile sınırlıdır.

DES yöntemi büyük, enerji içeren girdapları yakalamak için LES kullanırken, sınır katmanlarını verimli bir şekilde modellemek için duvarların yakınındaki

çözümlerde RANS yöntemine dayanmaktadır. Bu yaklaşım DES'in, RANS'ın genellikle doğru tahminler sağlayamadığı ayrılma ve sirkülasyon bölgeleri gibi akış karakteristiklerini daha iyi çözmesini sağlar. Matematiksel olarak, DES'in hibrit yaklaşımı, LES bölgesi akış özelliklerine dinamik olarak uyum sağladığından, hesaplama maliyetini aşırı derecede artırmadan doğruluğu artırır.

DES, türbülanslı karışımı (turbulent mixture) ve farklı akış rejimleri arasındaki geçişi etkili bir şekilde modeller. DES'in karışım fonksiyonunun matematiksel formülasyonu, RANS modellerinin çözmede yetersiz kaldığı karmaşık etkileşimleri yakalayarak o bölgedeki akış özelliklerine dayalı olarak RANS ve LES arasında geçiş yapmasını sağlar. Karışım fonksiyonu β, genellikle şu şekilde tanımlanır:

$$\beta = \frac{1}{1+\left(\frac{L_{DES}}{L_{LES}}\right)^{f}} \tag{2.10}$$

Burada L_{DES} ve L_{LES} terimleri sırasıyla RANS ve LES bölgelerindeki türbülans uzunluk ölçeklerini ifade ederken, f ise geçişi kontrol eden parametredir.

Özet olarak DES, türbülanslı akışların modellenmesinde, RANS'a kıyasla matematiksel olarak daha gerçekçi bir yaklaşım sunmaktadır. DES yöntemi, LES ve RANS'ı birleştirerek her iki yöntemin de güçlü yanlarından yararlanmakta, türbülanslı yapıları çözmede ve karmaşık akış olaylarını yakalamada daha yüksek doğruluk sağlamaktadır. DES'in matematiksel formülasyonları, türbülanslı gerilmelerin ve geçiş akışlarının daha doğru bir şekilde temsil edilmesine olanak tanıyarak, geleneksel RANS modellerinin doğasında bulunan sınırların daha ötesini ele alır.

Bu tez çalışmasındaki HAD analizleri, *Kayma Gerilimi Taşınımı (SST) k-omega türbülans modeli* ile birlikte zamana bağlı RANS ve DES yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda, Reynolds gerilme tensörlerini temsil etmek için Boussinesq yaklaşımını kullanan İki Denklemli *SST k-omega türbülans modeli* tercih edilmiştir. Bu özel modelde türbülans viskozitesi, türbülanslı kinetik enerjiyi (*k*) ve enerji dağılım oranını yöneten denklemlerin çözülmesiyle belirlenir.

k-omega türbülans modeli, türbülanslı kinetik enerji (*k*) ve spesifik dağılım oranı (ω) için taşıma denklemlerini çözen iki denklemli bir modeldir.

Wilcox (2006), *k-omega* modelinin başlangıcını kapsayan, alternatif modellerle karşılaştıran ve kapsamlı bir kaynak olarak bilinmektedir. *k-omega* modelinin yaratıcısı olan Wilcox, bu modelin *k-epsilon* modeline göre daha üstün olduğunu ileri sürmektedir. *k-omega* modelinin *k-epsilon* modeline kıyasla kabul edilen bir avantajı, ters basınç gradyanlarına maruz kalan sınır katmanlarını ele alma konusundaki gelişmiş kabiliyetidir. Bununla birlikte, en önemli avantajı, ek düzenlemeler gerektirmeden viskoz ağırlıklı bölgeyi de kapsayacak şekilde sınır tabakanın tamamında uygulanabilir olmasıdır(*Star CCM+ User Guide version 9.04.,* 2022).

Türbülanslı girdap viskozitesi (μ_e) şu şekilde hesaplanır:

$$\boldsymbol{\mu_e = \rho\, k\, T} \tag{2.11}$$

Burada, ρ akışkan yoğunluğu ve T türbülanslı zaman ölçeğidir.
k-omega türbülans modeli için taşıma denklemleri aşağıdaki gibi sunulmuştur:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\boldsymbol{\rho\, k}) + \boldsymbol{\nabla}.(\boldsymbol{\rho\, k\, \bar{V}}) = \boldsymbol{\nabla}.[(\boldsymbol{\mu + \sigma_k\, u_t})\boldsymbol{\nabla\, k}\,] + \boldsymbol{P_k} - \boldsymbol{\rho\, \beta^*\, f_{\beta^*}(\omega\, k - \omega_0\, k_0)} + \boldsymbol{S_k} \tag{2.12}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\boldsymbol{\rho\, \omega}\,) + \boldsymbol{\nabla}.(\boldsymbol{\rho\, \omega\ \bar{V}}) = \boldsymbol{\nabla}.[((\boldsymbol{\mu + \sigma_\omega\ u_t})\boldsymbol{\nabla\, \omega}\,] + \boldsymbol{P_\omega\ - \rho\, \beta\, f_\beta\left(\omega^2 - \omega_0^2\right)} + \boldsymbol{S_\omega} \tag{2.13}$$

Verilen denklemlerde $\bar{V}$ ortalama hızı, μ dinamik viskoziteyi, σ_k ve σ_ω model katsayılarını, P_k ve P_ω üretim terimlerini, f_{β^*} serbest kayma modifikasyon faktörünü ifade etmektedir, β^* k-Omega model katsayılarını, f_β girdap gerdirme modifikasyon faktörünü, S_k ve S_ω kullanıcı tarafından belirlenen kaynak terimlerini ve son olarak k_0 ve ω_0 türbülans bozulmasına karşı koyan ortam türbülans değerlerini göstermektedir. *k-omega* türbülans modeli ile ilgili daha fazla bilgi (*Star CCM+ User Guide version 9.04.,* 2022)'de bulunabilir.

SST k-omega DES modelinde RANS ve DES yöntemleri beraber kullanılarak çözümleme yapılır. Burada yayılım oranı ω aşağıdaki formülle yeniden tanımlanır:

$$\tilde{\omega} = \omega\phi \tag{2.14}$$

Bu denklemde yer alan ϕ ifadesi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\phi = \max\left(\frac{l_t}{C_{DES}\Delta}\right) F, 1 \tag{2.15}$$

Bu denklemde;

$$l_t = \frac{\sqrt{k}}{\beta * \omega}$$

Δ: Hesaplanan bölgedeki hücrele merkezi ile komşu hücre merkezleri arasındaki uzaklık

$$F = 1 - F_2 \tag{2.16}$$

F_2: Karıştırma fonksiyonu (detaylar için bkz. *Star CCM+ User Guide version 9.04.*, 2022)

$$C_{DES} = C_{DES,k-\omega} F_1 + C_{DES,k-\varepsilon}(1 - F_1) \tag{2.17}$$

C_{DES}: DES Model katsayısı ($C_{DES,k-\omega} = 0.78$ ve $C_{DES,k-\varepsilon} = 0.61$) (*Star CCM+ User Guide version 9.04.*, 2022)

Hesaplama alanında, ağ yapısının hangi bölgesinde RANS ve DES modeli ile çözümleme yapıldığını anlayabilmek için 2.15 denklemi kullanılır. Buna göre $\phi = 1$ olduğu durumdaki bölgelerde RANS yöntemi işle çözüm yapıldığı anlaşılırken, $\phi > 1$ olduğu durumda LES yönteminin kullanıldığı belirlenmiş olur.

2.4 Kavitasyon Modeli

Star CCM+ ve benzeri HAD programlarında, kavitasyon modellemesi ile ilgili kısımda akış, su ve buhar olmak üzere iki farklı faz şeklinde tanımlanmaktadır. Su ve buharı yöneten denklemleri çözmek üzere "homojen olmayan" ve "homojen" yöntemler olarak adlandırılan iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır (Yin *vd.*, 2021).

Bu Tez çalışmasında kavitasyonlu akışı modellemek için homojen bir karışım içeren yöntem kullanılmıştır. Bu yaklaşım, çekirdek parçacıkların varlığına ve bunların daha sonra genişleyip daralarak kabarcıklar oluşturmasına

odaklanmaktadır. Her iki fazın da homojen şekilde tamamen karıştığını, aynı hızlarda hareket ettiğini, aynı basınca maruz kaldığını ve aynı sıcaklığa sahip olarak yerel termodinamik dengeyi koruduğunu varsayar (Usta ve Korkut, 2019). Bu nedenle, su ve buhar tek bir akışkan karışımı olarak ele alınır.

Kavitasyon oluşumu Schnerr-Sauer kavitasyon modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Bu modelde, kabarcıklar yuvarlak oluşumlar olarak ele alınmış ve simülasyonların başlangıcında başlangıç çekirdeklerinin akış bölgesinin tamamında aynı yarıçaplara sahip olarak değerlendirilmiştir.

Schnerr-Sauer modeli, kabarcıkların yuvarlak bir şekle sahip olduğu, gelişimlerinin temel olarak eylemsizlik kuvvetleri tarafından yönetildiği ve simülasyonların başlangıcında tüm başlangıç çekirdeklerinin aynı yarıçaplara sahip olduğu varsayımına dayanmaktadır. Schnerr-Sauer kavitasyon modelinde kabarcık yarıçapı (R_{bubble}) için matematiksel denklem aşağıdaki gibidir:

$$\boldsymbol{R_{bubble}} = \left(\frac{\boldsymbol{\alpha_v}}{\boldsymbol{1-\alpha_v}} \cdot \frac{\boldsymbol{3}}{\boldsymbol{4\,\pi}} \cdot \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{n_{bubble}}}\right)^{\boldsymbol{1/3}} \tag{2.18}$$

Eşitlik 2.18'de, α_v buhar hacim oranı ve n_{bubble} birim sıvı hacmi başına kabarcık sayısıdır (Usta ve Korkut, 2019).

2.5 Kaldırma, Direnç ve Basınç Katsayıları

Hidrofoil verimliliği, boyutsuz değerler olan kaldırma ve direnç katsayıları ile tanımlanır. Kaldırma katsayısı, akış hızı, kesit alanı ve yoğunluğa bölünen hidrofoil tarafından üretilen kaldırma kuvvetini tanımlar. Benzer şekilde, direnç katsayısı, akışkan tarafından hidrofoile uygulanan direnç kuvvetinin akış hızı, düzlemsel alan ve yoğunluğa bölünmesi anlamına gelir. Bu katsayılar araştırmacılar tarafından tasarım optimizasyonu, performans analizi ve hidrodinamik analizler için kullanılır. Hidrofoillerin kaldırma ve direnç katsayıları deneysel yöntemler (su tünelinde) veya simülasyonlar kullanılarak tahmin edilir. Bu değerler çeşitli hücum açılarına ve akış koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Kaldırma katsayısı, direnç katsayısı, basınç katsayısı ve Reynolds sayısı formülleri aşağıda verilmiştir.

$$\boldsymbol{C_D} = \frac{\boldsymbol{D}}{\boldsymbol{0.5\rho A(V)^2}} \tag{2.19}$$

$$C_L = \frac{L}{0.5\rho A(V)^2} \tag{2.20}$$

$$C_P = \frac{P-P_\infty}{0.5\rho(V)^2} = 1 - (\frac{V}{V_\infty})^2 \quad (2.21)$$

$$Re = \frac{V.c}{v} \quad (2.22)$$

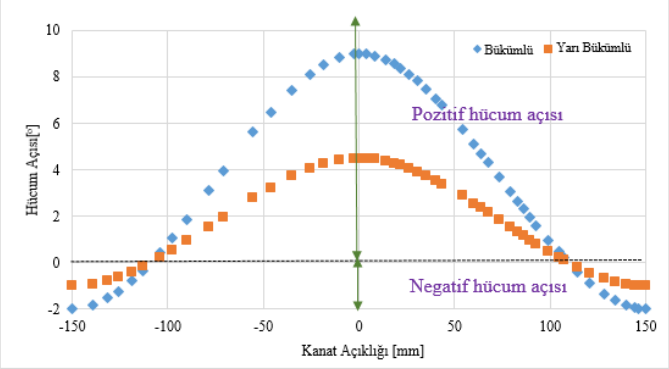
Bu denklemlerde C_D direnç katsayısını, D Newton (N) cinsinden direnç kuvvetini; ρ, V ve A sırasıyla akışkan yoğunluğunu $\frac{kg}{m^3}$, akış hızını ($\frac{m}{s}$) ve metrekare (m^2) cinsinden düzlemsel alanı temsil etmektedir. C_L kaldırma katsayısıdır, L ise kaldırma kuvvetini (Newton) temsil eder. P referans basıncı (Pa), P_∞ sıvı basıncı ve A ise yüzey alanıdır (m^2).

3

KAVİTASYONSUZ AKIŞ ANALİZLERİ VE SONUÇLARI

Bu bölümde, öncelikle literatürden seçilen kanat geometrisinin (Bükümlü NACA 0009 hidrofoili), validasyon (geçerleme) analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, seçilen bu hidrofoil ile kalınlık ve bükümlülük etkisi çalışmaları kapsamında incelenen toplamda 6 hidrofoilin farklı hücum açılarında HAD analizleri yer almaktadır.

Validasyon (geçerleme) çalışması kapsamında literatürdeki deneysel ve sayısal çalışmalar incelenerek Delft Twist-11 hidrofoili kullanılmıştır. Bu model, çalışma boyunca Bükümlü NACA 0009 hidrofoili olarak isimlendirilmiştir. Bu çalışmada kavitasyonsuz akış koşulları için validasyon çalışmasını basınç katsayısı ve kaldırma katsayısı verileri ile doğrulayarak deneysel sonuçlar (Foeth, 2008a) ve sayısal çalışma sonuçları (Melissaris *vd.*, 2019) kıyaslama için kullanılmıştır. Öncelikle NACA 0009 kesitine ve -2 derece hücum açısına sahip Delft Twist-11 olarak adlandırılan kanat modeli, tavsiye edilen ve literatürde daha önce de kullanılmış olan hesaplama alanı boyutları kullanılarak modellenmiştir (Melissaris *vd.*, 2019). Hidrofoile ait kanat açıklığı boyunca hücum açısı dağılımı Bükümlü ve Yarı Bükümlü geometriler için Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Bükümlü ve yarı bükümlü hidrofoiller için kanat açıklığı boyunca hücum açısı dağılımı

Kanada ait bükümlülüğün fonksiyonu Hoekstra *vd.*, (2011) tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir;

$$\boldsymbol{\alpha(y) = \alpha_{max}[2(|y-1|)^3 - 3(|y-1|)^2 + 1]} \quad (3.1)$$

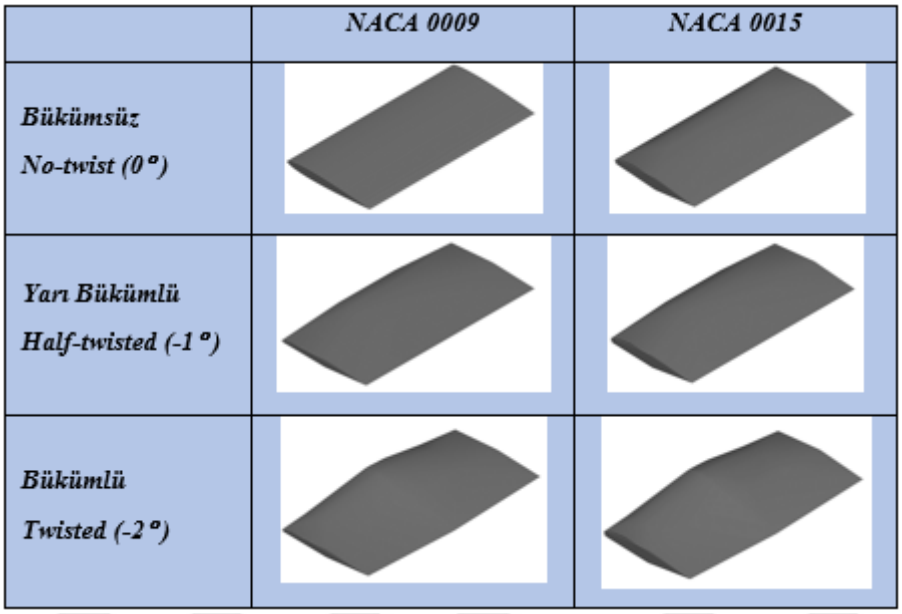
Burada α değeri kanat açıklığı boyunca değişen hücum açısını ifade etmekte olup maksimum 11 dereceye (uç kenarlar 0 derece olması durumunda) denk gelmektedir. y ise Şekil 3.6'da gösterildiği üzere kanat açıklığı yönündeki ekseni ifade etmektedir. (Hücum açısı 0 derece iken bükümlü hidrofoilde kanat ortasındaki açı 11 derece, yarı bükümlüde ise 5.5 derecedir). Buna göre, bükümlü hidrofoilde analizler -2 derece hücum açısında gerçekleştirildiğinde kanadın orta kesitindeki hücum açısı 9 derece, yarı bükümlü hidrofoilde ise -1 derece hücum açısında kanadın orta kesitindeki hücum açısı 4.5 derece olmaktadır.

Simetrik kanat modeli kullanıldığından hesaplama zamanı ve gerekli işlemci kapasitesi göz önüne alınarak hesaplama alanı, modelin yarısını kapsayacak şekilde modellenmiştir. Farklı ağ yapısı yoğunlukları ile modellemeler yapılarak deneysel değerlere en yakın basınç katsayısı ve kaldırma kuvveti değerleri elde edilmeye çalışılmıştır.

3.1 Hesaplama modeli

Bu bölümde, NACA 0009 ve NACA 0015 kesitli yarı bükümlü (half-twisted), bükümlü (twisted) ve bükümsüz (no-twisted) 3 boyutlu hidrofoillerin (Şekil 3.2) kavitasyonsuz akıştaki hidrodinamik performanslarını incelemede kullanılan hesaplama modeline ait detaylar sunulmuştur. Tüm hidrofoillerin kanat açıklığı b=0.30 m, açıklık oranı 2, kord uzunluğu c=0.15 m'dir. Bükümlü ve yarı bükümlü hidrofoiller için uç kısımdaki geometrik hücum açıları sırasıyla -2° ve -1°'dir (Şekil 3.1). Kanat isimlerindeki ilk iki rakamdan anlaşılacağı üzere hem NACA 0009 hem de NACA 0015 hidrofoilleri simetriktir ve kamburluğu yoktur, son iki rakam ise kordun yüzdesine bağlı olarak kanadın maksimum kalınlığını göstermektedir (Jacobs ve Edwards Ward, 1933). NACA geometrilerine ait diğer geometrik

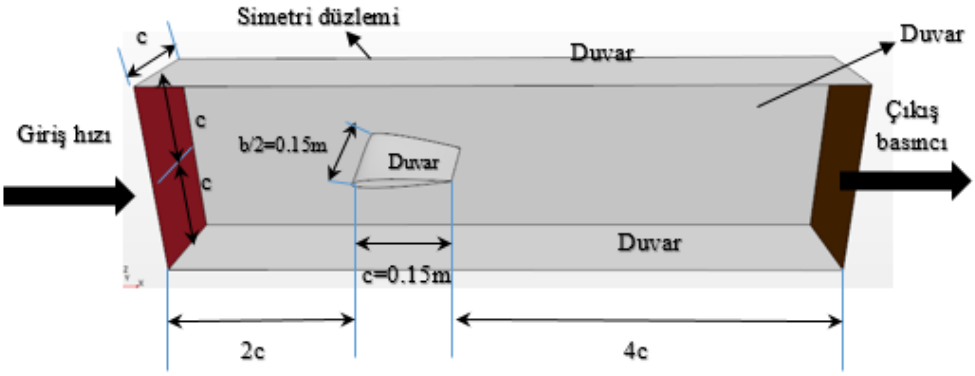
detaylar Abbott, *vd*., (1945)'de bulunabilir. Her iki kanat da türbin kanatları (Bangga *vd.*, 2017); (Cheng *vd.*, 2020), uçak kanatları (Obeid *vd*., 2017) ve dümenler (Liu *vd.*, 2017) gibi pek aerodinamik ve hidrodinamik uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.2 NACA 0009 (orta sütun) ve NACA 0015 (sağ sütun) kesitli bükümsüz, yarı bükümlü ve bükümlü 3 boyutlu hidrofoiller.

Hidrofoilin ve hesaplama alanının üç boyutlu bir çizimi Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Hidrofoil, deney koşullarında olduğu gibi hesaplama alanına duvardan duvara olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu durumda kavitasyonlu akış durumunda (Bölüm 4) akım bölgesinde uç girdap oluşmamaktadır. Alanın girişi ile hidrofoilin ön kenarı arasındaki mesafe 2c olarak alınırken, hidrofoilin arka ucu ile çıkış arasındaki mesafe 4c olarak tutulmuştur, burada c hidrofoilin kord uzunluğudur. Hidrofoil, alanın alt ve üst duvarlarından bir kord mesafesi kadar uzağa yerleştirilmiştir. Hesaplama alanının sol ve sağ tarafları sırasıyla hız girişi ve basınç çıkışı olarak belirlenirken; alt, üst ve yanlar kayma duvar sınır koşulu (slip-wall) ile tanımlanmıştır. Hidrofoil ise kaymaz duvar koşulu olarak ayarlanmıştır. Hesaplama maliyetini, yani ağ elemanlarının sayısını ve simülasyon süresini azaltmak amacıyla hidrofoile ve hesaplama alanına simetri sınır koşulu

uygulanmıştır. Simetri düzlemi sınır koşulu, kanadın maksimum hücum açısına ulaştığı orta kesite (y/b=0.5) uygulanmıştır. Hesaplama modelinde dikkate alınan akış koşulları Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Hesaplama alanı ve tanımlanan sınır koşulları.

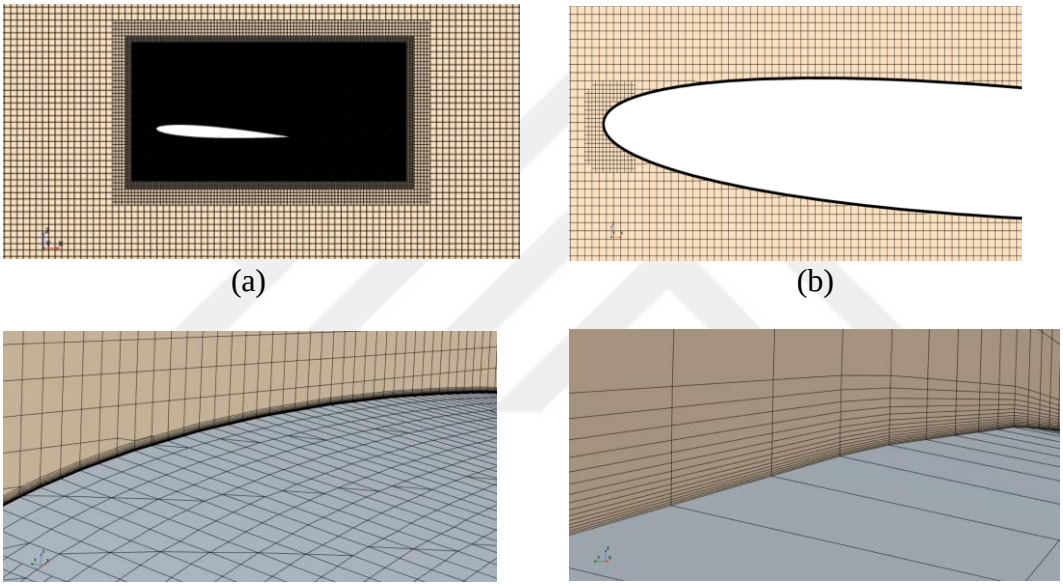
Tablo 3.1 Modellemede kullanılan kavitasyonsuz akış koşulları

Çıkış basıncı (kPa)	Buhar yoğunluğu (kg/m^3)	Akış hızı (m/s)	Reynolds Sayısı	Buharlaşma basıncı (kPa)	Su yoğunluğu (kg/m^3)	Kavitasyon sayısı
97	-	6.75	1.14×10^6	-	998	-

Hidrofoili kapsayan hesaplama alanı, ağ örgüsü adı verilen küçük hacimlere bölünmüştür. Wu *vd.*, (2016) tarafından belirtildiği gibi, ağ örgüsü çözünürlüğünün kalitesi ve hassasiyeti, özellikle 3 boyutlu hidrofoiller üzerindeki akışın doğru modellenebilmesi için çok önemlidir. Ağ örgüsünün temel boyutu 0.015 m alınmış olup minimum yüzey boyutu 3×10^{-6} m'dir. Kanat yüzeyinin etrafında temel boyutun %2'si olacak şekilde çok küçük ağ hücreleri oluşturulmuştur. Sınır tabaka kalınlığı 2.5×10^{-4} m olan hidrofoil yüzeyinin etrafında 15 katmandan oluşan bir prizma tabakası kullanılmıştır. y^+ olarak bilinen, duvardan ilk ağ örgüsü hücresine olan boyutsuz mesafe yaklaşık 0.5'tir.

Mevcut çalışma için kullanılan ağın yeterince sık olduğundan ve elde edilen bulguların ağ elemanlarının sayısından etkilenmediğinden emin olmak için bir ağ

örgüsü iyileştirme çalışması yapılmıştır. Analizlerde Delft Twist-11 hidrofoili, giriş hızı V = 6.75 m/s, çıkış basıncı 97 kPa ve uç kısımlarda hücum açısı -2° olacak şekilde kullanılmıştır. Bu amaçla, sırasıyla yaklaşık 1.2 milyon, 2.0 milyon, 4.5 milyon ve 10.5 milyon ağ elemanlarına sahip kaba, orta, ince ve daha ince olmak üzere dört farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Tanarro *vd.*, (2020) göre, duvara yakın bölgelerdeki değişimleri etkili bir şekilde çözebilmek için yüksek çözünürlük gerektiğinden, ağ yoğunluğu Şekil 3.4'te gösterildiği gibi hidrofoile doğru kademeli olarak artırılmıştır. Ağ yoğunluğunun sonuçları nasıl etkilediğini gösteren ağ örgüsü bağımsızlığı çalışması gerçekleştirilmiş ve sonuçlar aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.



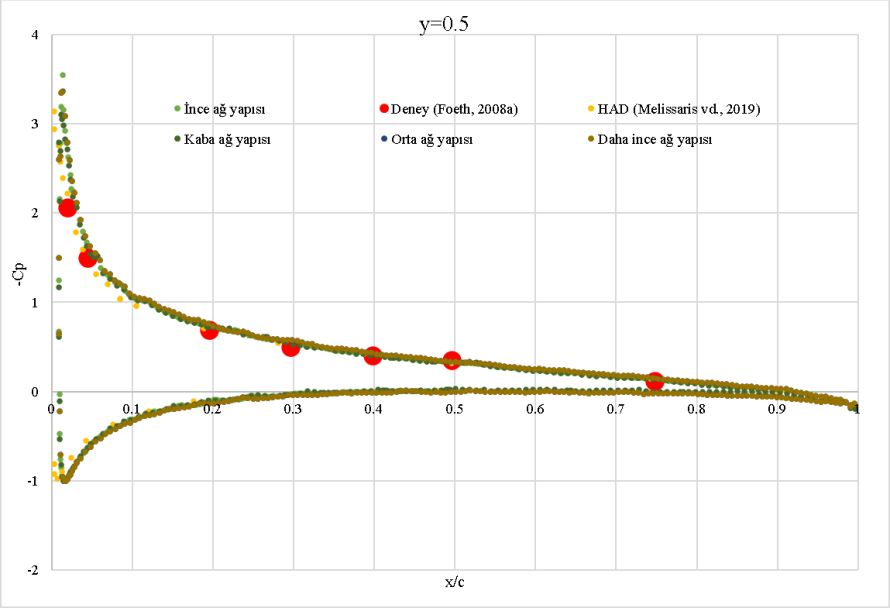
Şekil 3.4 Ağ yapısının hidrofoil çevresi (a) , (b) hidrofoil yüzeyi, (c) hidrofoil yüzeyi ve sınır tabaka ve (d) sınır tabaka prizma ağı etrafında değişimi

Tablo 3.2'de her bir ağ yapısı için hesaplanan kaldırma kuvveti değerleri, Foeth'in (2008a) kendi tez çalışması kapsamında gerçekleştirdiği deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Görüldüğü gibi, kaba ve orta ağ yapılarında elde edilen kaldırma kuvveti, deneysel olarak ölçülen kaldırma kuvvetinden fazla olarak bulunmuştur. İnce ağ en düşük hataya sahip olduğundan, akış modellemesinde ince ağ kullanılarak hesaplamalara devam edilmiştir. Daha fazla ağ hücresi eklenerek hata azaltılamamıştır.

Tablo 3.2 Farklı ağ yapılarında elde edilen kaldırma kuvvetleri

Yöntem	Ağ elemanı sayısı	Kaldırma kuvveti (N)	Hata (%)
Deney (Foeth, 2008a)	-	455	-
Sayısal, kaba ağ yapısı	1163763	510	12.0
Sayısal, orta ağ yapısı	2000496	487	7.0
Sayısal, ince ağ yapısı	4545210	453	0.4
Sayısal, daha ince ağ yapısı	10585071	446	1.9

Şekil 3.5, farklı ağ yapılarında, hidrofoilin orta kısmı üzerindeki boyutsuz basınç katsayısı ($-C_P$) dağılımını göstermektedir. Kaba ve orta ağlar, literatürde deneysel ve sayısal analizlerde elde edilen basınç katsayılarıyla oldukça uyumlu değerler vermesine rağmen, ince ağ deneysel verilere en yakın olanıdır.



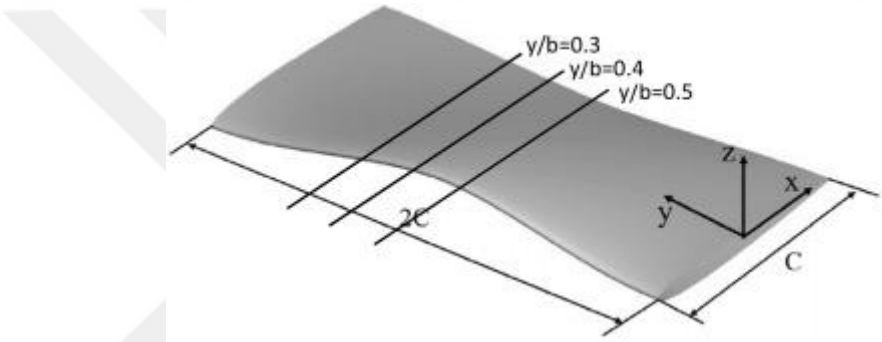
Şekil 3.5 Farklı ağ yapılarına ait basınç katsayısının kanat ortasındaki (y/b=0.5'de) dağılımı

Çalışmada analizler zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilmiş olup, akışkan olarak 997.561 kg/m^3 yoğunluğa sahip su kullanılmıştır. Çıkış basıncı 97 kPa olarak belirlenmiştir. Serbest akış hızı (V) ve kord uzunluğuna (c) bağlı Reynolds sayısı

(Re) 1.14×10^6 olarak hesaplanmıştır. Türbülans ve momentum denklemleri, ikinci dereceden upwind şeması ile ayrıklaştırılmış, gradyan basınç terimleri ise Gauss-LSQ hücre tabanlı şema ile çözümlenmiştir. Basınç-hız bağlantısını sağlamak için kullanılan Basınç Bağlantılı Denklemler için Yarı Örtük Yöntem (SIMPLE) algoritması kullanılmıştır. Simülasyonlar, ticari bir yazılım olan StarCCM+ kullanılarak 32 GB RAM ve 6 CPU'lu bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

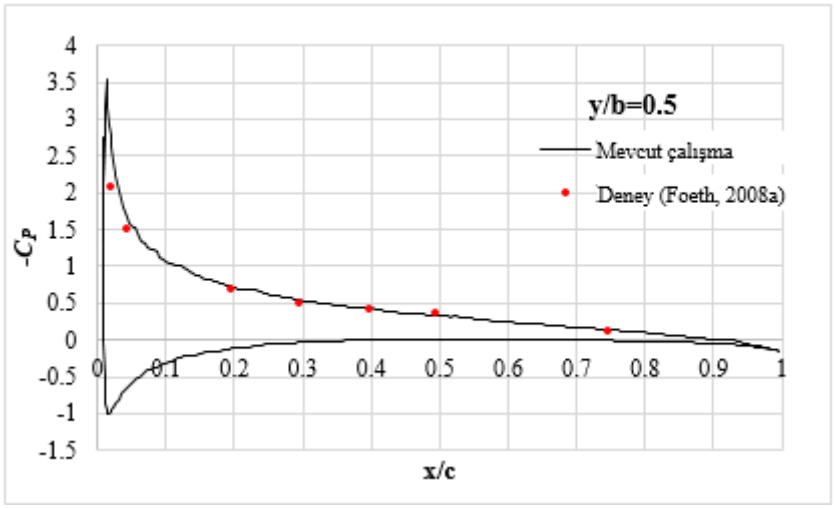
3.2 Validasyon (Geçerleme) ve Belirsizlik analizi

Validasyon çalışmaları, geometrisi ve deneysel verileri açık literatürde mevcut olduğu için yaygın olarak karşılaştırma modeli olarak kullanılan Delft Twist-11 hidrofoili ile gerçekleştirilmiştir.

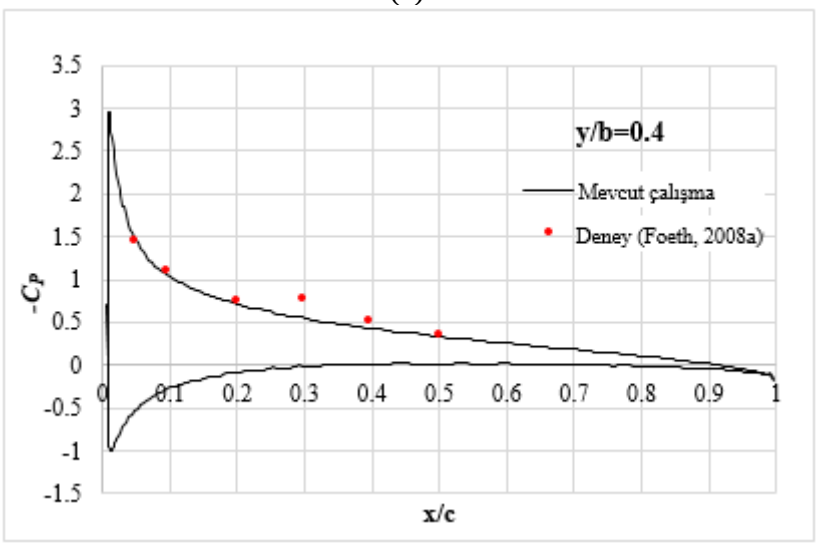


Şekil 3.6 Validasyonlar için kullanılan Delft Twist-11 hidrofoilinin 3 boyutlu görünümü

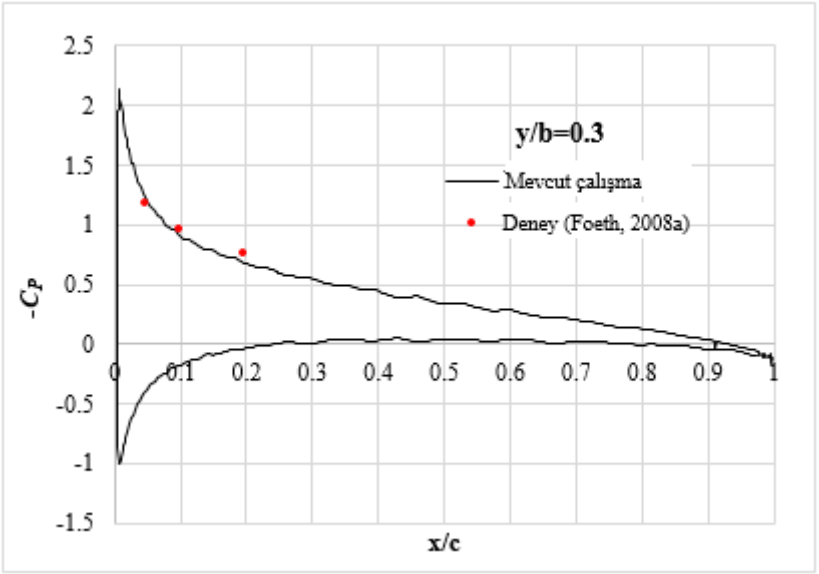
Delft Twist-11, bükümlü geometri için kanat açıklığı boyunca değişen hücum açılarına sahip NACA 0009 kanat kesitlerinden oluşmaktadır. Bu, dikdörtgen planformuna sahip bir kanattır ve kesiti tüm kanat açıklığı boyunca (c=0.15 m ve b=0.3 m) sabittir (Hoekstra vd., 2011). Hücum açısı kanadın her iki ucunda 0° iken, orta kesitte 11°'dir (Yin *vd.,* 2018). Bu çalışmada, hücum açısı uç kısımlarda -2°'dir, dolayısıyla kanadın uç kısımdan orta kısma doğru -2 ila 9° arasında değişmektedir. Doğrulama amacıyla, Şekil 3.6'de gösterildiği gibi hidrofoil üzerinde belirlenen üç kesit (y/b = 0.3, 0.4 ve 0.5) dikkate alınmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.7 Delft Twist-11'e ait negatif basınç katsayısı dağılımlarının a) y/b=0.5, b) y/b=0.4 ve c) y/b=0.3 kesitlerindeki deneysel verilerle karşılaştırılması.

Mevcut çalışmanın validasyonu, aşağıdaki tabloda sunulmuş olan deneysel verilerle yapılmıştır (E.-J. Foeth, 2008a). -2° hücum açısı için serbest akış hızı ve çıkış basıncı sırasıyla 6,75 m/s ve 97 kPa olarak belirlenmiştir. Karşılaştırmalar Delft Üniversitesi Kavitasyon Tünelinde gerçekleştirilen deneylere uygun olarak tamamen kavitasyonsuz akış koşulları için yapılmıştır. Şekil 3.6'de gösterildiği gibi üç farklı kesit için (y/b = 0.3, 0.4 ve 0.5) basınç katsayılarının dağılımını Şekil 3.7'de göstermektedir. Şekil 3.7'de gösterilen karşılaştırmalar, Delft Üniversitesi'nin deneysel verileri ile mevcut CFD araştırmalarının sonuçları arasında iyi bir uyum olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.3 Kaldırma ve direnç katsayılarının mevcut sayısal ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

	Yöntem	C_d (-)	C_l (-)	F_L (N)
Sayısal, (AOA=-2°, V=6.97 m/s), (Hoekstra vd., 2011)	DES RANS	0.0151	0.4268	-
Sayısal, (AOA=-2°, V=6.75 m/s), (Koop, 2008)		0.0083	0.445	-
Sayısal, (AOA=-2°, V=6.97 m/s), (Whitworth, 2011)	RANS	0.0132	0.4367	476
Sayısal, (AOA=-2°, V=6.75 m/s), (Asnaghi vd., 2018)	LES	0.0120-0.0140	0.453-0.455	-
Sayısal, (AOA=-2°, V=6.75 m/s), (Vaz vd., 2017)	RANS DDES	0.0143-0.0146	0.425-0.428	-
Deney, (AOA=-2°, V=6.75 m/s), (Foeth, 2008b)		-	0.46	455
Mevcut çalışma, (AOA=-2°, V=6.75 m/s)		0.0130	0.4364	453

Deney, (AOA=-1°, V=6.67 m/s), (Foeth, 2008b)		-	0.61	606
Mevcut çalışma, (AOA=-1°, V=6.70 m/s)		0.0132	0.546	570
Deney, (AOA=-3°, V=6.72 m/s), (Foeth, 2008b)		-	0.35	353
Mevcut çalışma, (AOA=-3°, V=6.72 m/s)		0.0122	0.32	322

Analizlerden elde edilen kaldırma kuvveti, kaldırma katsayısı ve direnç katsayısı değerleri literatürdeki sayısal ve deneysel çalışmalara ait sonuçlarla kıyaslanmıştır (Tablo 3.3).

3.2.1 Belirsizlik Analizi

Belirsizlik analizleri, sayısal çalışmaların doğrulanması ve geçerliliği için gereklidir. Bu nedenle, ağ hücre yoğunluğuna bağlı olarak aşağıdaki Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI) yöntemi ile bir ağ yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir (Tablo 3.4). Literatürde önerildiği gibi (Tezdogan *vd.*, 2015) ağ hücreleri taban boyutunun $\sqrt{2}$ oranında artırılmasıyla üç farklı ağ yapısı elde edilmiştir. GCI hata değerlendirmesi için en az iki ağ çözünürlüğü gerekli olmasına rağmen (Roache, 1998), bu araştırma için kaba, orta ve ince ağlar dikkate alınmıştır, çünkü daha önce de belirtildiği gibi, daha ince ağ yapısında hata oranı artmaya başladığından daha iyi sonuç vermemiştir.

Tablo 3.4 Üç farklı ağ konfigürasyonu için sayısal detaylar ve sonuçlar.

		Ağ hücresi sayısı	Kaldırma kuvveti (N)	Hata	ϕ (Kaldırma katsayısı)	Temel boyut(m)
	Deney	-	455	-		
h_1	Kaba	1163763	510	0.120879	0.45	0.029
h_2	Orta	2000496	487	0.07033	0.49	0.021

h_3	İyi	4545210	453	0.004396	0.43	0.015

Ağ konfigürasyonları $h_1<h_2<h_3$ koşulunu sağlayacak şekilde tasarlanmıştır ve hesaplamalarda istenen r değeri 1.3'ten büyük olacak şekilde ayarlanmıştır,

$$r_{21} = h_2/h_1 \tag{3.2}$$

$$\boldsymbol{r_{32} = h_3/h_2} \tag{3.3}$$

3.3 numaralı denklem kullanılarak,

$$p = 1/(ln(r_{21}))|ln|\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}| + q(p)| \tag{3.4}$$

$$q(p) = ln\left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s}\right) \tag{3.5}$$

$$s = 1 * sgn(\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}) \tag{3.6}$$

$$\varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2 \tag{3.7}$$

$$\varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1 \tag{3.8}$$

ϕ değeri her bir ağ konfigürasyonunda hesaplanan belirli bir değer olmalıdır. (3.4-3.8) denklemlerindeki değerleri hesaplamak için ϕ değeri olarak kaldırma katsayısı seçilmiştir. Verilen ekstrapolasyon denklemleri takip edilerek (3.9-3.11 denklemleri),

$$\phi_{ext}^{21} = \frac{(r_{21}^p \phi_1 - \phi_2)}{(r_{21}^p - 1)} \tag{3.9}$$

$$e_a^{21} = \left|\frac{(\phi_1 - \phi_2)}{\phi 1}\right| \tag{3.10}$$

$$GCI_{21} = 1.25 * e_a^{21}(r_{21}^p - 1) \tag{3.11}$$

Ağ yoğunluğundan kaynaklanan GCI değeri, kaldırma katsayısı için %1.99 olarak hesaplanmıştır.

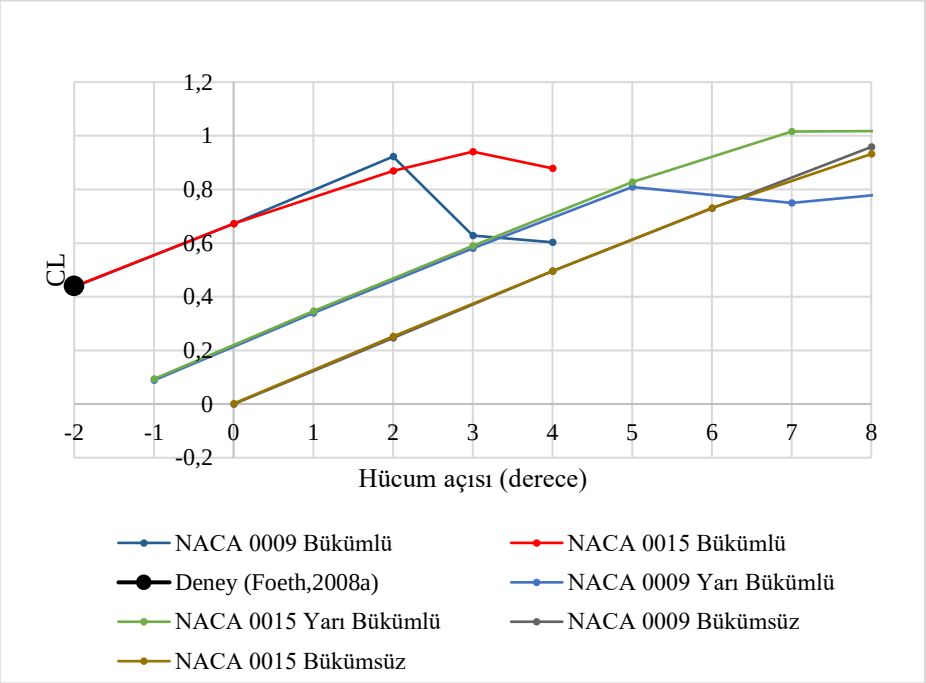
3.3 Farklı Hidrofoil Geometrilerinin HAD Analizlerinin Sonuçları

Bir önceki bölümde sunulan basınç, direnç ve kaldırma katsayıları ile kaldırma kuvvetlerinin açık literatürdeki verilerle karşılaştırılarak doğrulanmasının ardından, bu bölümde büküm ve kalınlık değişimlerinin kavitasyonsuz 3B hidrofoillerin performans özellikleri üzerindeki etkisi incelenmektedir. Bükümlü, yarı bükümlü ve bükümsüz hidrofoiller de dahil olmak üzere çeşitli hidrofoillerin hangi hücum açısında en iyi performansı göstereceği araştırılmıştır. NACA 0009 ve NACA 0015 kanat kesitlerine sahip bu geometriler için basınç, direnç ve kaldırma katsayıları iki farklı Reynolds sayısı ve -2° ila 8° arasında değişen hücum açıları için karşılaştırılmıştır. Bükülmenin etkileri, hidrofoillerin bükümlü ve bükümsüz durumlarının bulguları karşılaştırılarak gösterilmiş ve Reynolds sayılarının etkileri hidrofoillerin bükümlü durumu için incelenmiştir. Bükümlü ve yarı bükümlü hidrofoiller için kanat açıklığı boyunca değişen hücum açısı dağılımı Şekil 3.6 'da gösterilmektedir. Yarı bükümlü hidrofoil, bükümlü hidrofoile ait açı dağılımının yarısı alınarak oluşturulmuştur. Bükümlü hidrofoilin hücum açısı dağılımı ise Delft Twist-11 hidrofoiline aittir.

3.3.1 Kanat kalınlığı ve bükümlülük etkileri

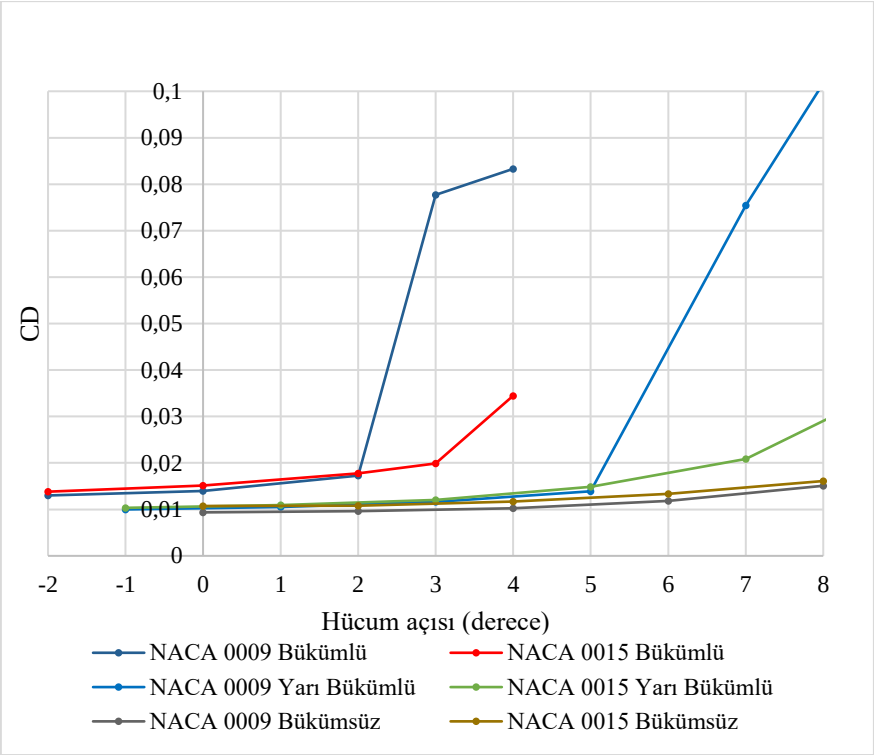
Aşağıdaki grafiklerde (Şekil 3.8, Şekil 3.9,Şekil 3.10) NACA 0009 ve NACA 0015 kesitli bükümsüz, yarı bükümlü ve bükümlü hidrofoillerin hidrodinamik verimlilik olarak adlandırılan direnç, kaldırma ve kaldırma-direnç katsayılarının oranı farklı hücum açıları (AoA) için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Hücum açısı kanatların uç kısımlarına göre tanımlanmıştır. Maksimum hücum açısı, tüm hidrofoillere ait kaldırma katsayısını yaklaşık olarak bir olarak elde edecek şekilde belirlenmiştir. Şekil 3.8'de her üç bükümlülüğe sahip ince ve kalın kesitli hidrofoillerin hücum açısıyla değişen kaldırma katsayısı dağılımlarını göstermektedir. Grafiğe bakıldığında, kaldırma katsayılarının hücum açısı ile neredeyse doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Bükümlü hidrofoiller, yarı bükümlü ve bükümsüz hidrofoillere göre maksimum kaldırma kuvveti üretmektedir. Bükümdeki artış, küçük hücum açılarında bile kaldırma kuvvetinde kayda değer bir artışa neden olmaktadır. Örneğin, kaldırma katsayısı C_L = 0.4 değeri bükümlü hidrofoil tarafından -2° hücum açısında sağlanabilirken, yarı

bükümlü hidrofoilde 1.8° hücum açısında, bükümsüz hidrofoilde ise 3.6° hücum açısında sağlanabilmektedir.



Şekil 3.8 Farklı hücum açıları için kaldırma katsayısı dağılımları, V=6.75 m/s.

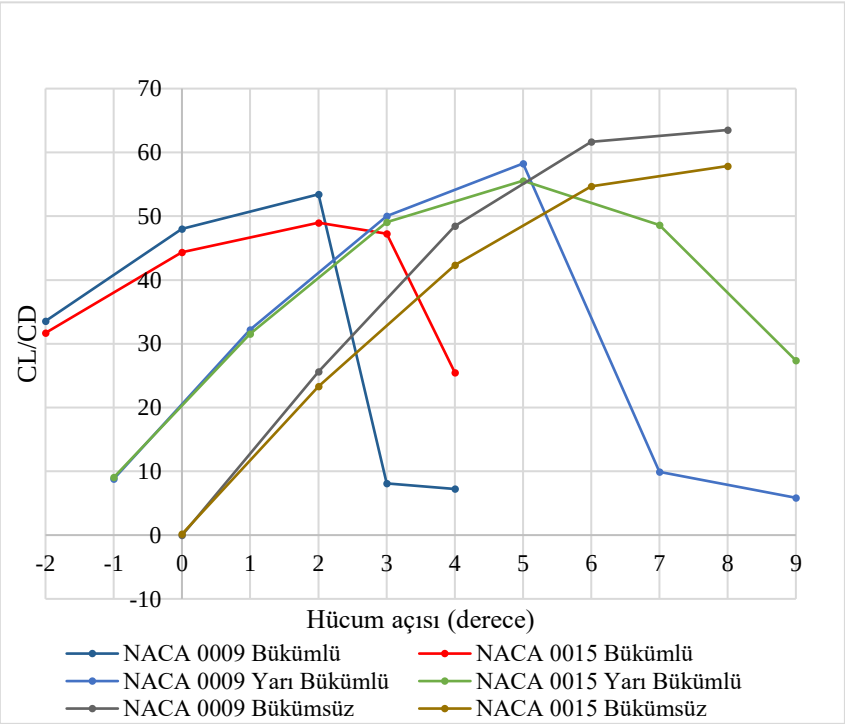
Direnç katsayısı dağılımları Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Kaldırma katsayılarındaki değişimler gibi direnç katsayıları da genel olarak hücum açısı ile artmaktadır, ancak bu değişim kaldırma katsayılarında gözlemlendiği gibi dik bir şekilde olmayıp hücum açısıyla birlikte yavaş ama istikrarlı bir şekilde olmaktadır. Geometrik değişimin direnç katsayısı üzerindeki etkisi, hem bükümlü NACA 0009 hem de NACA 0015'in herhangi bir hücum açısında (AoA) en yüksek direnç katsayısına neden olduğu tüm durumlar için oldukça belirgindir. Büküm yarıya düştükçe her iki konfigürasyonun da direnç katsayıları önemli ölçüde azalmaktadır. Kaldırma katsayısına benzer şekilde, bükümsüz hidrofoiller, özellikle AoA>2° olduğu durumda, en düşük direnç katsayısını verir. Farklı kalınlıkları nedeniyle, NACA 0009 ve NACA 0015 hidrofoilleri farklı direnç katsayılarına sahiptir.



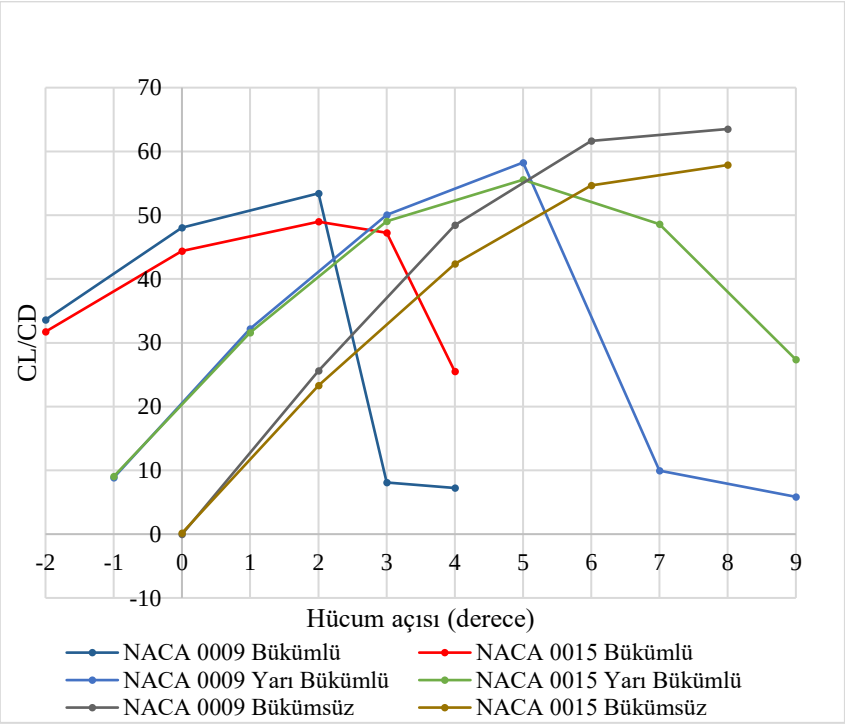
Şekil 3.9 Farklı hücum açıları için direnç katsayısı dağılımları, V=6.75 m/s.

Kaldırma veya direnç katsayısı tek başına bir hidrofoilin ne kadar iyi performans sağlayacağını doğru bir şekilde tahmin edemeyeceğinden, her bir hidrofoil için kaldırma-direnç katsayısı oranı Şekil 3.10'da verilmiştir. Grafikler, her üç durumda da (bükümlü, yarı bükümlü ve bükümsüz), NACA 0009 hidrofoilinin NACA 0015 hidrofoillerden daha iyi performans gösterdiğini ve verimin de hücum açısıyla arttığını göstermektedir. -2°<AoA<2° hücum açısı aralığında, bükümlü NACA 0009 maksimum verimliliği sağlamaktadır. Bununla birlikte, hücum açısı arttıkça, hem yarı bükümlü NACA 0009 hem de NACA 0015, AoA = 5°'ye kadar maksimum verim sağlar. Bu hidrofoillerin verimlilikleri daha yüksek açılarda (AoA>6°) düşmeye başlarken, bükümsüz hidrofoiller daha verimli hale

gelmektedir. Şekil 3.8 incelendiğinde,

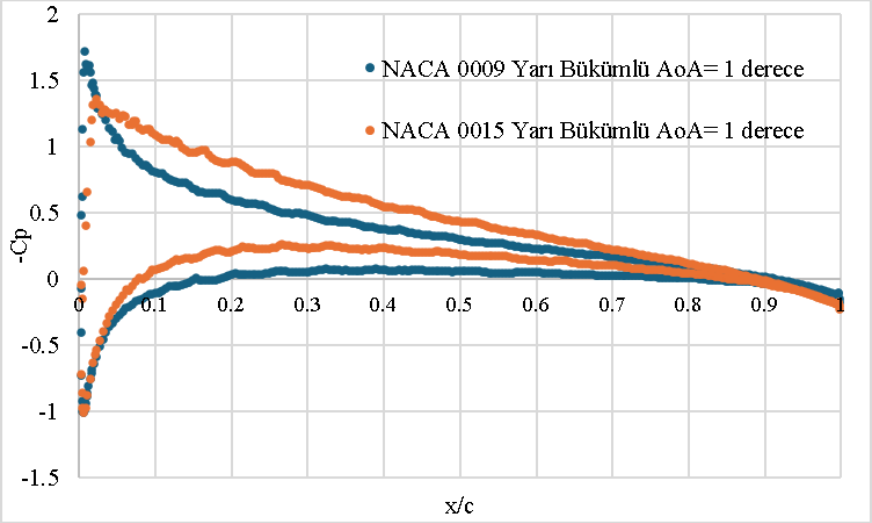


Şekil 3.10' da, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi kavitasyonsuz akış hesaplamalarından belirlenen herhangi bir sabit kaldırma katsayısı değeri için, bükümsüz hidrofoillerin en iyi hidrodinamik performansa sahip olduğu görülmektedir.

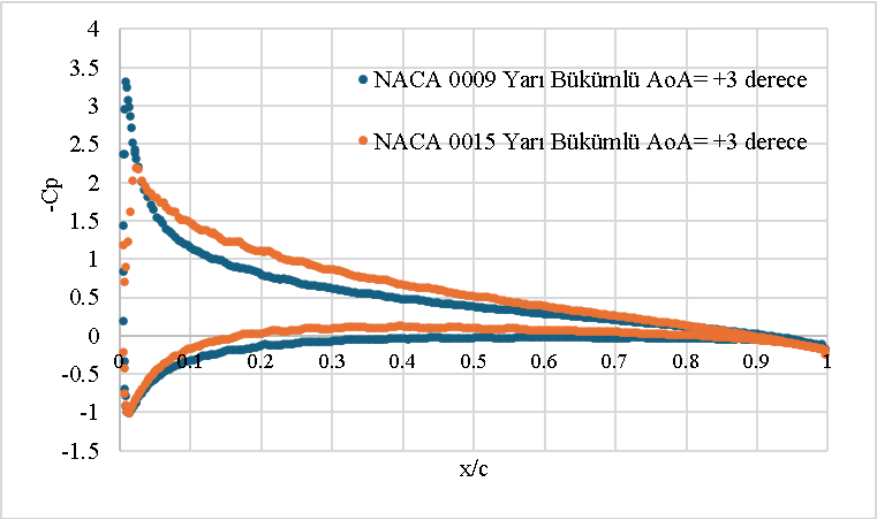


Şekil 3.10 Farklı geometrik konfigürasyonlar için kaldırma-direnç katsayılarının karşılaştırılması, V=6.75 m/s.

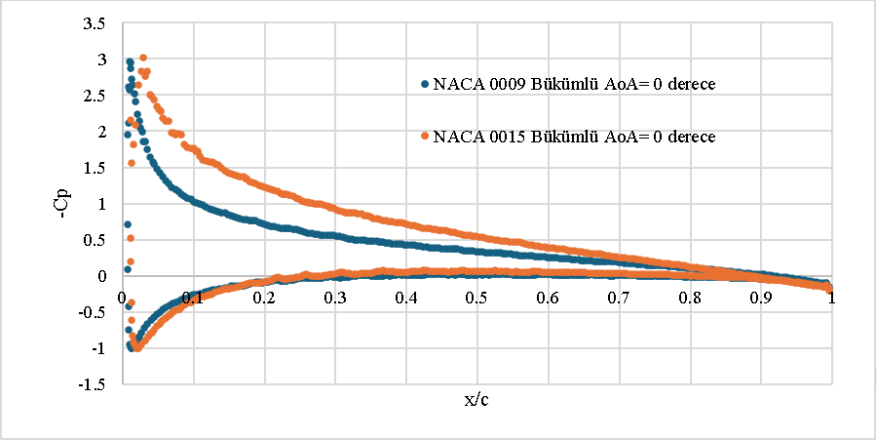
Bükümün direnç ve kaldırma katsayıları üzerindeki etkileri daha önce gösterilmiş olsa da, Şekil 3.11 büküm derecesinin farklı hücum açılarında NACA 0009 ve NACA 0015 hidrofoilleri için basınç katsayısı dağılımları üzerindeki etkisini göstermektedir. y/b = 0.4 kesiti için verilen grafikler, bükümlü NACA 0009 hidrofoilinde maksimum negatif basınçların emme tarafının ön kenarı yakınında AoA=0° için 2.94 ve AoA=2° için 7.91 olarak elde edildiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bükümlü ve yarı bükümlü NACA 0015 hidrofoilleri, akışkan hidrofoilin arka kenarına doğru akarken, her iki hücum açısı için emme tarafında NACA 0009'dan daha yüksek basınç katsayısı ($-C_p$) vermektedir. İncelenen tüm durumlarda, hücum açısının 2°'lik açı artışının, özellikle ön kenara doğru daha yüksek negatif basınç değerlerine yol açtığı görülmektedir.



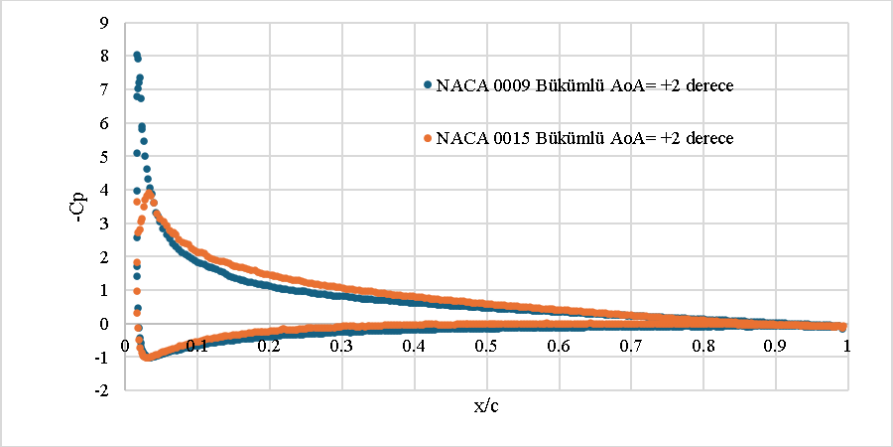
(a)


NACA 0009 Yarı Bükümlü AoA= +3 derece
NACA 0015 Yarı Bükümlü AoA= +3 derece
-Cp
x/c

(b)


NACA 0009 Bükümlü AoA= 0 derece
NACA 0015 Bükümlü AoA= 0 derece
-Cp
x/c

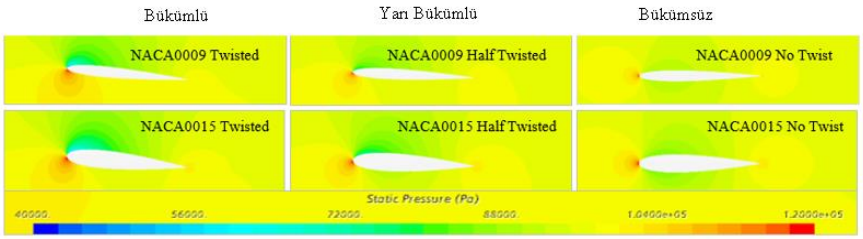
(c)


NACA 0009 Bükümlü AoA= +2 derece
NACA 0015 Bükümlü AoA= +2 derece
-Cp
x/c

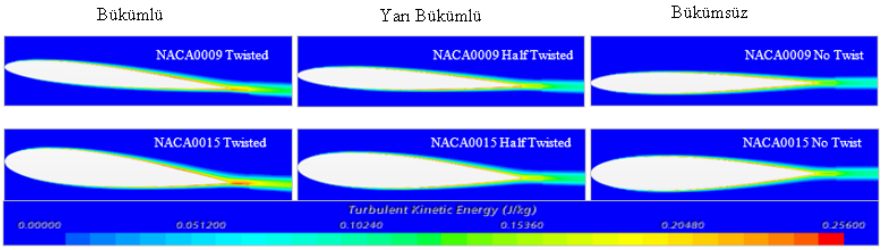
(d)

Şekil 3.11 Farklı kalınlıktaki hidrofoillerin yarı bükümlülerde a) AoA=1° b) AoA=3° ve bükümlülerde c) AoA=0° ve d) AoA=2° hücum açılarında meydana gelen basınç katsayısı dağılımları (y/b=0.4 kesitinde)

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13, AoA=0°'de farklı kalınlıklara sahip bükümsüz, yarı bükümlü ve bükümlü hidrofoillerin orta kesitinde (y/b=0.5'te) statik basınç ve türbülanslı kinetik enerji dağılımları gösterilmektedir. Bükümlü NACA 0009 ve Bükümlü NACA 0015, Şekil 3.11'de y/b = 0.4 için sunulan basınç katsayısı dağılım eğrilerine benzer şekilde en düşük basıncı göstermektedir. Bu sonuçlar kesitin giriş kenarına doğru gözlemlenmektedir. Hidrofoil kalınlığı ön (giriş) kenara yaklaştıkça hidrofoilin emme tarafında daha düşük statik basınç değerleri görülür; ancak, bir önceki şekilde gösterildiği gibi, ön kenarın dışında hafif bir basınç artışı açıkça görülebilir.



Şekil 3.12 V=6.75 akış hızı için orta kesitte (y/b=0.5) ve AoA=0° hücum açısı değerinde statik basınç dağılımının kontur grafikleri



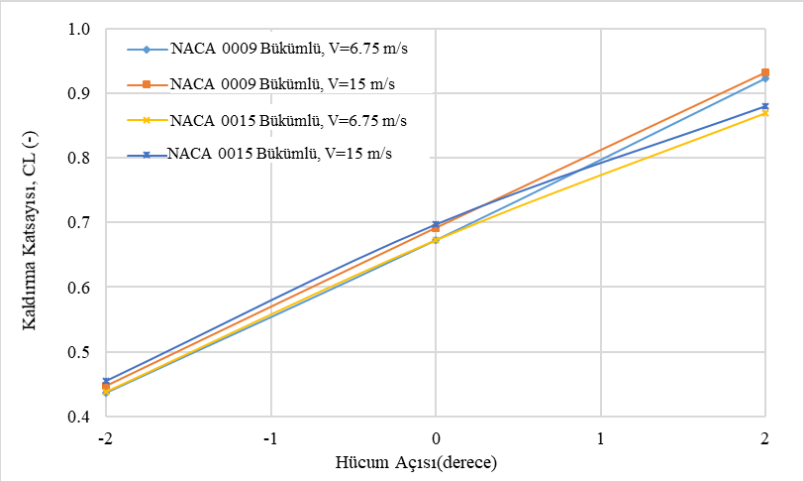
Şekil 3.13 AoA=0°, V=6.75 m/s için y/b=0.5'de (orta kesitte) türbülanslı kinetik enerji dağılımının kontur grafikleri

Şekil 3.13'de, NACA 0015 kesitli daha kalın olan bükümlü hidrofoilin, arka kenarın yakınında ve arkasında en yüksek türbülanslı kinetik enerji seviyelerinin oluştuğu gözlemlenebilir. Aynı bölgelerdeki türbülanslı kinetik enerji miktarı büküm ve kesit kalınlığı arttıkça azalmaktadır. Bu durum, direnç katsayılarının

Şekil 3.9'da nasıl ifade edildiği ile uyumludur. Yani, türbülansın kinetik enerjisi yüksek olduğunda, sınır tabakada türbülanslı akış üretmek için daha fazla enerji gerekir ve bu da direnci artırır.

3.3.2 Üç boyutlu bükümlü hidrofoiller için akış hızı ve kalınlık etkileri

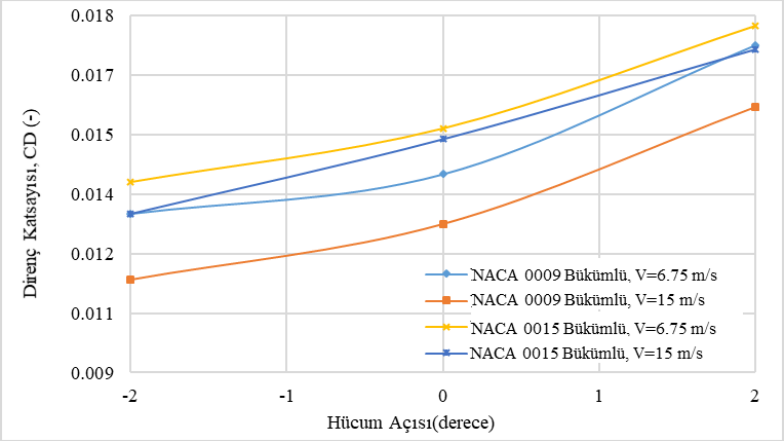
Bükümlü NACA 0009 ve bükümlü NACA 0015 hidrofoillerinin, farklı akış hızı (Reynolds sayısı) ve -2°<AoA<2° hücum açıları için elde edilen kaldırma katsayısı değerleri Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Daha yüksek akış hızındaki, yani V=15 m/s'deki kaldırma katsayıları, incelenen tüm hücum açıları ve bükümlü hidrofoil geometrileri için daha düşük akış hızı olan V = 6.75 m/s'dekilerden biraz daha yüksektir. AoA = 0.5°'ye kadar, her iki bükümlü hidrofoil de sabit bir giriş hızı için neredeyse aynı kaldırma kuvvetini üretirken; bükümlü NACA 0009 hidrofoil, 0.5°'den 2°'ye kadar daha yüksek açılarda bükümlü NACA 0015'ten daha yüksek kaldırma kuvveti oluşturmaktadır.



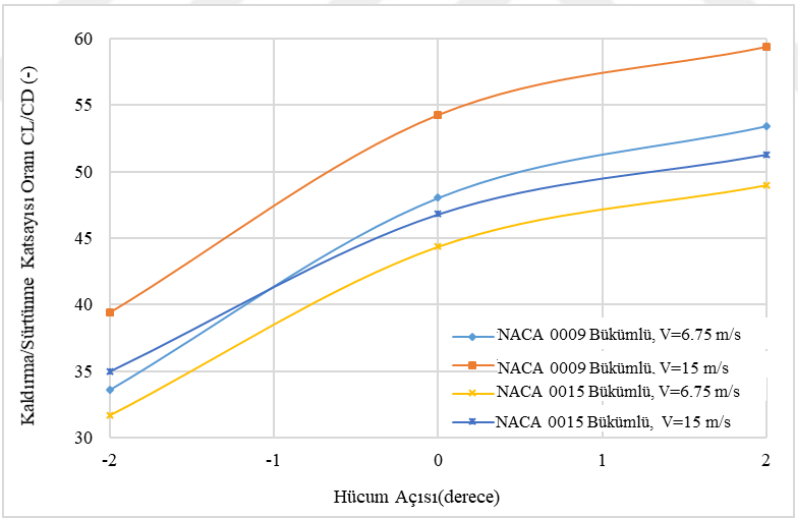
Şekil 3.14 Bükümlü NACA 0009 ve NACA 0015 için akış hızının kaldırma katsayıları üzerindeki etkileri.

Benzer şekilde, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16 sırasıyla akış hızının bükümlü hidrofoillerin direnç ve kaldırma-direnç oranlarını nasıl etkilediğini göstermektedir. Şekil 3.15 direnç katsayıları grafiklerinde, direnç ve AoA arasında doğrudan bir uyum olduğu görülmektedir. Grafikler, NACA 0009'un direnç katsayısının akış hızından önemli ölçüde etkilendiğini, NACA 0015'in direnç katsayısının ise herhangi bir AoA'da sadece az miktarda değiştiğini göstermektedir. Direnç

katsayısı hidrofoil kalınlığı arttıkça ve akış hızı azaldıkça yükselmektedir. NACA 0015, bilindiği gibi NACA 0009'dan daha kalın bir kesite sahiptir ve sonuç olarak, herhangi bir akış hızında ve AoA'da daha büyük bir direnç katsayısına sahiptir. Daha kalın kesit nedeniyle, akış hızına göre direnç katsayısında çok az değişiklik olmaktadır.



Şekil 3.15 NACA 0009 ve NACA 0015 için akış hızlarının direnç katsayıları üzerindeki etkileri.

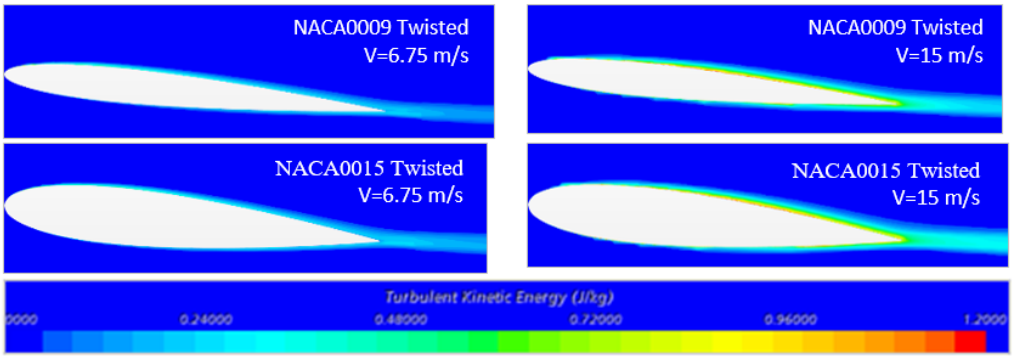


Şekil 3.16 Akış hızlarının kaldırma/direnç katsayısı oranı üzerindeki etkileri.

Akış hızlarının bir hidrofoilin hidrodinamik performansı üzerindeki etkileri kaldırma- direnç katsayısı oranı ile belirlenebilir. Şekil 3.16'de akış hızının her iki hidrofoilin hidrodinamik performansını nasıl etkilediği gösterilmektedir. V = 15 m/s'lik akış hızında NACA 0009'da hücum açısından bağımsız olarak daha iyi bir verimlilik elde etmek mümkündür. Dolayısıyla kalın kesitli olan NACA 0015 en

düşük verimi üretirken, AoA = -1°'den sonra NACA 0009 hidrofoiller arasındaki en yüksek verimi üretmektedir.

Şekil 3.17, bükümlü hidrofoillerin orta kesiti etrafındaki türbülanslı kinetik enerji dağılımlarını göstermektedir. Sınır tabakada, özellikle de her iki hidrofoilin emme tarafında artan giriş hızıyla birlikte, türbülans kinetik enerjisi her iki hidrofoil için de artmaktadır. Ayrıca, bükümlü NACA 0015 hidrofoilin türbülans kinetik enerjisinin V = 15 m/s hızında bükümlü NACA 0009 hidrofoilinkinden daha yüksek olduğu açıkken, V = 6.75 m/s'deki artış çok daha kısıtlı görünmektedir. Dolayısıyla, Şekil 3.15'teki direnç katsayısı eğrileri kısmen Şekil 3.17'de gösterilen türbülanslı kinetik enerji dağılımları ile açıklanabilir. Sonuç olarak, türbülanslı kinetik enerji dağılımları Şekil 3.15'deki direnç katsayısı eğrilerini ve Şekil 3.16'daki kaldırma/direnç katsayısı oranlarını kısmen açıklayabilir.



Şekil 3.17 Bükümlü NACA 0009 ve NACA 0015 kesitli hidrofoillerin AoA=0° hücum açısında ve orta kesitte (y/b=0.5'de) türbülanslı kinetik enerji dağılımının kontür grafikleri.

Tez çalışmasının ilk kısmı olan ve hidrofoil geometrilerinin kavitasyonsuz akış koşulları için incelendiği bu bölümde elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Bulgular, kavitasyonsuz akış koşulunda bükümlülük arttıkça 3 boyutlu hidrofoillerin hem kaldırma hem de direnç katsayılarının önemli ölçüde arttığını göstermektedir.
- Kaldırma kuvveti hidrofoilin artan kesit kalınlığı ile büyük ölçüde değişmese de, direnç kuvveti önemli ölçüde değişmektedir.

- Yarı bükümlü ve bükümsüz durumlarla karşılaştırıldığında, bükümlü hidrofoiller daha büyük bir kaldırma kuvveti oluşturmaktadır. Küçük hücum açılarında bile, artan büküm kaldırma kuvvetini önemli ölçüde artırmaktadır.
- Bükümlü kanatlar için direnç kuvvetindeki artışın, tüm hücum açılarında bükümsüz kanatlara göre daha az önemli olduğu bulunmuştur.
- Kesit kalınlığı değiştiğinde, kaldırma kuvveti Reynolds sayısından çok az etkilenir, ancak direnç katsayısı önemli ölçüde azalır. Kesit kalınlığının direnç katsayısındaki azalma miktarı ile ters bir ilişkisi vardır.
- Bükümlü NACA 0009, AoA=2°'ye kadar en verimli model olurken, yarı bükümlü NACA 0009, AoA=5°'ye kadar yarı bükümlü NACA 0015'ten daha yüksek verimlilik sağlamaktadır. Bükümsüz NACA 0009 bir sonraki en etkili profildir, bu da bükümün 5°'den daha yüksek hücum açılarında etkisiz olduğunu göstermektedir.
- İncelenen 3 boyutlu hidrofoil geometrileri için, Şekil 3.8'de kavitasyonsuz akış hesaplamalarından elde edilen herhangi bir sabit kaldırma katsayısı değeri için en yüksek kaldırma-direnç oranının bükümsüz hidrofoillere ait olduğu görülmüştür.
- Sonuç olarak; kavitasyonsuz akış koşullarında bükümsüz, yarı bükümlü veya bükümlü hidrofoillerin tasarımı, hücum açısı aralığındaki sınırlamalar, kaldırma kuvveti ve kaldırma-direnç oranının önceliği dikkate alınarak gerçekleştirilmelidir.

4

KAVİTASYONLU AKIŞ ANALİZLERİ VE SONUÇLARI

Tezin bu bölümünde, kavitasyonsuz akış koşullarında incelenen farklı kesit kalınlığı (NACA 0009 ve NACA 0015) ve bükümlülüğe sahip hidrofoiller, kavitasyonlu akış koşullarında incelenmiştir. Hidrofoil etrafındaki ağ yoğunluğu ve simülasyondaki zaman adımı değeri uygun CFL kararlılık kriterine karşılık gelecek şekilde belirlenmiştir. Bu kriter, fiziksel zaman adımı ile ağ taşınım zaman ölçeği arasındaki oranı temsil eden Courant sayısına (CFL) dayanmaktadır. Bu değer, ağ hücrelerinin boyutu (Δx), zaman adımı (Δt) ve hesaplama bölgesindeki akış hızı (U) arasında kurulan bir bağıntı ile ifade edilmektedir. Bu ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\text{Courant sayısı} = \left| \frac{U \Delta t}{\Delta x} \right| \tag{4.1}$$

Courant sayısı her simülasyon (RANS ve DES) için ayrıca hesaplanmış ve bu hesaplama aşağıdaki CFL kriterlerini karşılayacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

$$\text{CFL kriteri} = \left| \frac{U \Delta t}{\Delta x} \right| \leq 1 \tag{4.2}$$

Hesaplama alanı, altı yüzlü elemanlardan oluşan bir ağ örgüsü kullanılarak sonlu hacim elemanlarına bölünmüştür. Çözüm doğruluğunu artırmak, hücre çarpıklığını en aza indirmek ve yumuşak ağ geçişleri elde etmek için çaba sarf edilmiş, böylece simülasyonlardaki sayısal hatalar azaltılmıştır.

RANS analizleri için simülasyonda kullanılan hesaplama ağı yaklaşık 4.5 milyon hücreye sahiptir. Hücre sayısı bir önceki bölümde açıklamış olan GCI yöntemi kullanılarak, ağ örgüsü bağımsızlığı ve ağ yakınsama çalışmaları ile belirlenmiştir (Oksuz *vd.*, 2023).

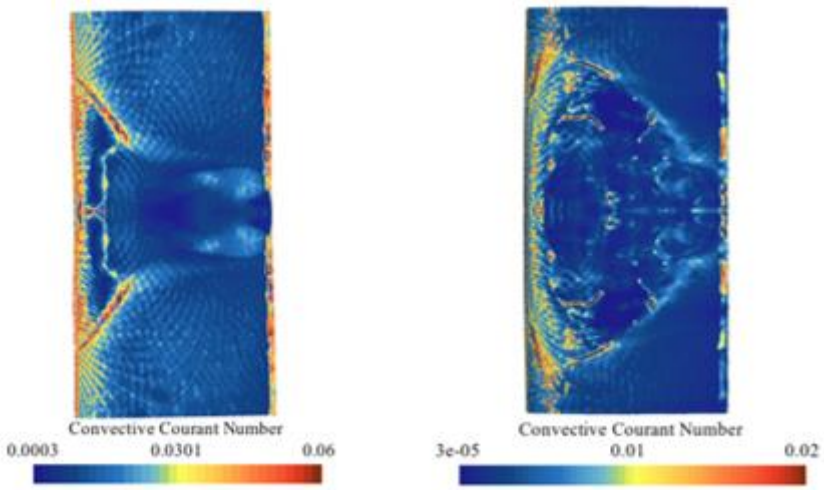
DES analizlerinde, RANS analizlerinde kullanılan ağ modellerinin aynısı kullanılmıştır. Analizlerdeki tek fark ağ yoğunluğudur. Özellikle hidrofoilden uzak

bölgelerde, DES analizleri RANS'a kıyasla kavitasyon dinamiklerini daha iyi modellemiştir. Sınır tabaka çevresinde, daha yüksek ağ yoğunluğu DES'in akışı alanını daha doğru bir şekilde temsil etmesini sağlamıştır. Sonuç olarak, kararsız (zamana bağlı) DES akış simülasyonlarında, hesaplama alanı içinde yaklaşık 12 milyon toplam ağ elemanı kullanılmıştır. Analizlerde dikkate alınan fiziksel koşullar Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Modellemede kullanılan kavitasyonlu akış koşulları

Çıkış basıncı (kPa)	Buhar yoğunluğu (kg/m^3)	Akış hızı (m/s)	Reynolds Sayısı	Buharlaşma basıncı (kPa)	Su yoğunluğu (kg/m^3)	Kavitasyon sayısı
29	0.023	6.97	1.18×10^6	2970	998	1.07

Şekil 4.1'de 10^{-5} s zaman adımı için RANS ve DES yöntemiyle yapılan analizlerde kanat üzerindeki Courant sayısı dağılımı gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.1 Hidrofoil üzerinde Courant sayısı dağılımının (a) RANS yöntemi (4.5 milyon hücreli ağ), (b) DES yöntemi (12 milyon hücreli ağ) ile değişimi.

Delft Twist-11 hidrofoilin doğrulanması için kavitasyonlu akış koşulları altında elde edilen sonuçlar, deneysel veriler ve mevcut literatürden sayısal bulgularla birlikte aşağıdaki tabloda sunulmuştur (Tablo 4.2). Kavitasyonlu akışlar Kararsız Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (URANS) ve Ayrık Eddy Simülasyonu (DES) yöntemleri kullanılarak çözülmüştür. Türbülans ve momentum denklemleri

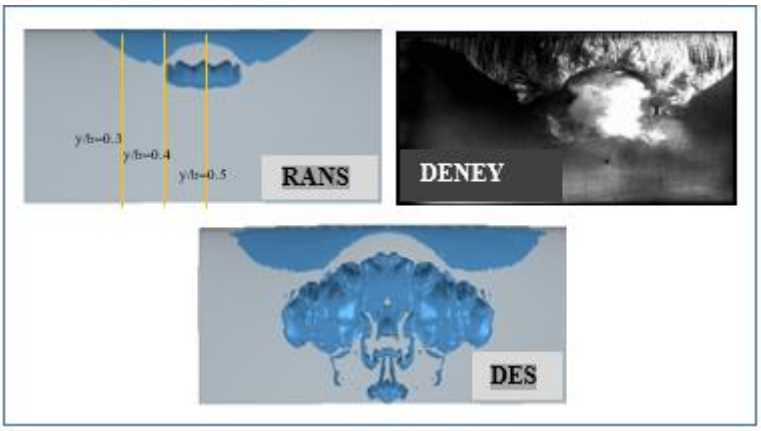
URANS için birinci dereceden upwind şeması kullanılarak ayrıklaştırılırken, DES için ikinci dereceden upwind şeması kullanılmıştır. Doğrulama için gerçekleştirilen tüm zamana bağlı akış simülasyonlarında zaman adımı $\Delta t=1x10^{-5}$ s olarak seçilmiştir.

Tablo 4.2 Mevcut çalışmada elde edilen direnç ve kaldırma katsayılarının literatürdeki değerlerle karşılaştırılması

	(Foeth, 2008b) Deney	**(Whitworth, 2011) RANS**	**(Usta, 2018) DES**	**Mevcut çalışma RANS**	**Mevcut çalışma DES**
C_D	-	0.0242	0.0266	0.0236	0.0401
C_L	0.523	0.403	0.433	0.428	0.443

Literatüre göre (Foeth, 2008b), kavitasyonlu akış için yapılan deneylerde direnç kuvveti ölçülmemiştir. Tablo 4.2'de verilen direnç değerleri incelendiğinde, bu çalışmada RANS analizinden elde edilen sonucun literatürdeki bulgularla uyumlu olduğu, DES analizinden elde edilen sonucun ise literatür değerlerinden daha yüksek bir direnç kuvveti verdiği görülmektedir. Bu farklılığın hidrofoil üzerinde oluşan kavitasyon yapısının akışı bozmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Çalışmada elde edilen kaldırma katsayısı değerleri karşılaştırıldığında hem RANS hem de DES analizlerinden elde edilen kaldırma katsayısı değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu, ayrıca DES analizinden elde edilen değerin deneysel sonuca en yakın değer olduğu görülmektedir.

Hidrofoil üzerindeki kavitasyon gelişimi Şekil 4.2'de deneyden (Foeth, 2008a) elde edilen kavitasyon görseli ile karşılaştırılmıştır. Kavitasyon oluşumu görüntüleri oluşturulurken bir hücrede bulunan buhar/ su oranı %50 (isosurface = 0.5) olarak alınmıştır.

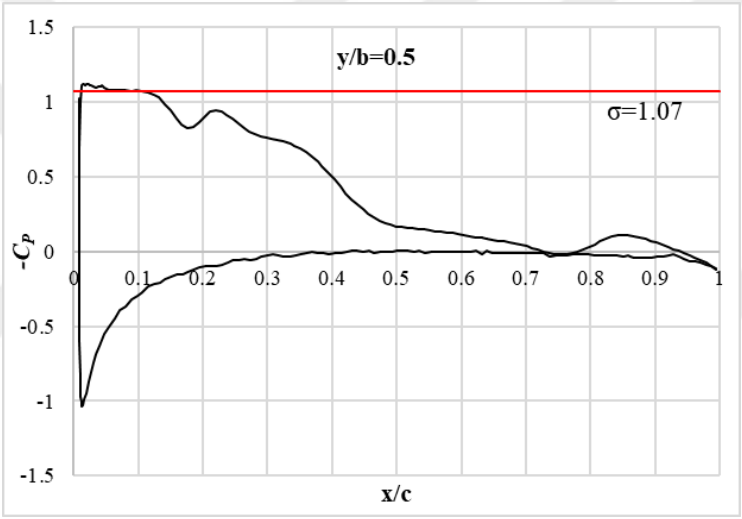


Şekil 4.2 Mevcut çalışmada (sol-üstte RANS ve altta DES yöntemi ile) ve deneyde (Foeth,2008a) elde edilen kavitasyon gelişimi (sağ-üstte).

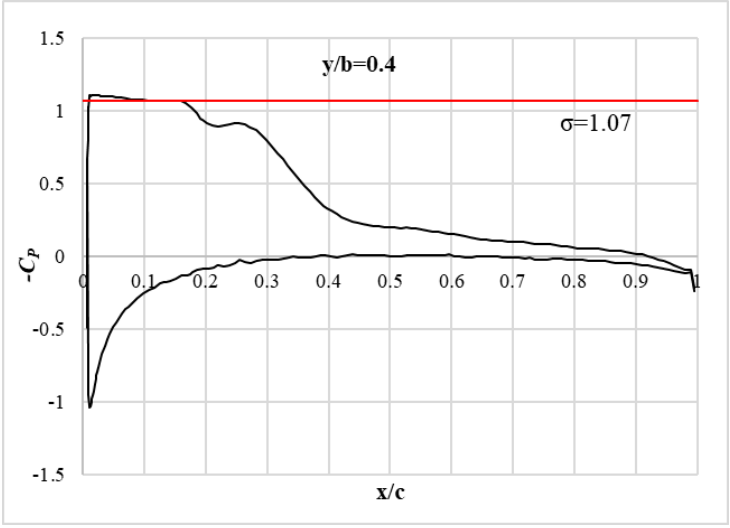
RANS yönteminde kavitasyon oluşumu genel olarak deneysel sonuçlara benzemekle birlikte daha az kavitasyon gelişimi göstermektedir. Ancak Şekil 4.2'de açıkça görüldüğü üzere DES ile elde edilen kavitasyon deseni deneyden elde edilen görsele oldukça benzemektedir. Kaldırma ve direnç katsayıları (Tablo 4.2) ve hidrofoil üzerindeki kavitasyon gelişimi (Şekil 4.2) karşılaştırıldığında, sonuçların literatürde verilen sonuçlarla benzer olduğu söylenebilir. RANS yöntemi ise tabaka kavitasyonunun arkasındaki bulut kavitasyonunu yakalamada yetersiz kalmaktadır. Buna dayanarak, bulut kavitasyonunun incelenen hidrofoilin kaldırma kuvveti üzerindeki etkisinin minimum olduğu sonucuna varılabilir.

RANS kullanılarak 4.5 milyon ağ hücresi ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar, literatürdeki direnç ve kaldırma katsayılarıyla iyi bir uyum göstermektedir. Bir sonraki bölümde gösterildiği üzere, URANS çözümlerinde yüzeydeki kavitasyon alanı belirli bir süre sonra yaklaşık olarak sabit bir değere yakınsarken, DES çözümlerinde hidrofoil yüzeyinde kavitasyon oluşma döngüsü ve periyodu net bir şekilde görülebilmektedir (Şekil 4.16 ve Şekil 4.17). URANS için birinci dereceden upwind şeması kullanılarak ayrıklaştırma yapılarak analiz sonuçları elde edildikten sonra aynı ağ yapısı için ikinci dereceden upwind şeması uygulanmış, kavitasyon alanı ve kuvvet katsayıları her iki yöntemde de yaklaşık olarak aynı bulunmuştur. Böylece, URANS için birinci dereceden upwind şemasının ve 4.5 milyon mesh eleman sayısının zamana bağlı kavitasyon analizinde kaldırma kuvveti ve ortalama kavitasyon oluşumu görüntüsünün tahmini için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak kavitasyonun doğal yapısını temsil eden

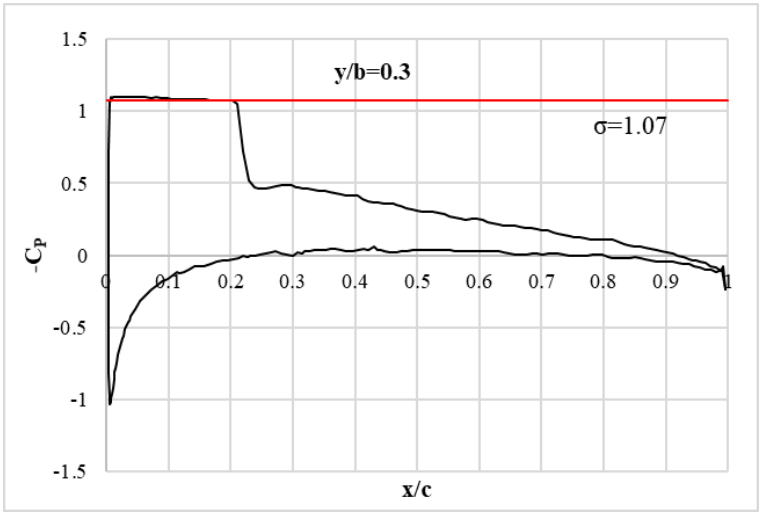
tutarlı periyodun belirlenmesi RANS kullanılarak sağlanamamıştır. Bu nedenle eleman sayısı 12 milyona çıkarılmış ve kavitasyon periyodunun doğru bir şekilde elde edilmesi için RANS simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ancak 12 milyon eleman ağından oluşan RANS analizleri ile dahi kavitasyon periyodu elde edilememiştir. Bu nedenle çalışmanın geri kalan kısmında DES yöntemi kullanılmıştır. Bu yüzden aşağıdaki bölümde RANS yerine DES yöntemi kullanılmış ve aynı iyileştirilmiş ağ yapısı ile ikinci dereceden upwind şeması kullanılarak kavitasyon oluşma döngüsü ve periyodunun belirlenmesi için analizlere devam edilmiştir. RANS ile kavitasyonlu akış analizleri için NACA 0009 bükümlü hidrofoil (AoA= -2) orta kesit ile (y/b=0.5), y/b=0.4 ve y/b=0.3 kesitlerinde (Şekil 4.2) basınç katsayısı dağılımları Şekil 4.3'de sunulmuştur.



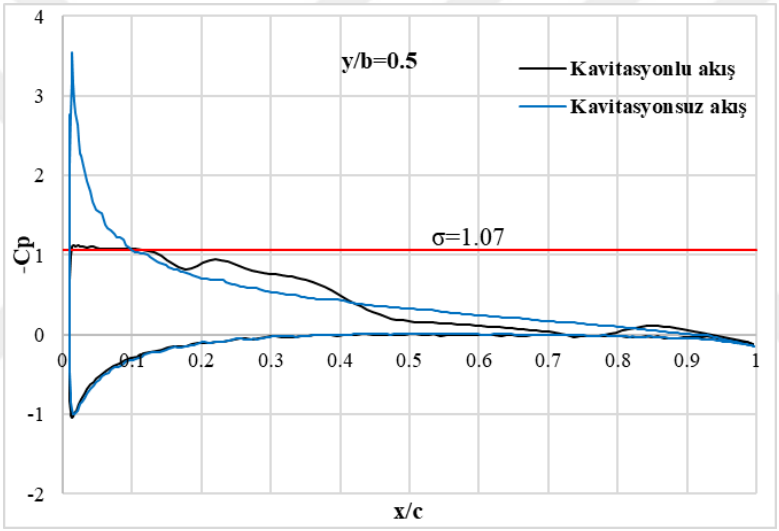
(a)



(b)



(c)

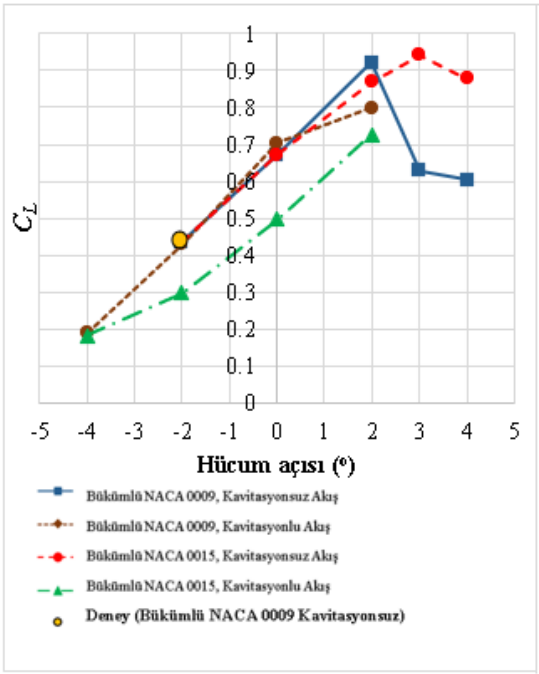


(d)

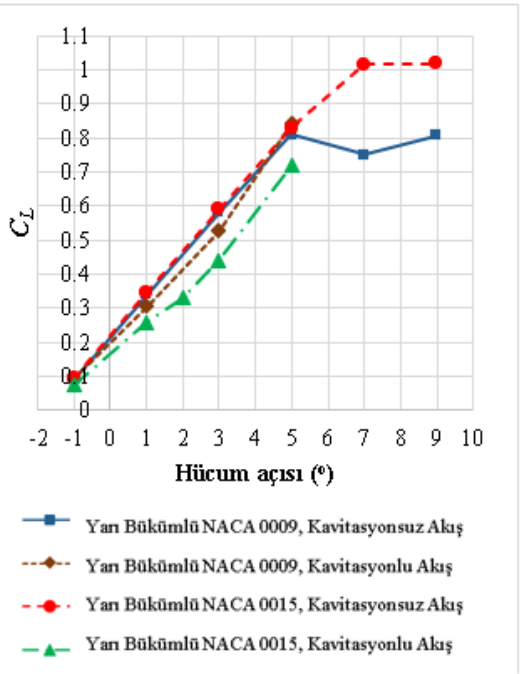
Şekil 4.3 Bükümlü NACA 0009 hidrofoiline ait negatif basınç katsayılarının kavitasyonlu akış durumunda y/b=0.5 (orta kesitte) (a), y/b=0.4 (b), y/b=0.3 (c)'de, kavitasyonlu ve kavitasyonsuz akış durumlarında y/b=0.5 (orta kesitte) (d) kıyaslanması

Şekil 4.3 (a), (b), (c)'de gösterilen hidrofoilin farklı kesitlerindeki basınç dağılımı grafiklerinden, kavitasyon bölgelerinin Şekil 4.2'deki kavitasyon sayısı (σ) ve RANS'tan elde edilen kavitasyon oluşumu görüntüsü ile uyumlu olduğu görülebilir. Kavitasyonlu ve kavitasyonsuz akış koşullarında hidrofoilin orta kesitindeki basınç dağılımı grafiklerinden de görülebileceği gibi, kanadın yüksek basınç yüzeyindeki basınç dağılımları kavitasyon nedeniyle değişmemektedir. Beklendiği gibi, kavitasyonun meydana geldiği kanadın sırtının ucuna yakın kısımlarda negatif

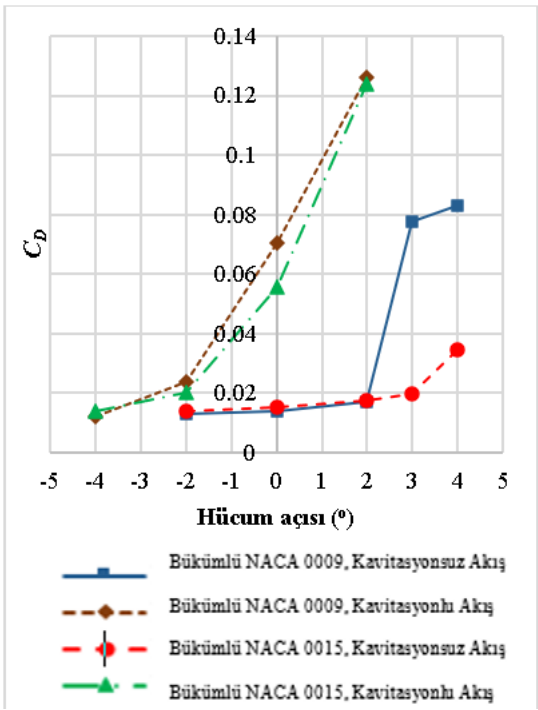
basınç katsayısı değerleri kavitasyon sayısına (σ) eşittir. Şekil 4.3 (d)'de kavitasyonlu ve kavitasyonsuz orta kesitteki basınç katsayısı değişimi birlikte verilmiştir.



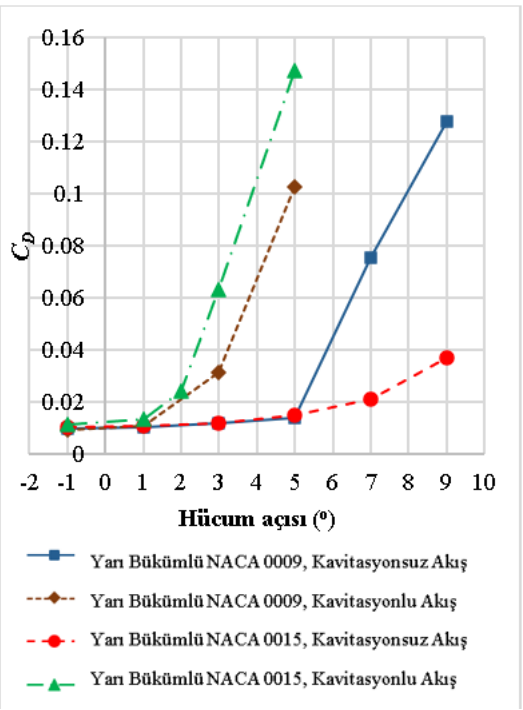
(a)



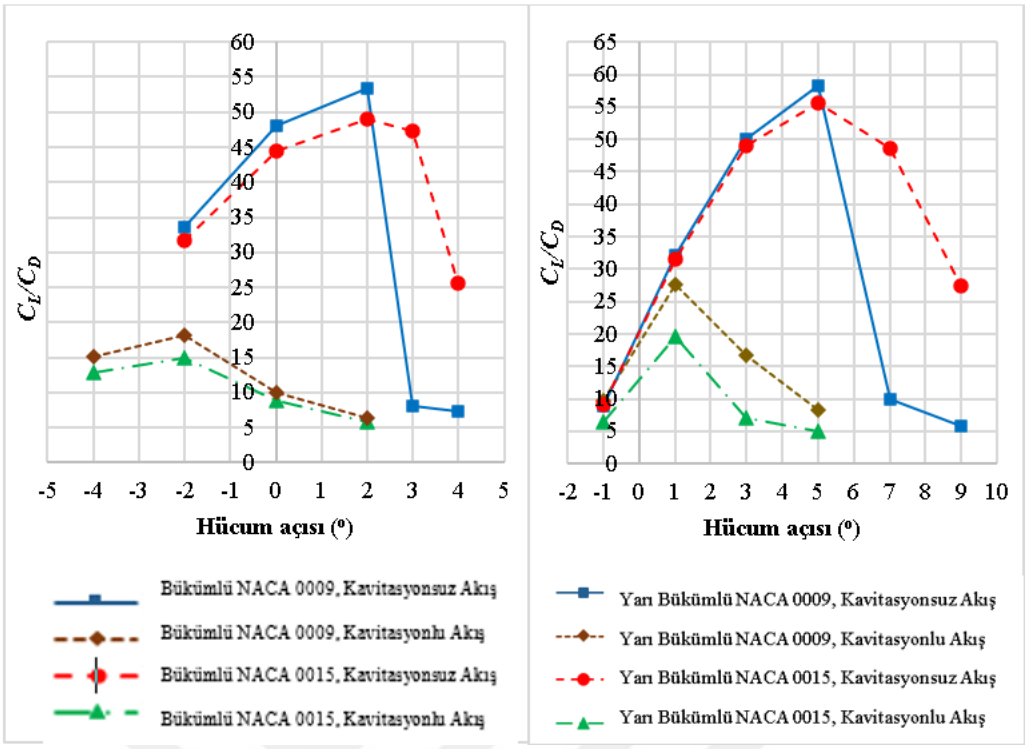
(b)



(c)



(d)



(e) (f)

Şekil 4.4 Kavitasyonsuz ve kavitasyonlu akışta bükümlü ve yarı bükümlü geometrilerin kaldırma katsayıları (a, b), direnç katsayıları (c, d) ve kaldırma/ direnç katsayısı oranı değerleri (e, f).

Kavitasyonsuz ve kavitasyonlu akış koşulları altında bükümlü ve yarı bükümlü geometrilerin kaldırma katsayıları, direnç katsayıları ve kaldırma-direnç katsayısı oranı değerlerinin karşılaştırmalı analizi Şekil 4.4'de sunulmuştur. Kaldırma katsayısı için Foeth (2008b) tarafından verilen deneysel veriler, bükümlü NACA 0009 hidrofoilin kavitasyonsuz akış sonuçlarını doğrulamak için Şekil 4.4 (a)'ya eklenmiştir. Kavitasyonsuz akış simülasyonları daimi akış koşulunda (steady flow) gerçekleştirilirken, kavitasyonlu akış koşulları $\Delta t=1x10^{-5}$ s zaman adımıyla RANS kullanılarak simüle edilmiştir.

Şekil 4.4 (a)'da görüldüğü üzere, NACA 0009 kesitli bükümlü hidrofoil aynı kavitasyon koşulları altında yaklaşık 2 derece hücum açısına kadar sürekli olarak daha yüksek kaldırma kuvveti üretmektedir. Kavitasyonlu akış durumunda, daha kalın kesitli hidrofoil olan bükümlü NACA 0015 için -2 ve +2 hücum açıları arasında kaldırma katsayısının yaklaşık %25 daha düşük olduğu görülmektedir. Kavitasyonsuz akışta maksimum kaldırma katsayısı değerleri NACA 0009 bükümlü hidrofoil için 2 derece civarında (hidrofoilin orta kesitinde AoA=13

derece) ve NACA 0015 bükümlü hidrofoil için 3 derece civarında (hidrofoilin orta kesitinde AoA=14 derece) gerçekleşmektedir. Yarı bükümlü hidrofoiller için elde edilen kaldırma katsayısı grafiklerinden de görülebileceği gibi (Şekil 4.4 (b)), kavitasyon koşullarında her iki hidrofoil de kavitasyonsuz akıştakilere göre daha az kaldırma kuvveti üretmekte, bu etki daha kalın NACA 0015 kesitli hidrofoilde daha belirgin olmaktadır. Bükümlü hidrofoillere benzer şekilde, kavitasyonsuz koşullarda yarı bükümlü NACA 0009 hidrofoil daha düşük bir açıda (yaklaşık 5 derece, hidrofoilin orta bölümünde AoA=10.5 derece) maksimum kaldırma kuvveti üretir.

Şekil 4.4 (c)'de görüldüğü gibi, bükümlü NACA 0009 hidrofoil kavitasyon koşullarında biraz daha yüksek direnç oluştururken, kavitasyonsuz koşullarda, yaklaşık 2 derecelik açıya kadar, direnç katsayıları birbirine çok yakındır, ancak daha yüksek açılarda kaldırma katsayısındaki düşüşün aksine, bükümlü NACA 0009 hidrofoil için C_D değerleri önemli ölçüde artmaktadır. Yarı bükümlü hidrofoiller için, kavitasyonlu akış koşullarında NACA 0015 için direnç katsayıları, bükümlü hidrofoillerdeki eğilimin aksine daha yüksektir. Bükümlü duruma benzer şekilde, NACA 0009 yarı bükümlü hidrofoil, kavitasyonsuz durumda yaklaşık 5 derecelik hücum açısından sonra daha fazla direnç üretir (Şekil 4.4 (d)). Kavitasyonsuz akış durumunda, daha ince hidrofoil nispeten yüksek hücum açılarında daha yüksek bir direnç katsayısı verebilir ((Seeni, 2022); (Dongli *vd.*, 2015);(Sarraf *vd.*, 2007); (Sogukpinar, 2017); (Xu ve Wu, 2023)).

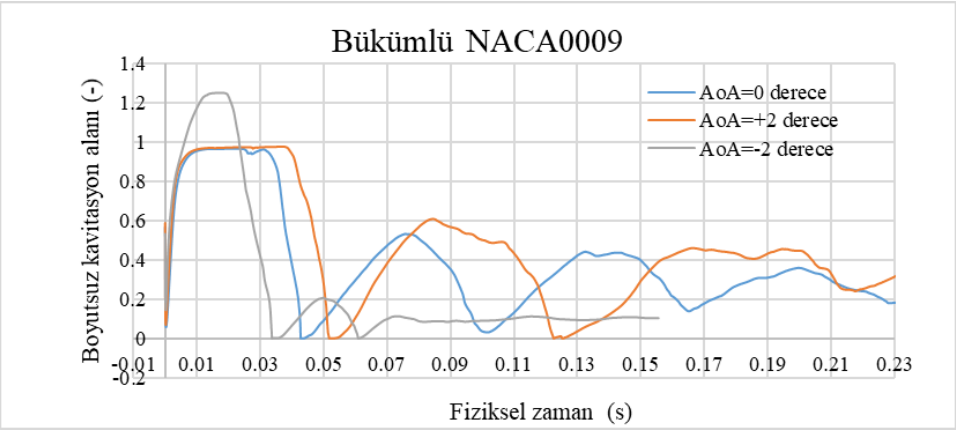
Örneğin, belirli bir kaldırma kuvveti katsayısı değeri seçilecek olursa, Şekil 4.4 (a) ve Şekil 4.4 (b)'den C_L=0.7 için elde edilen hücum açılarına karşılık gelen hidrofoil verimleri Şekil 4.4 (e) ve Şekil 4.4 (f)'deki grafiklerden okunmaktadır. Yani, bükümlü NACA 0009 ve NACA 0015 için hidrofoil verimleri (C_L/C_D) sırasıyla %49 ve %46 iken, yarı bükümlü NACA 0009 ve NACA 0015 için verimler sırasıyla %57 ve %53'tür. Buna göre, en yüksek verim kavitasyonsuz durumda yarı bükümlü NACA 0009'dan elde edilmektedir. Benzer şekilde, kavitasyonlu durumda bükümlü NACA 0009 ve NACA 0015 hidrofoillerin verimleri sırasıyla %10 ve %7 iken, yarı bükümlü NACA 0009 ve NACA 0015 hidrofoillerin verimleri sırasıyla %12 ve %5'tir. Analizler sonucunda, bükümün ve kesit kalınlığının azalması ve kavitasyonun önlenmesi ile verimin arttığı sonucuna varılabilir.

4.1 RANS metoduyla farklı hücum açılarının kıyaslanması

Bükümsüz, yarı bükümlü ve bükümlü hidrofoiller için sonuçlar daha sonra boyutsuz kavitasyon alanının zamana bağlı değişimine göre kıyaslanmıştır. Şekil 4.5 ila Şekil 4.11'in yanı sıra Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'de, x ekseni analizin fiziksel zamanına karşılık gelirken, y ekseni hidrofoil üzerinde meydana gelen kavitasyon oluşumunu (boyutsuz kavitasyon alanı) temsil etmektedir. Farklı geometriler arasında kavitasyon oluşumunun karşılaştırılması amacıyla, metrekare cinsinden hesaplanan kavitasyon alanı, grafiklerde boyutsuz bir biçimde temsil edilmektedir.

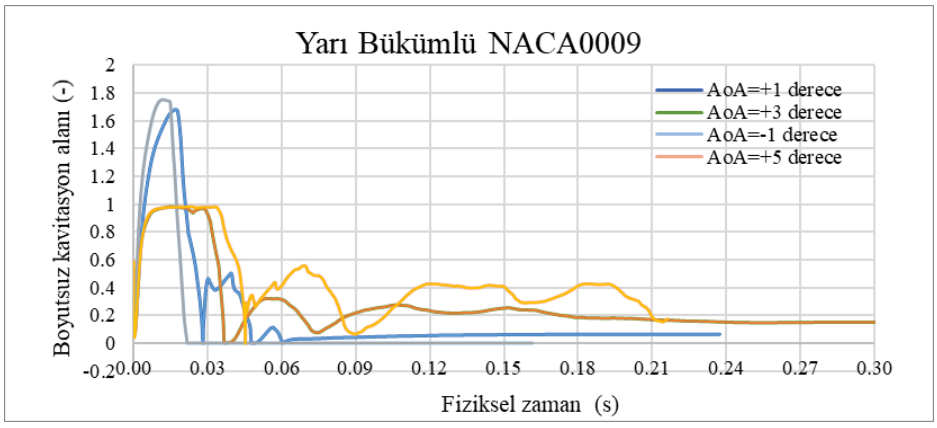
Şekil 4.5, bükümlü NACA 0009 hidrofoilinin -2°, 0° ve +2° hücum açılarında kanat üzerindeki kavitasyon alanının grafikleri verilmiştir. -2° hücum açısı için kavitasyon alanının yaklaşık 0.08 saniye sonra nispeten sabit kaldığı açıktır. Bununla birlikte, 0° ve 2° hücum açıları için, kavitasyon alanındaki değişiklikler zamanla azalmakta, ancak gözlemlenen fiziksel zaman dilimi içinde sabit bir değere yakınsamamaktadır. Bu gözlem, hücum açısındaki bir artışın daha uzun bir kavitasyon süresine yol açtığını göstermektedir. Örneğin, başlangıç süresi -2°'de 0.033 saniye olup, Maquil *vd.,* (2011)'in Delft Twist-11 kanadı için aynı hücum açısında (-2 derece) yaptığı çalışmada 0.027 saniye olarak bulunmuşken, 0°'de 0.043 saniyeye ve 2° hücum açısında 0.052 saniyeye uzamaktadır. Analizler daha uzun bir fiziksel süre boyunca devam ettirilirse, kavitasyon alanının sonunda 0° ve 2° hücum açılarında sabitleneceği öngörülmektedir. İşlemci ve kapasite kısıtlarından dolayı analizler daha uzun süre devam ettirilmemiştir.

Hidrofoiller üzerinde oluşan tabaka kavitasyonu, kavitasyon alanının zamana bağlı değişimi grafikleriyle verilmiştir. Grafiklerde kullanılan boyutsuz kavitasyon alanı ifadesi, hidrofoilin sırt yüzeyinde oluşan kavitasyon alanının, planform alanına (kesit boyu x kanat açıklığı mesafesi) oranını temsil eden boyutsuz bir parametredir. Boyutsuz kavitasyon alanı grafiklerinde yakınsama süresini göz önüne almak amacıyla ilk oluşan periyotlar, hesaplama ve yorumlamalarda dikkate alınmamıştır.



Şekil 4.5 Bükümlü NACA 0009'un farklı hücum açılarında boyutsuz kavitasyon alanı

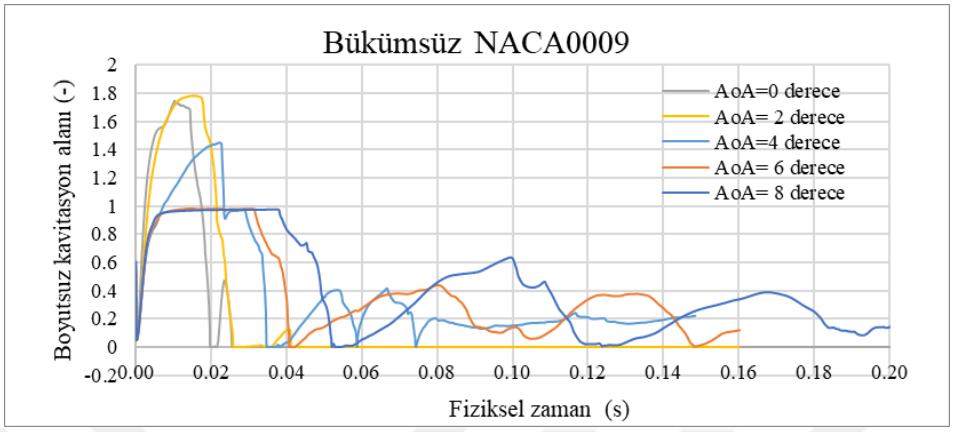
Şekil 4.6, yarı bükümlü NACA 0009 hidrofoil için boyutsuz kavitasyon alanı sonuçlarını sunmaktadır. Boyutsuz kavitasyon alanının yaklaşık 10^{-6} gibi minimum bir seviyede kaldığı -1° hücum açısı hariç, tüm hücum açılarında meydana geldiği açıktır. Genel bir gözlem olarak, hücum açısındaki bir artış kavitasyon alanında da bir artışa karşılık gelmektedir. Bununla birlikte, analiz süresi (fiziksel zaman) uzadıkça kavitasyon alanının dengelendiğini belirtmek gerekir. Analizlerden elde edilen bir diğer önemli sonuç da daha yüksek hücum açılarında kavitasyonun düzensiz davranış göstermesidir. Aynı şekilde, hücum açısındaki artışın kavitasyon süresinin ve analizdeki yakınsama süresinin uzamasına neden olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.6 Yarı bükümlü NACA 0009'un farklı hücum açılarında boyutsuz kavitasyon alanı kıyaslanması

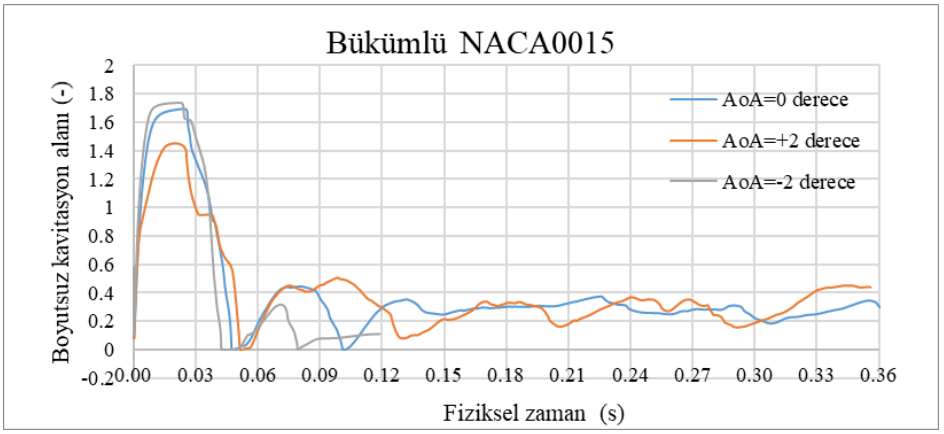
Şekil 4.7, bükümsüz NACA 0009 hidrofoili için farklı hücum açılarındaki boyutsuz kavitasyon alanını göstermektedir. Hücum açısı ile kavitasyon oluşumu arasındaki genel ilişki göz önünde bulundurulduğunda, sonuçlar yarı bükümlü analiz sonuçlarıyla uyumludur. Yarı bükümlü hidrofoillere benzer şekilde, kavitasyon tüm

hücum açılarında gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, 0° ve +2° hücum açılarında, kavitasyon oluşumu belirli bir süre sonra neredeyse sabit hale gelmiştir.



Şekil 4.7 Bükümsüz NACA 0009'un farklı hücum açılarında boyutsuz kavitasyon alanı

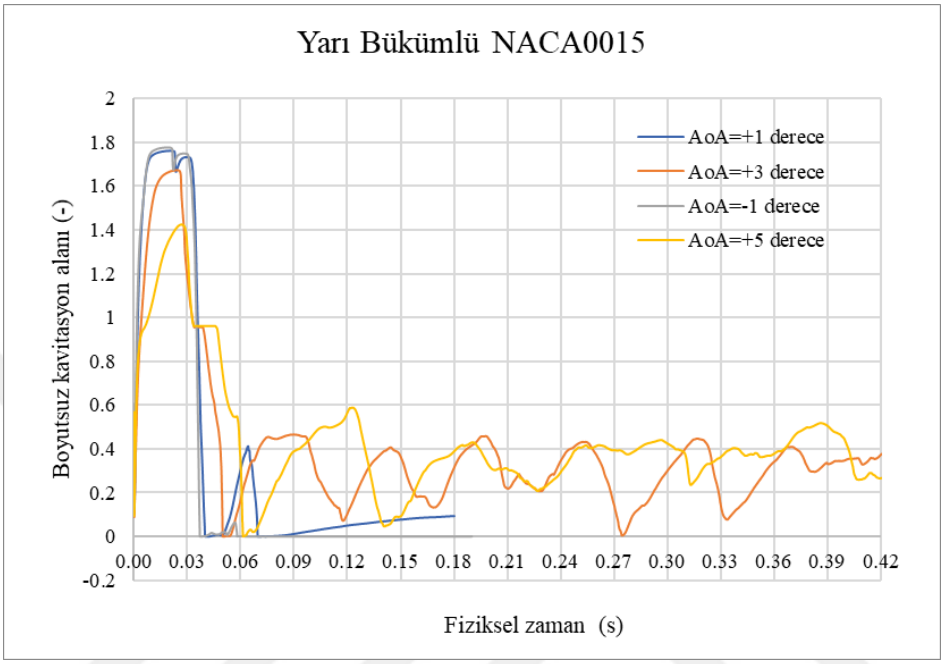
Şekil 4.8, bükümlü NACA 0015 geometrisinin farklı hücum açılarında boyutsuz kavitasyon alanı sonuçlarını göstermektedir. Grafiğe bakıldığında, hücum açısı arttıkça kavitasyon süresindeki artışın, yarı bükümlü ve bükümlü NACA 0009 hidrofoiline göre daha fazla olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, kavitasyonun sönümleme süresinin hücum açısı ile orantılı olarak arttığı açıktır.



Şekil 4.8 Bükümlü NACA 0015'in farklı hücum açılarında boyutsuz kavitasyon alanı

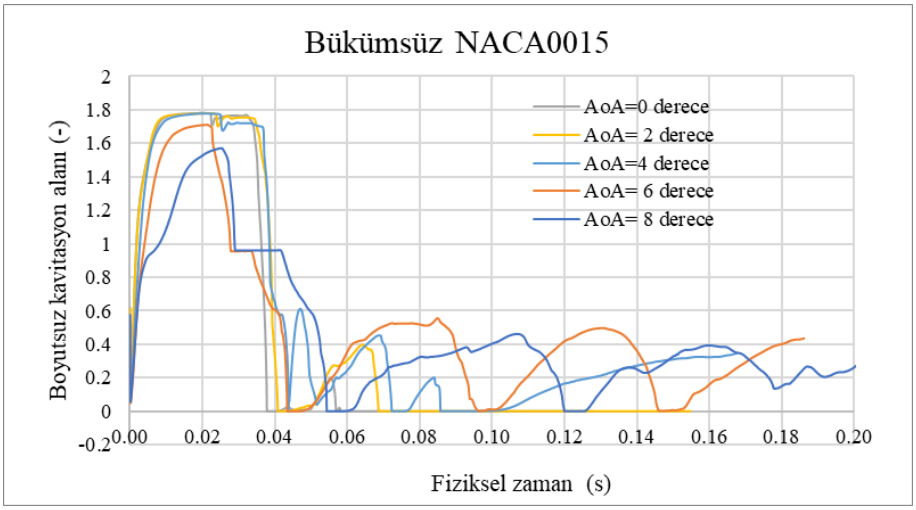
Şekil 4.9, NACA 0015 yarı bükümlü geometri için boyutsuz kavitasyon alanı grafiğini göstermektedir. Yapılan tüm analizlerde kavitasyon gözlemlenmiştir. Özellikle, -1 derecelik hücum açısında, tespit edilen kavitasyon alanı NACA 0009

analizlerinde elde edilen sonuçlarla tutarlıdır. Genel olarak, hücum açısındaki bir artışın daha yüksek kavitasyon oluşumu, daha uzun bir kavitasyon süresi ve sonuç olarak daha uzun bir sönümleme süresi ile ilişkili olduğu ortaya çıkmaktadır.



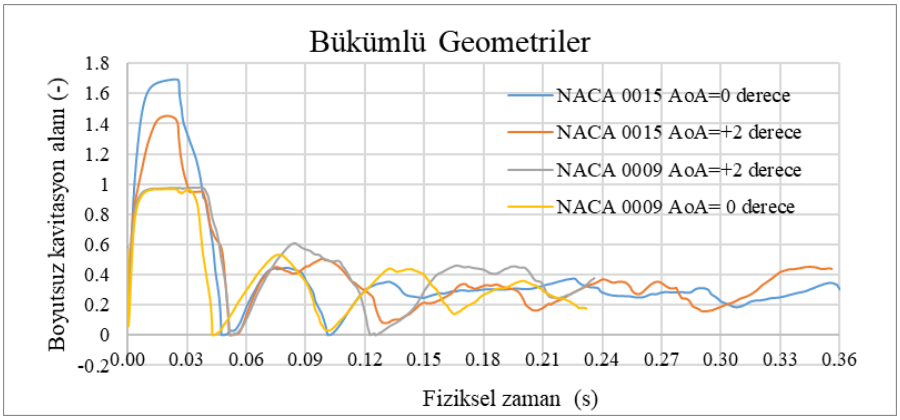
Şekil 4.9 Yarı bükümlü NACA 0015'in farklı hücum açılarında boyutsuz kavitasyon alanı

Şekil 4.10'da, bükümsüz NACA 0015 hidrofoiline ait boyutsuz kavitasyon alanı grafiğinde hücum açısı arttıkça kavitasyon süresinin uzadığı görülmektedir. Kavitasyon sönümlemesinin 0 ve 1 derece gibi daha küçük açılarda nispeten daha hızlı gerçekleştiği dikkat çekerken, bu sürenin hücum açısının artmasıyla uzadığı gözlemlenmiştir.



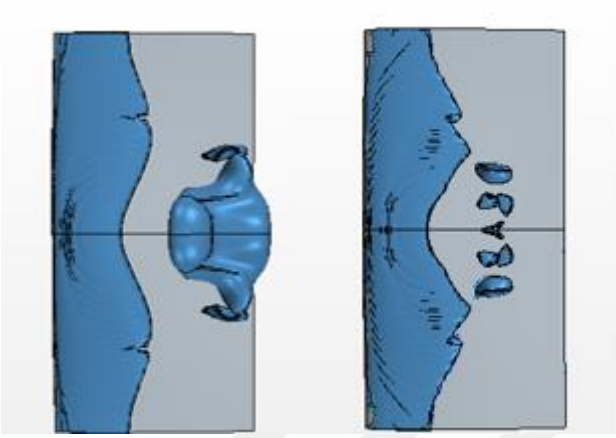
Şekil 4.10 Bükümsüz NACA 0015'in farklı hücum açılarında boyutsuz kavitasyon alanı

Şekil 4.11'de, farklı kesite sahip bükümlü geometrilerin 0 ve 2 derece hücum açılarında kanat yüzeyinde oluşan kavitasyon alanları kıyaslanmıştır. Analizin başlangıcında, yaklaşık 0.05 saniyeyi kapsayan başlangıç döneminde kalın kesitli (NACA 0015) geometrinin yüzeyinde daha yüksek kavitasyon oluşumu dikkat çekmektedir. Ancak, analiz ilerledikçe (yaklaşık 0.05 saniye sonra), yüzeydeki kavitasyon alanı, hücum açısına bakılmaksızın her iki hidrofoil arasında oldukça birbirine yakın hale gelmektedir. Ayrıca bir diğer önemli bulgu da hücum açısındaki artışla birlikte kavitasyon süresinin uzamasıdır.



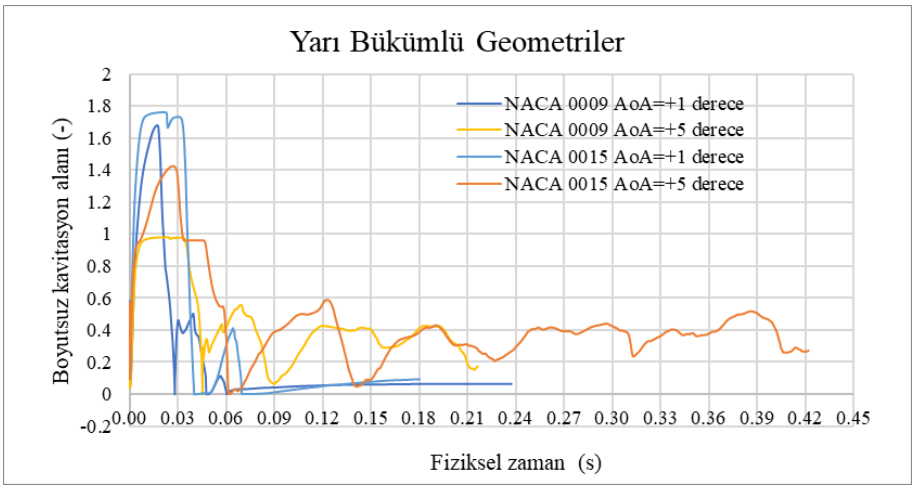
Şekil 4.11 Farklı kesitlere sahip bükümlü geometrilerin boyutsuz kavitasyon alanı

Şekil 4.12'deki kıyaslama için her iki hidrofoile ait alan grafiklerinin çok benzer özellikler gösterdiği 0.12 saniye seçilmiştir. Her iki hidrofoil üzerinde oluşan tabaka kavitasyonunun oldukça benzer bir yapı gösterdiği görülmektedir.



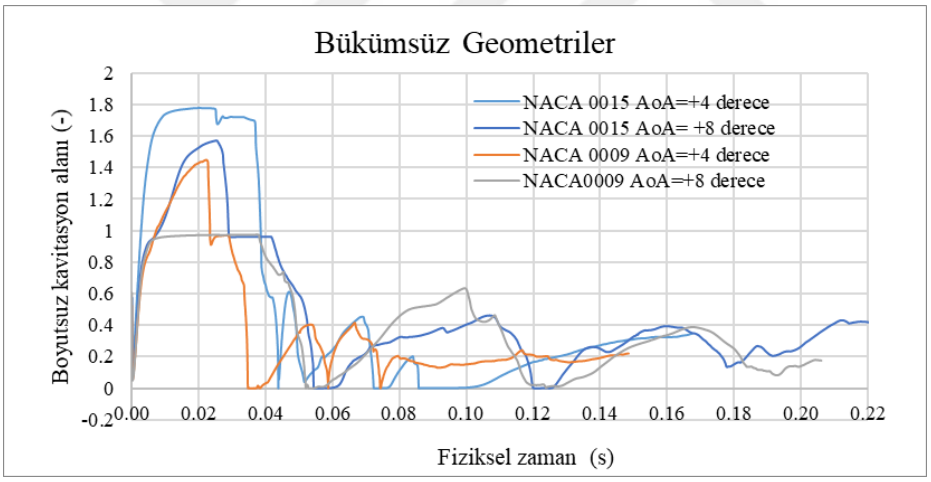
Şekil 4.12 Bükümlü NACA 0009 (solda) ve NACA 0015 (sağda) hidrofoiller üzerinde 0.12 saniyede 0 derece hücum açısında kavitasyon görüntüsü

Şekil 4.13'deki grafikte ise farklı kesitlere sahip yarı bükümlü hidrofoiller üzerinde meydana gelen kavitasyon oluşumları farklı hücum açılarında kıyaslanmıştır. Sonuçlar, hücum açısındaki artış ile kavitasyon süresinin uzaması arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ayrıca, NACA 0015 için kavitasyon başlangıcının NACA 0009'a kıyasla daha geç gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ek olarak, yarı bükümlü geometrilerde bükümlü geometrilere kıyasla daha kısa kavitasyon süreleri oluştuğu görülmektedir (bkz. Şekil 4.11).



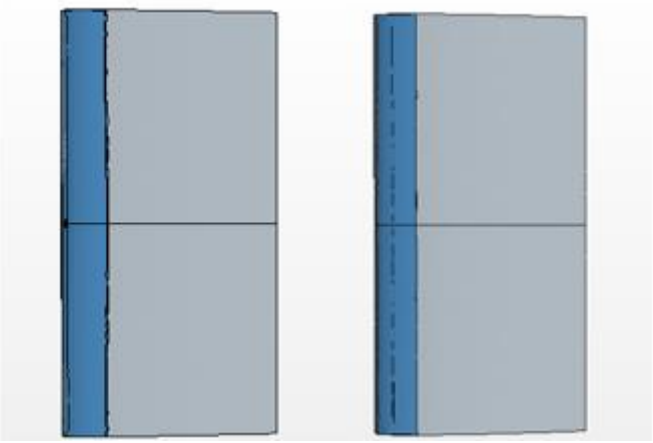
Şekil 4.13 Farklı kesitlere sahip yarı bükümlü geometrilerin boyutsuz kavitasyon alanı

Şekil 4.14'de, bükümsüz geometrilerin farklı hücum açılarında meydana gelen kavitasyon oluşumlarının daha fazla benzerlik gösterdiği dikkat çekmektedir.



Şekil 4.14 Farklı kesitlere sahip bükümsüz geometrilerin boyutsuz kavitasyon alanı

Şekil 4.15, bükümsüz geometrilerin yukarıdaki grafiğe çok benzer kavitasyon oluşumu gösterdiği 0.12. saniyedeki kavitasyon görüntüleri görülmektedir.

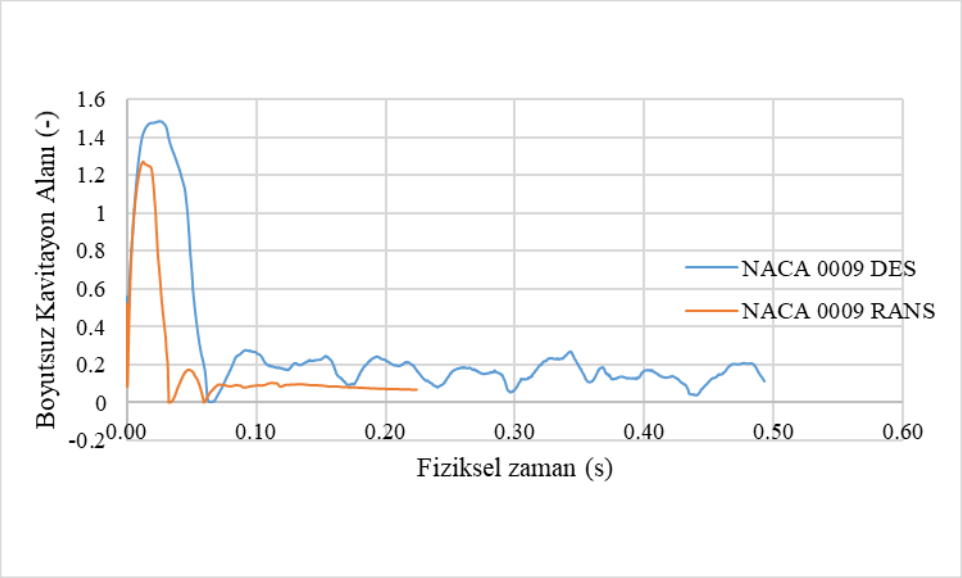


Şekil 4.15 NACA 0009 (solda) ve NACA 0015 (sağda) bükümsüz geometrilerin 0.12. saniyede 4 derece hücum açısında kavitasyon alanı

Önemli bir bulgu olarak, daha kalın kesite sahip hidrofoillerin üzerinde daha yüksek kavitasyon alanı oluştuğu ve kavitasyon sürelerinin tüm geometrilerde, daha ince kesite sahip olan NACA 0009 kesitine kıyasla tutarlı bir şekilde daha uzun olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, hücum açısındaki artışın kavitasyon sürelerinin uzamasına yol açtığı görülmüştür.

4.2 RANS ve DES metodlarının karşılaştırılması

Bu bölümde, NACA 0009 kesitli bükümlü hidrofoilin kavitasyonlu akış analizleri V=6.97 m/s akış hızı, σ=1.07 kavitasyon sayısı ve AoA=-2 derece durumu için, RANS ve DES yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Burada amaç, RANS yöntemiyle belli bir süre sonra neredeyse sabit hale gelen kavitasyon alanındaki olması beklenen periyodik kavitasyon değişimini DES yöntemi ile elde edebilmektir. Ayrıca, her bir kavitasyon döngüsünde kavitasyon periyodunu yakalamada ve kuvvetleri tahmin etmede zaman adımının uyumluluğunu araştırmak için sonraki alt bölümlerde ayrıntılı olarak açıklandığı üzere $\Delta t=10^{-5}$ s'ye ek olarak $\Delta t=2x10^{-5}$ s'lik zaman adımıyla da DES analizleri gerçekleştirilmiş, her iki zaman adımına ait sonuçlar kıyaslanmıştır.



Şekil 4.16 Bükümlü NACA 0009 hidrofoilinin AoA= -2º hücum açısında zamana göre kavitasyon gelişimi (RANS ve DES)

Şekil 4.16, $\Delta t=10^{-5}$ s'lik bir zaman adımıyla DES ve RANS yöntemleri kullanılarak hidrofoil yüzeyinde hesaplanan tabaka kavitasyon alanının zaman içindeki değişimini göstermektedir.

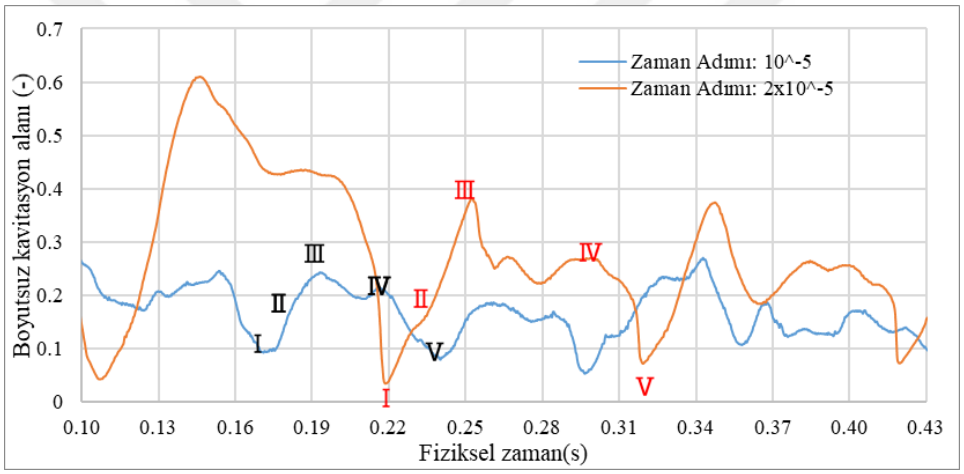
RANS'tan elde edilen eğri, çözümün yakınsamasından sonra neredeyse kararlı bir duruma gelirken, DES'ten elde edilen eğri, yaklaşık olarak tekrar eden belirgin tepe ve çukurlarla birlikte belirgin kavitasyon döngüleri ve periyotları sergilemektedir. DES çözümünde elde edilen ortalama kavitasyon alanı, RANS'a kıyasla biraz daha yüksektir. Grafikte DES grafiğinde oldukça belirgin olarak görülebilen her bir döngü, hidrofoil üzerinde kavitasyonun oluşmaya başlayıp koptuğu ana kadar olan bir periyodu temsil etmektedir.

4.3 Farklı zaman adımlarının kıyaslanması

DES metodu kullanılarak yapılan analizlerde, zaman adımına bağlı olarak elde edilen sonuçları iyileştirmek ve gerekli analiz süresini kısaltmak amacıyla zaman adımı büyütülerek analizler yeniden gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 10^{-5} olan zaman adımı, $2x10^{-5}$ olarak arttırılmış, sonuçlar deneysel verilerle ve ilk analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Şekil 4.17 ila Şekil 4.19'da, DES yönteminden elde edilen hidrofoil üzerinde oluşan kavitasyon alanlarının, kaldırma katsayısının ve

direnç katsayısının zamana bağlı değişimi farklı zaman adımları için kıyaslamalı olarak verilmiştir.

Şekil 4.17'de görüldüğü üzere kavitasyon periyotları, büyük olan zaman adımında daha belirgin bir şekilde elde edilebilirken, yüzeydeki kavitasyon alanı da belirgin şekilde artış göstermiştir. Burada I, II, III, IV ve V noktaları, zaman adımı değerleri dikkate alınarak, bir kavitasyon döngüsünde kavitasyonun oluşmaya başlayıp koptuğu ana kadar olan sürecin beş aşamasını ifade etmektedir. I noktası T=0 olarak gösterilen kavitasyon döngüsünün başlangıç noktasını temsil ederken, V noktası T=T zamanı olarak gösterilen kavitasyon döngüsünün tamamlanmasını (tabaka kavitasyonunun hidrofoilden koptuğu anı) temsil etmektedir. II, III ve IV noktaları sırasıyla döngü içindeki T/4, T/2 ve 3T/4 zamanlarını temsil etmektedir.

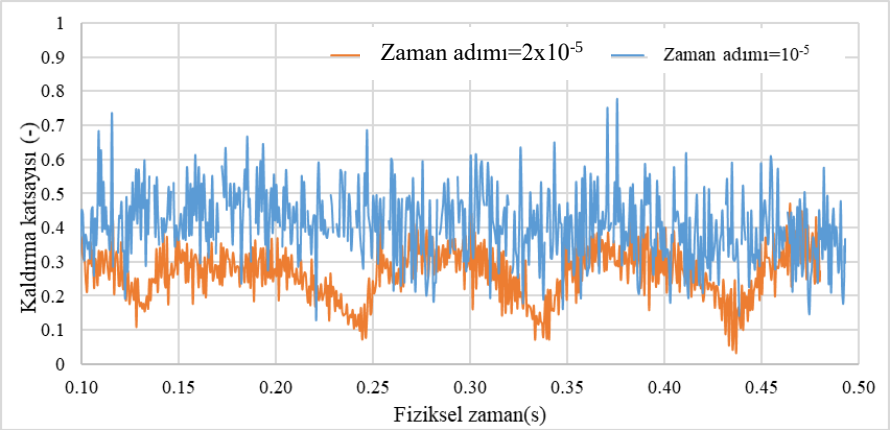


Şekil 4.17 Bükümlü NACA 0009 hidrofoili için $\Delta t=1x10^{-5}$ s ve $\Delta t=2x10^{-5}$ s zaman adımlarında boyutsuz kavitasyon alanlarının kıyaslanması

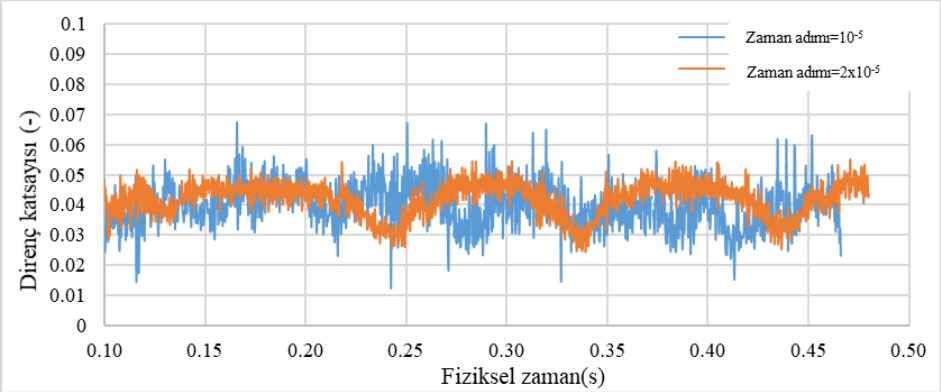
Yukarıdaki grafikte görülen kavitasyon döngülerinden birer tanesi detaylı incelemek için seçilmiştir. Küçük zaman adımı ($\Delta t=1x10^{-5}$ s) kullanılarak yapılan analizlerde, seçilen kavitasyon döngüsü t=0.176 s fiziksel zamandaki I noktasından t=0.24 s fiziksel zamandaki V noktasına kadar uzanmaktadır, bu da bir kavitasyon döngüsü için yaklaşık 0.064 s'lik bir süre ile sonuçlanmaktadır. Bu döngü analiz boyunca yaklaşık olarak sabit kalır. Daha yüksek zaman adımı ($\Delta t=2x10^{-5}$ s) kullanılarak yapılan analizlerde, seçilen kavitasyon döngüsü t=0.22 ssaniyedeki I noktasından t=0.32 saniyedeki V noktasına kadar uzanmaktadır, bu da bir kavitasyon döngüsü için yaklaşık 0.1 s'lik bir süre ile sonuçlanmaktadır. Daha

küçük zaman adımı analizine benzer şekilde, bu süre analiz boyunca kendini tekrar eder. Dolayısıyla, zaman adımı değeri arttıkça kavitasyon döngüsünün süresinin de arttığını söylemek mümkündür. Şekil 4.17'de görüldüğü gibi, zaman adımındaki bir artışın hem kavitasyon alanında hem de periyotta bir artışa yol açtığı görülmektedir. Bu durum, zamana bağlı kavitasyon oluşumunun daha yüksek zaman adımlarında gerekli hassasiyetle yakalanamamasına bağlanabilir.

Geçerleme (3.2 Validasyon ve Belirsizlik Analizi) bölümü, $\Delta t=10^{-5}$ s'lik bir zaman adımı için çözümün doğruluğunu göstermiştir. Bununla birlikte, kavitasyon periyodu sırasındaki döngülerin özellikleri yaklaşık olarak benzer görünmektedir. Ayrıca, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'daki kaldırma ve direnç kuvveti katsayısı grafiklerinde, kavitasyon alanı grafiğinde olduğu gibi, yüksek zaman adımında daha belirgin periyot oluşumları gözlenmektedir. Ancak farklı zaman aralığı değerlerinde ortalama direnç kuvveti değerleri yaklaşık olarak eşitken (C_D=0.04), zaman adımının artmasıyla ortalama kaldırma kuvveti değerinin bir miktar azaldığı görülmektedir ($\Delta t=10^{-5}$ s için C_L=0.443 ve $\Delta t=2x10^{-5}$ s için C_L =0.28).

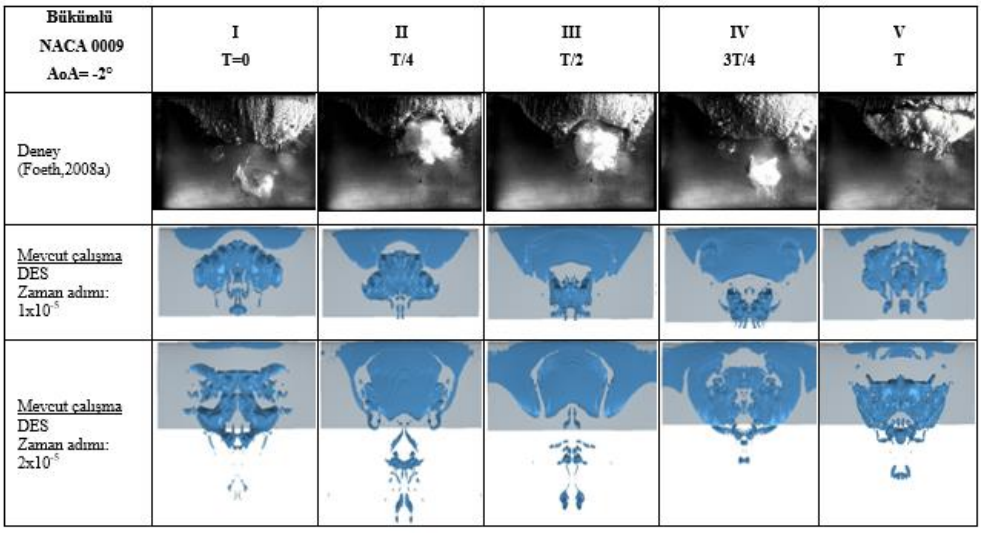


Şekil 4.18 $\Delta t=10^{-5}$ s ve $\Delta t=2x10^{-5}$ s olmak üzere iki farklı zaman adımı değeri için NACA 0009 bükümlü hidrofoiline ait (AoA=-2 derece) kaldırma katsayısı eğrileri.



Şekil 4.19 $\Delta t=10^{-5}$ s ve $\Delta t=2x10^{-5}$ s olmak üzere iki farklı zaman adımı değeri ile -2 derece hücum açısına sahip NACA 0009 bükümlü hidrofoil için direnç katsayısı eğrileri.

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19' den elde edilen genel sonuca göre, zaman adımı arttıkça analizin hassasiyeti azalmakta ve kavitasyon döngüsü daha belirgin hale gelmektedir. Aynı analizler $\Delta t=5x10^{-5}$ s zaman adımı için de gerçekleştirilmiş ve kavitasyon döngüsünün daha da belirginleştiği gözlemlenmiştir. Ancak, deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki önemli farklılıklar nedeniyle, bu kısımda $\Delta t=5x10^{-5}$ s zaman adımı ile elde edilen sonuçlar sunulmamıştır.

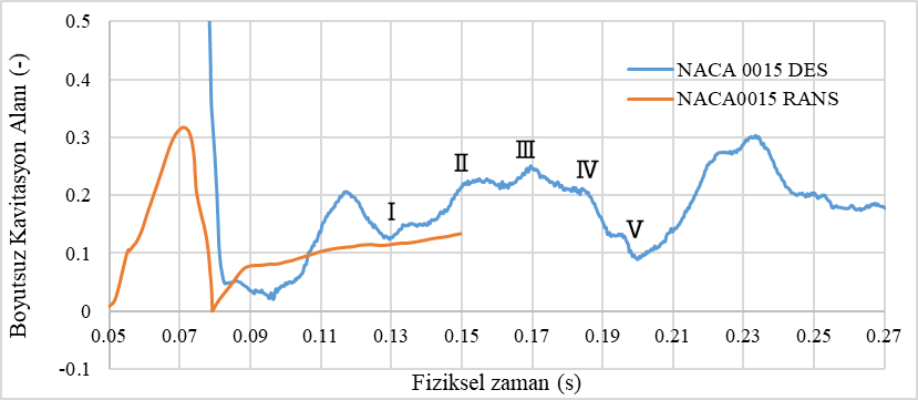


Şekil 4.20 Bükümlü NACA 0009 hidrofoili üzerinde zamana göre kavitasyon gelişimi.

Şekil 4.20'de, DES yönteminden elde edilen bir kavitasyon döngüsü içindeki kavitasyon oluşumu görüntüleri, farklı zaman adımları için deneysel görüntülerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Deney görselleri, Foeth'in (2008a) tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen deneylerin hızlı kamera kayıtlarından alınmıştır. Şekilden de görülebileceği gibi, $\Delta t=10^{-5}$ s zaman adımı için bir döngüden (fiziksel zaman t= 0.176s - 0.24s) elde edilen görüntüler deneysel sonuçlarla tutarlıdır. Ancak zaman adımı $\Delta t=2x10^{-5}$ s için bir döngüden (fiziksel zaman t= 0.22s - 0.32s) elde edilen kavitasyon oluşumlarının deneysel verilere kıyasla biraz daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sebeple deneysel sonuçlarla uyum sağlayan 10^{-5} zaman adımı ile diğer analizlere devam edilmiştir.

4.4 Düşük hücum açılarının RANS ve DES metoduyla kıyaslanması

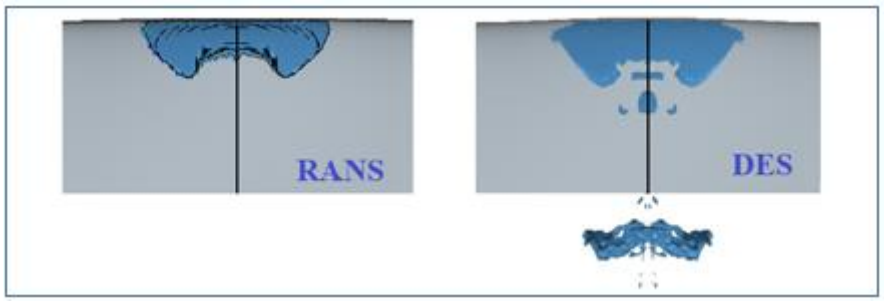
Bu bölümde, düşük hücum açılarında, NACA 0015 ve NACA 0009 kesitli bükümlü, yarı bükümlü ve bükümsüz hidrofoillerin kavitasyonlu ve kavitasyonsuz akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, bölüm 0'de verilen aynı koşullar altında (giriş hızı kavitasyonsuz durum için V=6.75 m/s ve kavitasyonlu durum için V=6.97 m/s) ve $\Delta t=10^{-5}$s zaman adımı için RANS ve DES yöntemleriyle yapılmış olup, sonuçlar kıyaslamalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.21 Bükümlü NACA 0015 hidrofoili (AoA= -2°) için zamana göre kavitasyon gelişimi (RANS ve DES).

Şekil 4.21, bükümlü NACA 0015 hidrofoil üzerindeki kavitasyon alanının zamana bağlı değişimlerini, $\Delta t=10^{-5}$ s zaman adımında ve DES ile RANS yöntemleriyle elde edilen sonuçlara göre göstermektedir. DES'ten elde edilen eğride, kavitasyon döngüsü ve periyodu yaklaşık olarak tekrarlanan tümsek ve çukurlardan açıkça görülebilmektedir. Ortalama kavitasyon alanı, Bükümlü NACA 0009'daki sonuçlara benzer şekilde DES çözümünde RANS'tan biraz daha yüksek olarak elde edilmiştir. Şekil 4.22, her iki yöntemden elde edilen kavitasyon oluşumlarını göstermektedir. Kavitasyon görüntüleri her iki yöntem için de oldukça benzer olmasına rağmen, RANS yöntemi tabaka kavitasyonunun arkasındaki bulut kavitasyonunu yeterince yakalayamamaktadır.

Şekil 4.16'daki NACA 0009 sonuçlarına benzer şekilde, RANS yöntemi kullanılarak yapılan NACA 0015 analizi, kavitasyon alanının belirli bir analiz süresinden sonra değişmediğini gösterirken, DES yöntemi, kavitasyonun doğası gereği gözlemlenen hidrofoil üzerindeki kavitasyon alanının periyodik değişimini belirgin bir şekilde vermektedir. NACA 0015 için kavitasyon döngüsü (t=0.128s-0.198s fiziksel zaman aralığında) NACA 0009 ile benzer şekilde yaklaşık 0.07s olarak bulunmuştur.



Şekil 4.22 Bükümlü NACA 0015 hidrofoil üzerinde RANS ve DES ile elde edilen kavitasyon gelişimi.

DES yönteminde akış karakteristikleri ve buna bağlı olarak kavitasyon gelişimi daha hassas bir şekilde elde edilmektedir. Kavitasyonlu ve kavitasyonsuz akış koşullarında Bükümlü NACA 0015 hidrofoilin kaldırma ve direnç kuvveti katsayıları Tablo 4.3'de Bükümlü NACA 0009 ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. RANS yöntemi kullanılarak yapılan analizde, hidrofoilin sadece giriş (hücum) kenarı yakınında kavitasyon oluşumu gözlemlenmiştir. Ancak DES yönteminde

kanadın giriş kenarında daha fazla miktarda kavitasyon oluşumu gözlenmiş, bunun yanı sıra çıkış kenarında da bulut kavitasyon oluşumu meydana gelmiştir.

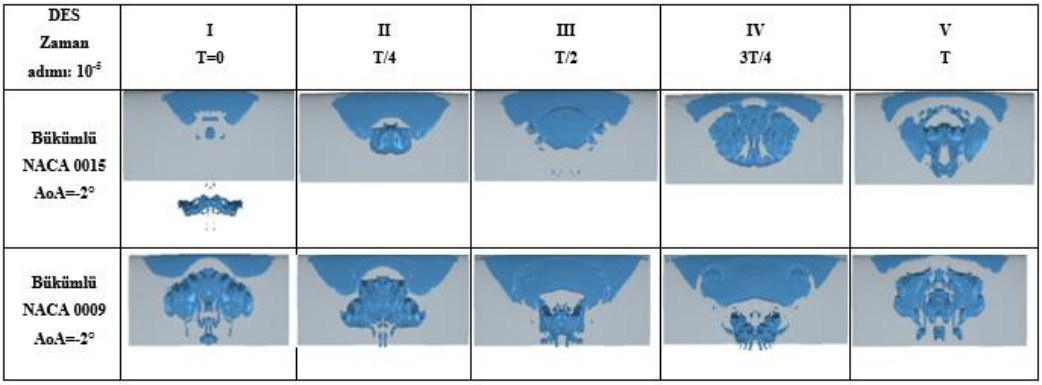
Tablo 4.3 Bükümlü NACA 0015 ve NACA 0009 hidrofoillerinin -2^o hücum açısında kaldırma ve direnç katsayıları.

		Bükümlü NACA 0015		Bükümlü NACA 0009	
		C_L	C_D	C_L	C_D
Kavitasyonsuz akış	**RANS**	0.438	0.0138	0.436	0.0130
Kavitasyonlu akış	**RANS**	0.308	0.0195	0.428	0.0236
	DES	0.334	0.0372	0.443	0.0401

Bükümlü NACA 0015 ve bükümlü NACA 0009 hidrofoillerinin kaldırma ve direnç katsayısı değerleri kavitasyonsuz durumda yaklaşık olarak aynıdır. Ancak, kavitasyonlu akış durumunda hem RANS hem de DES'ten elde edilen kaldırma katsayıları daha kalın kesitli kanat olan bükümlü NACA 0015 için yaklaşık %25 daha azdır.

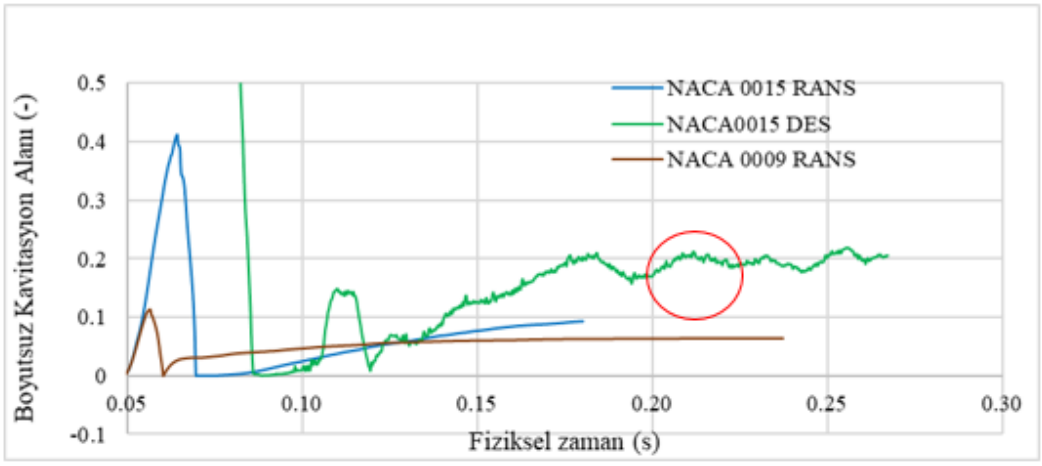
Şekil 4.23'de bir kavitasyon döngüsü içerisinde bükümlü NACA 0015 ve bükümlü NACA 0009 kesitleri için DES yönteminden elde edilen kavitasyon oluşumu görüntüleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Şekil 4.23, bükümlü NACA 0015'in üzerindeki kavitasyon oluşumunun bükümlü NACA 0009'dan daha az olduğunu göstermektedir, ancak Şekil 4.16 ve Şekil 4.21'den kalın kesitli NACA 0015 hidrofoil yüzeyinde kavitasyon alanının nispeten daha büyük olduğu görülebilir.



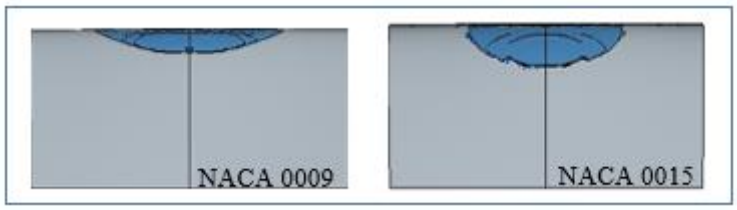
Şekil 4.23 Bir döngü boyunca Bükümlü NACA 0015 ve NACA 0009 hidrofoilleri üzerindeki kavitasyon oluşumu görünümleri

Şekil 4.24'de, NACA 0015 ve NACA 0009 kesitli yarı bükümlü hidrofoillerin kavitasyonsuz ve kavitasyonlu akış koşullarında RANS yöntemi kullanılarak $\Delta t=10^{-5}$ s zaman adımı ile gerçekleştirilmiş olan analizleri görülmektedir. Ek olarak, yarı bükümlü NACA 0015 hidrofoilinin aynı koşullar altında DES yöntemi ile akış analizi gerçekleştirilmiştir. RANS yönteminden elde edilen ortalama kavitasyon alanı NACA 0015 hidrofoili için biraz daha yüksektir. Benzer şekilde, Bükümlü NACA 0015 hidrofoili için ortalama kavitasyon alanı DES çözümünde RANS'a kıyasla biraz daha yüksektir.



Şekil 4.24 Yarı bükümlü NACA 0009 ve NACA 0015'in AoA= +1 derece hücum açısında boyutsuz kavitasyon alanı eğrileri.

Şekil 4.25, +1 derece hücum açısı için RANS yöntemiyle gerçekleştirilen analizlerden elde edilen yüzeydeki kavitasyon oluşumunu göstermektedir. Görüntüler, analizlerin yakınsadığı ve kanat üzerindeki kavitasyonun neredeyse hiç değişmediği zamanlardan alınmıştır. Kavitasyon oluşumlarının yaklaşık olarak benzer olduğu gözlemlendiği şekillerde bulut kavitasyonunun yakalanmadığı da dikkat çekmektedir.



Şekil 4.25 Yarı bükümlü NACA 0009 ve NACA 0015 üzerinde, AoA= +1^{o}'de (RANS) kavitasyon oluşumu görüntüleri.

Yarı bükümlü hidrofoillerin kavitasyonlu ve kavitasyonsuz akış koşullarında, DES ve RANS yöntemlerinden elde edilen kaldırma ve direnç katsayıları Tablo 4.4'te verilmiştir.

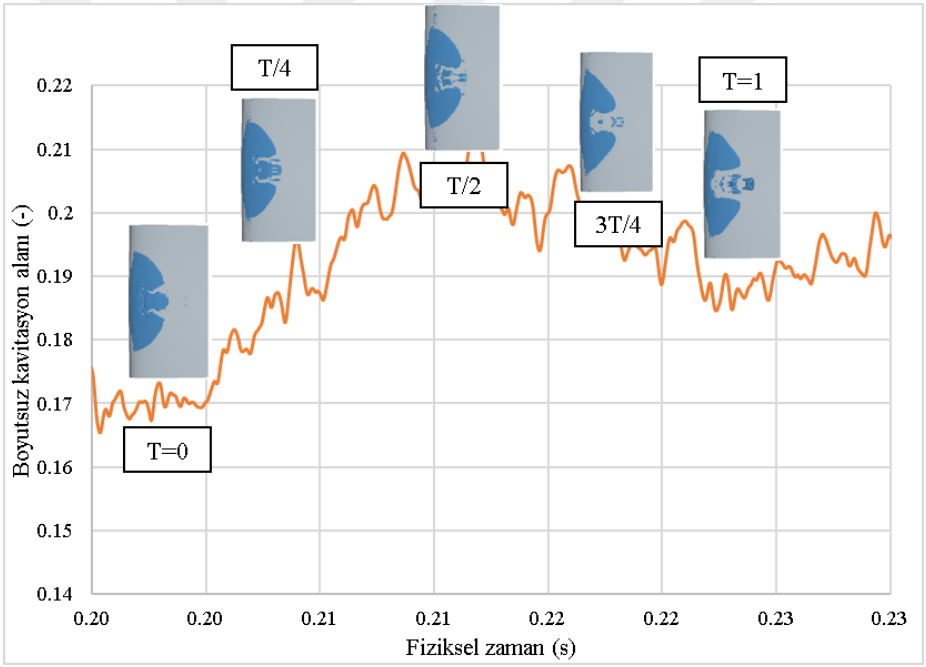
Tablo 4.4 Yarı bükümlü NACA 0009 ve NACA 0015'in AoA= +1^{o}'deki kaldırma ve direnç katsayıları.

		NACA 0015		**NACA 0009**	
		C_L	**C_D**	**C_L**	**C_D**
Kavitasyonsuz akış	RANS	0.346	0.0109	0.339	0.0105
Kavitasyonlu akış	RANS	0.345	0.0124	0.304	0.0111
	DES	0.226	0.0136	-	-

Kavitasyonsuz akış senaryosunda yarı bükümlü NACA 0015 ve yarı bükümlü NACA 0009 hidrofoilleri için kaldırma ve direnç kuvvet katsayısı değerlerinin yaklaşık olarak eşit olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, kavitasyonlu akış analizinde RANS'tan elde edilen kuvvet katsayıları da benzer değerler göstermektedir. Ancak, DES'ten elde edilen yarı bükümlü NACA 0015

hidrofoilinin kaldırma katsayıları RANS sonuçlarına kıyasla küçük farklılıklar göstermektedir.

Şekil 4.26, yarı bükümlü bir NACA 0015 hidrofoil kesiti için DES yönteminden elde edilen bir kavitasyon döngüsü içindeki kavitasyon oluşumu görüntülerini sunmaktadır (Şekil 4.24'de daire içine alınmış bölge ile gösterilmiştir). Şekilde gösterildiği üzere, AoA= +1 derecedeki yarı bükümlü hidrofoil için bir kavitasyon döngüsü içerisindeki kavitasyon oluşumu nispeten sabit kalmaktadır. Bununla birlikte, -2 derece hücum açısındaki bükümlü hidrofoiller için kavitasyonun gelişimi ve tekrarı daha net bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu gözlem, hidrofoillerin zamana bağlı boyutsuz kavitasyon alanı grafikleri ile de desteklenmektedir (Şekil 4.16, Şekil 4.21 ve Şekil 4.26).



Şekil 4.26 Bir döngü boyunca yarı bükümlü NACA 0015 hidrofoili üzerindeki kavitasyon oluşumu görüntüleri.

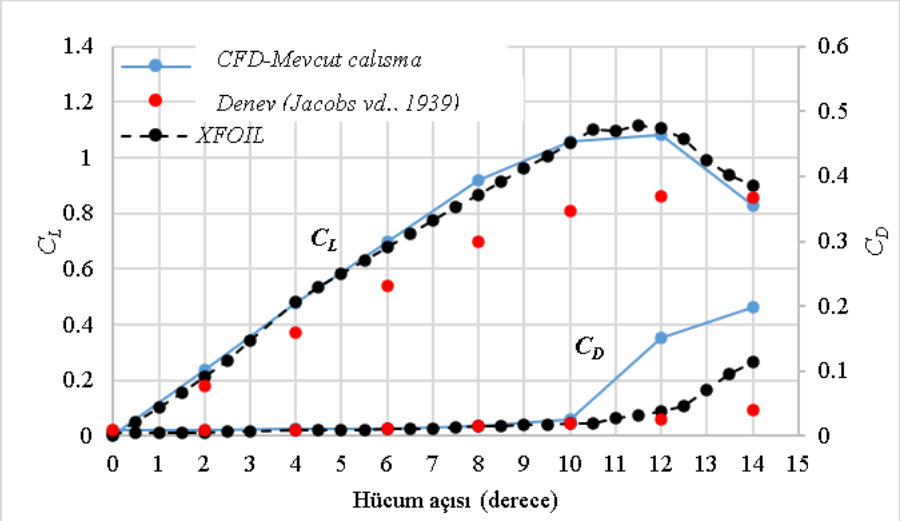
Şekil 4.27'de bükümsüz üç boyutlu NACA 0009 hidrofoilinin, kavitasyonsuz akış koşullarında hücum açısına bağlı olarak kaldırma ve direnç katsayılarının; bu çalışmadaki RANS yöntemi, XFOIL (Re= 1 milyon ve N_{crit}=9 için) ve Re= $1.3x10^6$

için deneysel sonuçlarla (Jacobs ve Sherman, 1939) karşılaştırılması gösterilmektedir.

NACA 0009 hidrofoili (kanat açıklığı oranı=2) için kavitasyonsuz akış analizleri, Bölüm 0'de Delft Twist-11 hidrofoilinin için kullanılan aynı fiziksel koşullar altında, 0° ila 14° hücum açıları, giriş akış hızı V=6.75 m/s, $Re=1.14x10^6$ için gerçekleştirilmiştir.

XFOIL, deneysel verilerle doğrulanan Karman-Tsien sıkıştırılabilirlik düzeltmeli (Drela, 1989) potansiyel tabanlı bir lineer-vortisite panel yöntemidir (Cruz *vd.*, 2022). Bu yöntem, hidrofoillerin sayısal sonuçlarının karşılaştırılması için literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır.

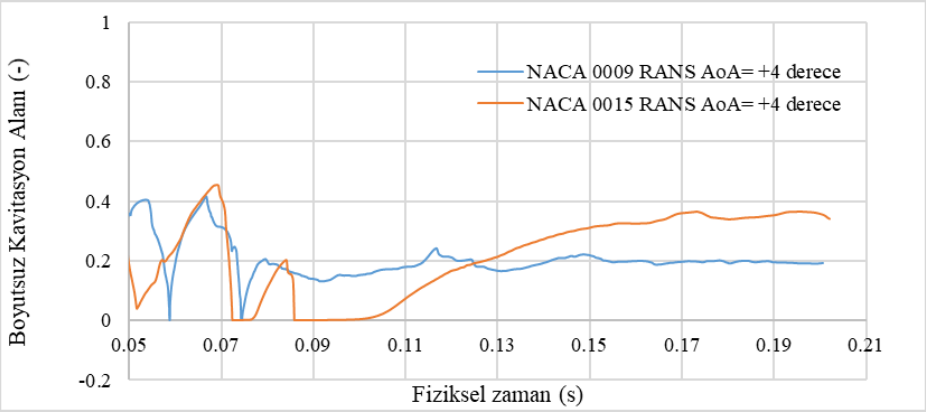
Şekil 4.27, CFD ve XFOIL kaldırma katsayısı sonuçları arasında yaklaşık 6 derecelik hücum açısına kadar iyi bir uyum olduğunu göstermektedir. Daha yüksek hücum açılarında, sonuçlar aynı olmasa da makul bir benzerlik göstermeye devam etmektedir. Deneysel veriler, 4 ila 12 derece arasında hem CFD hem de XFOIL tahminlerinden biraz sapmakta ve sürekli olarak daha düşük kaldırma katsayıları üretmektedir. Bu çalışmada kullanılan deneysel veriler 1930'larda yapılan deneylerden elde edilmiştir (Jacobs ve Sherman, 1939). Direnç ve kaldırma ölçümlerinin hassasiyeti, o dönemde mevcut olan deneysel araçlar ve teknikler nedeniyle muhtemelen sınırlı olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle deneysel değerler incelendiğinde özellikle kaldırma katsayısı değerlerindeki farklılık beklenen bir sonuçtur. Bununla birlikte, her üç yöntem de kritik hücum açısının 11 ila 12 derece arasında gerçekleşeceğini öngörmektedir. Direnç katsayısı eğrileri de yaklaşık 10 dereceye kadar olan hücum açıları için iyi bir uyum göstermektedir.



Şekil 4.27 Bükümsüz NACA 0009'un hücum açısına bağlı olarak kaldırma ve direnç katsayıları.

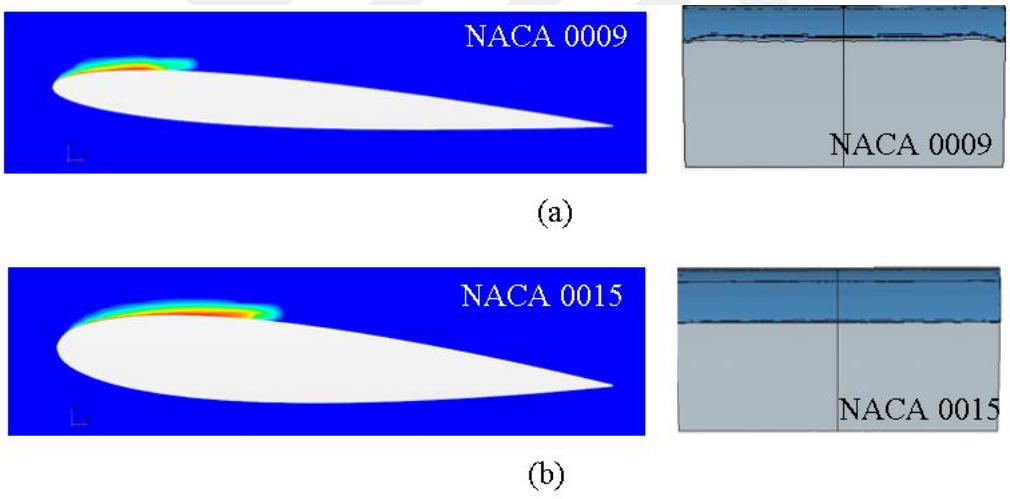
Bükümsüz üç boyutlu NACA 0009 ve NACA 0015 hidrofoillerinin kavitasyonsuz ve kavitasyonlu akış analizleri, daha önce sunulan bükümlü ve yarı bükümlü hidrofoil analizleriyle aynı koşullar altında +4° hücum açısı için gerçekleştirilmiştir.

Hidrofoil yüzeylerindeki kavitasyon alanının zamana bağlı değişimleri Şekil 4.28'de, kavitasyon oluşumu görüntüleri ise Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Şekil 4.29 (a) ve Şekil 4.29 (b)'de, bükümsüz NACA 0009 ve NACA 0015'in orta kesitinde (y/b=0.5) oluşan kavitasyon kalınlığı görüntüleri görülmektedir.



Şekil 4.28 AoA=+4 derece hücum açısında bükümsüz NACA 0009 ve NACA 0015'in boyutsuz kavitasyon alanı eğrileri.

Şekil 4.29 'dan da anlaşılacağı üzere, her iki hidrofoilde de kavitasyon başlangıcının şekli, kesitin ön kenarına yakın düz bir şerit olarak görünmektedir. Şekil 4.28'deki kavitasyon alanı eğrilerinden ve Şekil 4.29'daki kavitasyon oluşumu görüntülerinden, bükümsüz NACA 0015 hidrofoil yüzeyi etrafındaki ortalama kavitasyon alanının biraz daha büyük olduğu görülebilir. Kavitasyonun artan kesit kalınlığı ile büyümesi, bu çalışmadaki önceki analizlerde bükümlü ve yarı bükümlü hidrofoiller için benzer şekilde gerçekleşmiştir. Genellikle kavitasyon oluşan bir hidrofoilin kesit kalınlığı arttıkça kavitasyon alanının ve kavitasyon uzunluklarının azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir ((Kinnas, 1991); (Chau *vd.*, 2004)). Ancak bazı deneysel çalışmalar kavitasyon oluşumunun kesit şekli, kalınlık, hücum açısı ve kavitasyon sayısına bağlı olarak farklı şekilde değişebildiğini ve kalınlık oranı arttıkça kavitasyon oluşum eğiliminin arttığını göstermiştir ((Fujii *vd.*, 2007); (Sarraf *vd.*, 2007)).



Şekil 4.29 Bükümsüz NACA 0009 hidrofoil (a) ve NACA 0015 hidrofoil (b) için 2 boyutlu hacim oranı konturları ve 3 boyutlu kavitasyon gelişim görüntüleri (AoA= +4 derecede (RANS).

Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'dan görülebileceği gibi, hücum açısı +4 derece olduğunda, daha kalın bir kesite sahip olan NACA 0015 hidrofoil etrafında daha fazla kavitasyon meydana gelmektedir. Bu beklenmedik bir sonuç olsa da yukarıda da

belirtildiği gibi geometrik veya fiziksel koşullar kavitasyon oluşumunu farklı şekilde değiştirebilmektedir.

Tablo 4.5 AoA=+4 derecede bükümsüz hidrofoillerin kaldırma ve direnç katsayıları.

	NACA 0009		**NACA 0015**	
	C_L	**C_D**	**C_L**	**C_D**
Kavitasyonsuz akış	0.495	0.0102	0.496	0.0148
Kavitasyonlu akış	0.510	0.0220	0.480	0.0228

Tablo 4.5'de kavitasyonlu ve kavitasyonsuz akış koşullarında bükümsüz hidrofoillerin RANS yöntemlerinden elde edilen kaldırma ve direnç katsayıları verilmiştir. Tablodan, hidrofoilin kesit kalınlığındaki artışın kavitasyonsuz durumda kaldırma kuvveti katsayısı üzerinde çok az etkisi olduğu, ancak kavitasyonlu durumda hafif bir düşüşe yol açtığı görülmektedir. NACA 0009 kesitli hidrofoil için, kavitasyon oluşumu kaldırma kuvveti katsayısında çok az bir artışa neden olurken, diğer kesit için az miktarda bir düşüşe neden olmaktadır.

4.5 Sonuçlar

Bu bölümde yapılan çalışmaların sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Durağan (Kararlı) RANS çözümü, kavitasyonsuz akış koşullarında bükümlü hidrofoil performansının tahmininde yeterli doğruluk sağlarken, Zamana Bağlı RANS (URANS) yöntemi, kavitasyonlu akışta bükümlü hidrofoil performansının tahmininde ($\Delta t=10^{-5}$ s zaman adımı değerinde) literatürle uyumlu sonuçlar verebilmektedir. Bununla birlikte, RANS yöntemiyle kavitasyon oluşumu, özellikle bulut kavitasyonu, tam olarak yakalanamamakta ve kavitasyon süresi RANS yöntemiyle doğru bir şekilde belirlenememektedir.
- Kavitasyonlu akışta aynı geometri için ve aynı koşullar altında, DES analizinde elde edilen kavitasyon oluşumu, beklendiği gibi RANS'a göre her zaman daha

büyüktür. Bunun sebebi RANS yöntemi ile bulut kavitasyonunun yakalanamamasıdır.

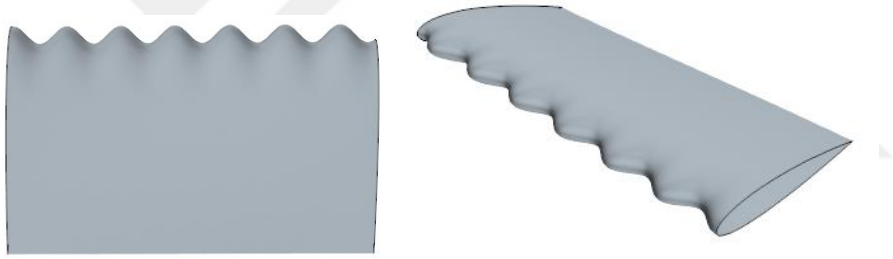
- Hidrofoil etrafındaki kavitasyon döngüsünü ve bir döngü içerisindeki kavitasyon oluşum aşamalarını doğru bir şekilde yakalayabilmek için, DES yöntemi, $\Delta t=10^{-5}$ s zaman adımıyla yeterli doğrulukta sonuç vermektedir. RANS çözümlerinde, yaklaşık 4.5 milyon toplam ağ örgüsü elemanı ve birinci dereceden ayrıklaştırma şeması yeterli olurken, DES yöntemi, incelenen koşullar için yaklaşık 12 milyon ağ örgüsü elemanı ve ikinci dereceden ayrıklaştırma şemaları gerektirmektedir.
- Hidrofoilin hücum açısı ve bükümlülüğü arttıkça zamana bağlı kavitasyon karakteristiklerini yakalamak zorlaşmaktadır. Dolayısıyla bu zorluk, çok daha fazla ağ örgüsü elemanı ve çok daha küçük zaman adımları kullanılarak aşılabilir.
- Bükümlü NACA 0015 hidrofoili için kavitasyonun bir periyot içerisindeki kavitasyon aşamaları belirgin bir şekilde elde edilebilirken, yarı bükümlü olanda bir döngü içindeki faz oluşumları oldukça benzerdir.
- Kavitasyon olmadığı durumda, hidrofoilin kesit kalınlığındaki değişimin, özellikle küçük hücum açılarında, kaldırma kuvveti üzerinde neredeyse hiçbir etkisi yoktur.
- Kavitasyonlu akışta NACA 0015 kesitli tüm hidrofoillerde kaldırma kuvvetinin NACA 0009'a göre daha fazla azaldığı görülmektedir. Hidrofoilin bükümlülüğünün arttırılması daha belirgin etkiye neden olmaktadır.
- Kavitasyon analizinde, DES yönteminde zaman adımını artırmak, özellikle kaldırma ve direnç katsayısı grafiklerinde, kavitasyon oluşumu döngüsünü daha görünür hale getirir, ancak kaldırma kuvveti katsayısını ve kavitasyon görüntülerini bir periyot içindeki aşamalarda doğru bir şekilde tahmin etmek için yetersizdir. Kavitasyon periyodu da yaklaşık olarak zaman adımıyla orantılı olarak artar.

Bu bölümdeki analizler tamamlandıktan sonra, kalın kesitli hidrofoile (NACA 0015) giriş ucu tüberkülü eklenerek kavitasyonlu ve kavitasyonsuz akıştaki etkisi Bölüm 5'de incelenmiştir.

5

TÜBERKÜLLÜ KANATLAR İÇİN KAVİTASYONLU AKIŞ ANALİZLERİ VE SONUÇLARI

Önceki bölümlerde gerçekleştirilen analizler sonucunda, yarı bükümlü, kalın kesitli hidrofoil modeli seçilerek bu hidrofoile tüberkül ilavesi yapılmıştır (Şekil 5.1). Ön-kenarı tüberküllü geometriyi oluşturmak için Lohry *vd.*, (2012) çalışmasında detaylı olarak açıklanan kesitlerin kaydırılması yöntemi kullanılmıştır. Hidrofoilin ön kenarına ilave edilen tüberkül geometrisi genlik 0.04c, dalga boyu ise 0.25c alınarak oluşturulmuştur (Johari H., 2008). Burada; c kesitin kord uzunluğudur.

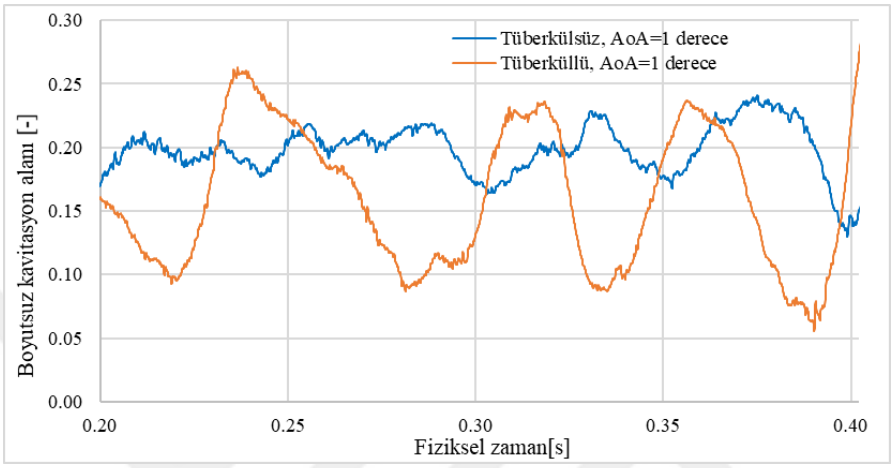


Şekil 5.1.Tüberküllü hidrofoil

Oluşturulan yeni tüberküllü hidrofoillerle, tüberkülsüz hidrofoillerin kavitasyonlu akış analizleri farklı hücum açılarında gerçekleştirilmiştir. Analizler zamana bağlı olup, 0.2 saniye civarında periyodik davranış göstermeye başlamaktadır. Bu nedenle bu kısımda verilen grafiklerde başlangıç zamanı olarak 0.2 saniye seçilmiştir. Tüm analizlerde Reynolds sayısı 1.18×10^6 ve kavitasyon sayısı 1.07'dir. Analizde kullanılan akış koşulları Tablo 4.1'de detaylı olarak verilmiştir.

5.1 1 derece hücum açısı analizleri

Şekil 5.2, +1 derecelik hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoil yüzeyinde oluşan kavitasyon alanı eğrilerini karşılaştırmaktadır.



Şekil 5.2 AoA=1º hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz yarı bükümlü hidrofoillerin boyutsuz kavitasyon alanı

Grafikteki eğrilere bakıldığında en önemli bulgu, tüberküllü hidrofoillerde kavitasyon oluşumunun daha salınımlı olması, tüberkülsüz hidrofoillerde ise kavitasyon alanının zaman içinde oldukça az değişim göstermesidir. Tüberkülsüz bir hidrofoil yüzeyindeki kavitasyon alanı 0.16 ile 0.24 arasında değişirken, tüberküllü bir hidrofoilde bu oran 0.08 ile 0.26 arasındadır. Dolayısıyla, +1 derecelik hücum açısında tüberküllü hidrofoilde daha az kavitasyon meydana geldiği söylenebilir.

Şekil 5.2'de sunulan eğrilere bakıldığında, tüberkülsüz analizde, 0.2 ile 0.4 saniyelik fiziksel zaman aralığında en yüksek boyutsuz kavitasyon alanı değerine yaklaşık 0.38 saniyede ulaşıldığı görülmüştür. Tüberküllü analizde ise en yüksek kavitasyon alanı değeri yaklaşık 0.36 saniyeye denk gelmektedir. Bu fiziksel zamanlardaki kavitasyon oluşumu görüntüleri Şekil 5.3'de gösterilmektedir.



(a) (b)

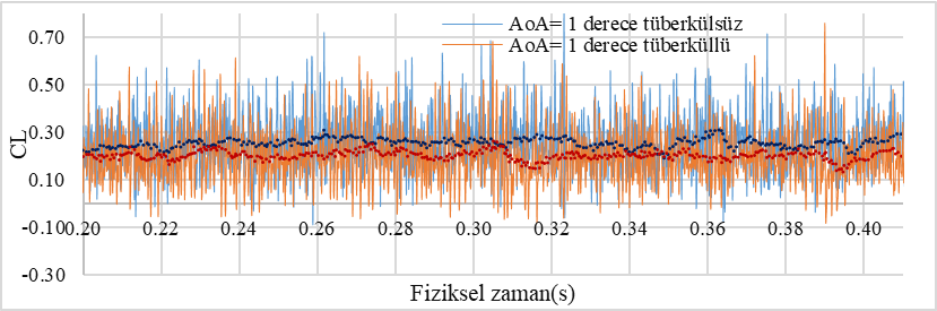
Şekil 5.3 Yarı bükümlü tüberkülsüz (a) ve tüberküllü(b) hidrofoil üzerindeki maksimum kavitasyon oluşumu (+1^o hücum açısında)

Kavitasyon zamana bağlı bir olay olduğundan, hidrofoilin ürettiği kaldırma ve direnç değerleri de zamanla değişmektedir. Bu değerler, +1 derece hücum açısı için minimum ve maksimum değer aralığı olarak Tablo 5.1'de verilmiştir.

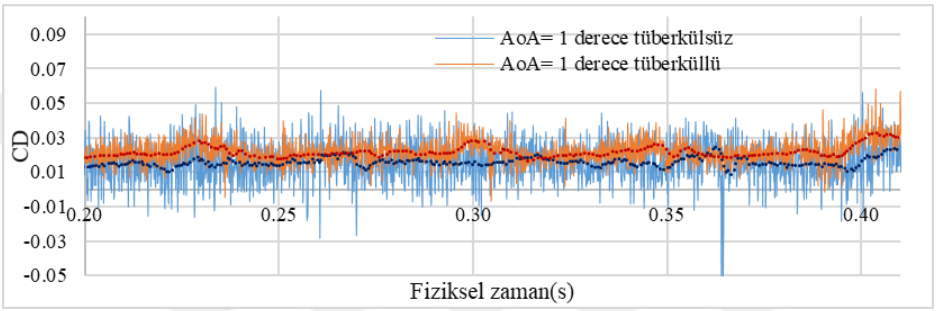
Tablo 5.1 Yarı bükümlü tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin kaldırma ve direnç katsayılarının 1 derece hücum açısında karşılaştırılması

AoA = +1^o	C_L	C_D
Tüberkülsüz	0.12-0.35	0.0052-0.028
Tüberküllü	0.091-0.33	0.014-0.029

Tablo 5.1'de görüldüğü üzere tüberküllü hidrofoilde kaldırma katsayısı azalırken direnç katsayısı artmıştır. Hücum açısının 1 derece olduğu durumdaki direnç ve kaldırma katsayılarının zamanla değişimi grafikleri Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de görülmektedir. Grafiklerde, elde edilen kaldırma ve direnç katsayılarını daha kolay yorumlayabilmek için bu değerlerin hareketli ortalaması alınmış, bu eğriler ise daha koyu renkli olarak gösterilmiştir. Her iki grafikte de ortalama değerler göz önüne alındığında, tüberkülsüz hidrofoilde daha yüksek kaldırma değerleri görülürken, direnç katsayısında da benzer şekilde tüberkülsüz hidrofoilde daha az direnç görülmüştür.



Şekil 5.4 1 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin kaldırma katsayısının kıyaslanması

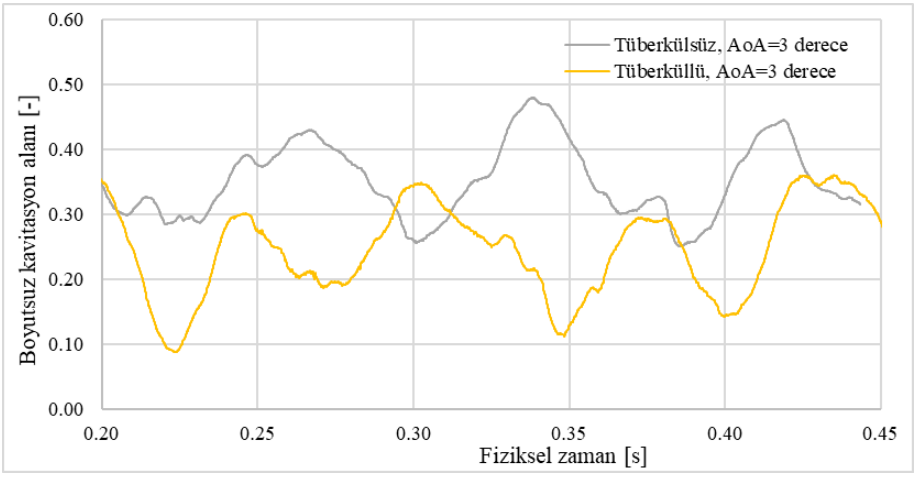


Şekil 5.5 1 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin direnç katsayısının kıyaslanması

Her iki grafikte de ortalama değerler göz önüne alındığında, tüberkülsüz hidrofoilde daha yüksek kaldırma değerleri görülürken, direnç katsayısında da benzer şekilde tüberkülsüz hidrofoilde daha az direnç görülmüştür.

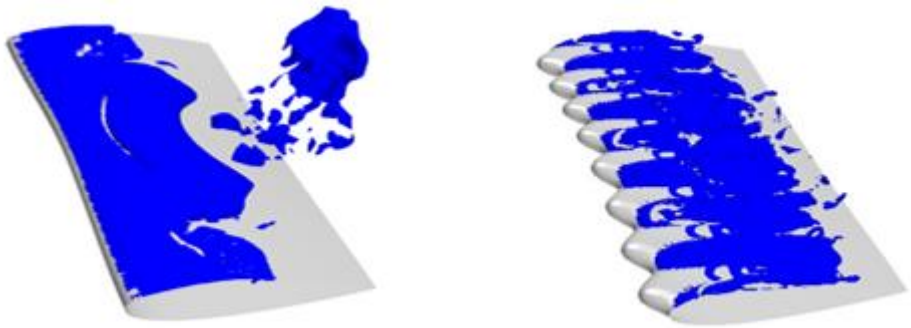
5.2 3 derece hücum açısı analizleri

Şekil 5.6'da tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin kavitasyon alanı eğrileri 3 derece hücum açısı için karşılaştırılmıştır. Her iki hidrofoil için elde edilen eğrilere bakıldığında, tüberküllü hidrofoilde kavitasyon periyodunun belirginliğinin ve kavitasyon oluşumunun azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.6 AoA=3^{o} hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz yarı bükümlü hidrofoillerin boyutsuz kavitasyon alanı

Tüberkülsüz analizde, en yüksek kavitasyon alanı değerine 0.2 ila 0.4 saniyelik fiziksel zaman aralığında yaklaşık 0.34 saniyede ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Tüberküllü analizde, en yüksek kavitasyon alanı değeri yaklaşık 0.30 saniyeye karşılık gelmektedir. Bu fiziksel zamanlardaki kavitasyon oluşumu görüntüleri Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 5.7 Yarı bükümlü tüberkülsüz (a) ve tüberküllü(b) hidrofoiller üzerindeki maksimum kavitasyon oluşumu (+3^{o} hücum açısında)

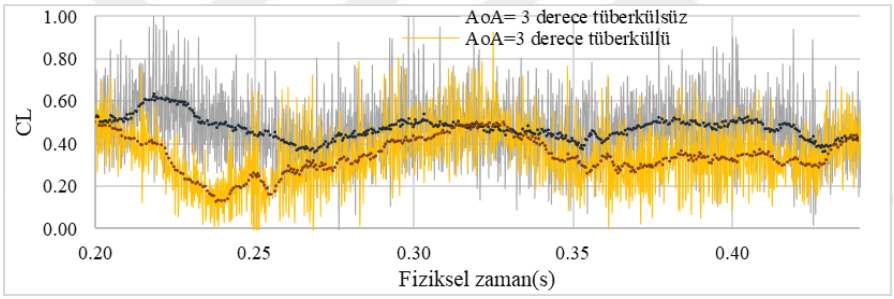
Tablo 5.2'te +3 derece hücum açısında elde edilen kaldırma ve direnç katsayısı değerleri gösterilmektedir.

Tablo 5.2 Yarı bükümlü tüberkülsüz ve tüberküllü hidrofoillerin kaldırma ve direnç katsayılarının 3 derecelik hücum açısında karşılaştırılması

AoA = +3º	C_L	C_D
Tüberkülsüz	0.25-0.65	0.041-0.083
Tüberküllü	0.15-0.55	0.030-0.090

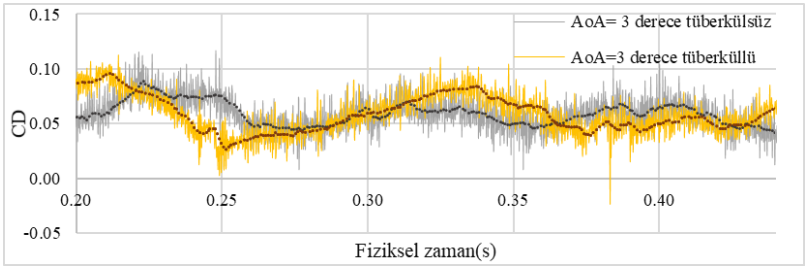
Tabloya bakıldığında tüberküllerin kaldırma kuvvetine etkisinin negatif olduğu, buna karşın direnç değerlerinin oldukça benzer olduğu görülmektedir.

3 derece hücum açısında kaldırma ve direnç katsayılarının zamanla değişimi Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da ayrıca verilmiştir. Burada koyu renkle gösterilmiş olan hareketli ortalama değerlerine bakıldığında tüberküllü hidrofoil, tüberkülsüz olana göre daha az kaldırma kuvveti üretmektedir.



Şekil 5.8 3 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin kaldırma katsayısının kıyaslanması

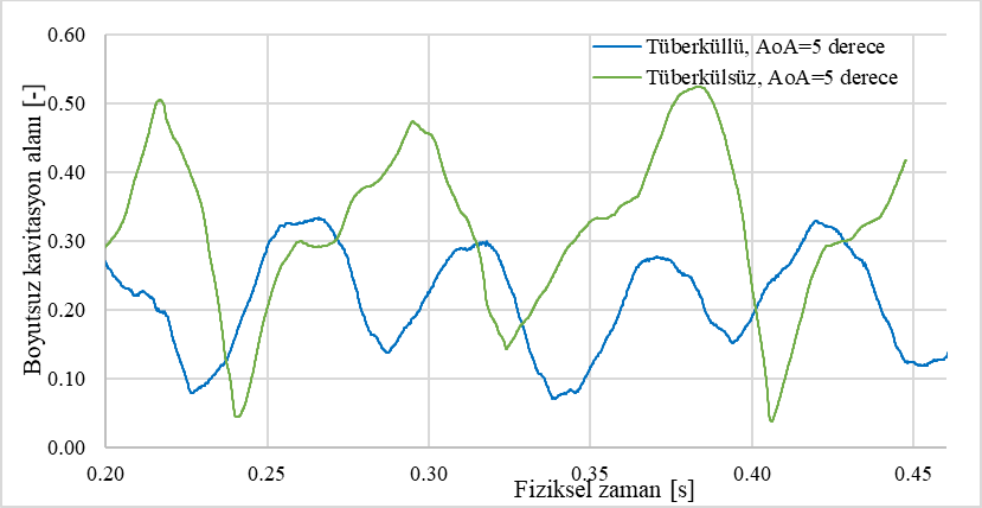
Şekil 5.9'daki direnç katsayısı değerlerine bakıldığında ise her iki hidrofoilin benzer direnç kuvveti ürettiği söylenebilir. Bu durumda tüberkülsüz hidrofoil, bu hücum açısında daha iyi performans göstermektedir.



Şekil 5.9 3 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin direnç katsayısının kıyaslanması

5.3 5 derece hücum açısı analizleri

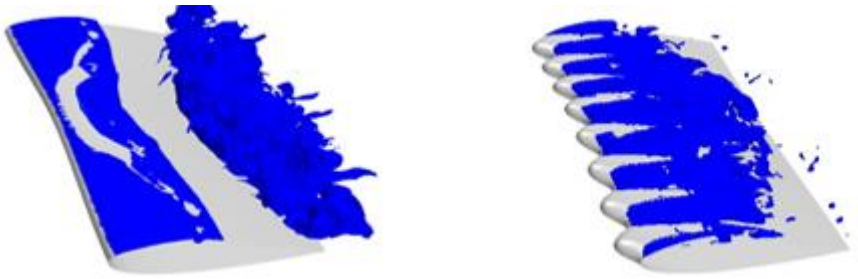
Şekil 5.10'da görülen eğriler, +5 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz yarı bükümlü hidrofoiller üzerindeki kavitasyon oluşumunu göstermektedir.



Şekil 5.10 AoA=5^{o} hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz yarı bükümlü hidrofoillerin boyutsuz kavitasyon alanı

Hidrofoiller +5 derecelik hücum açısında analiz edildiğinde, tüberküllü hidrofoilde belirgin bir şekilde daha az kavitasyon gözlemlenmiştir. Ayrıca tüberkülün kavitasyon başlangıç süresini kısalttığı da açıkça görülmektedir.

Tüberkülsüz analizde, en yüksek kavitasyon alanı değerine yaklaşık 0.38 saniyede ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Tüberküllü analizde ise, en yüksek kavitasyon alanı değeri yaklaşık 0.30 saniyeye karşılık gelmektedir. Bu fiziksel zamanlardaki kavitasyon oluşumu görüntüleri Şekil 5.11'te gösterilmiştir.



(a) (b)

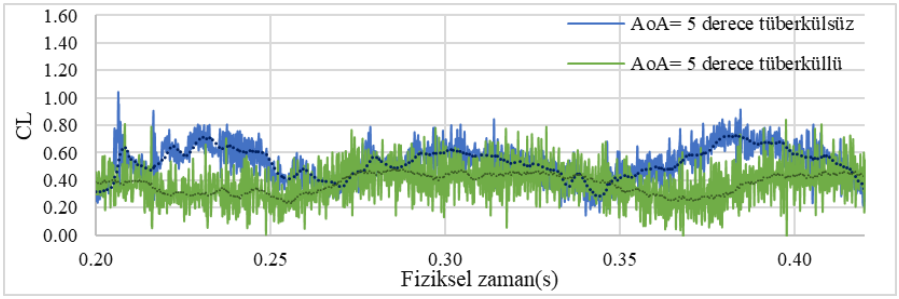
Şekil 5.11 Yarı bükümlü tüberkülsüz (a) ve tüberküllü (b) hidrofoiller üzerindeki maksimum kavitasyon oluşumu (+5^{o} hücum açısında)

Kavitasyonda görülen olumlu etkinin aksine Tablo 5.3'te kaldırma ve direnç katsayılarında azalma görülmektedir.

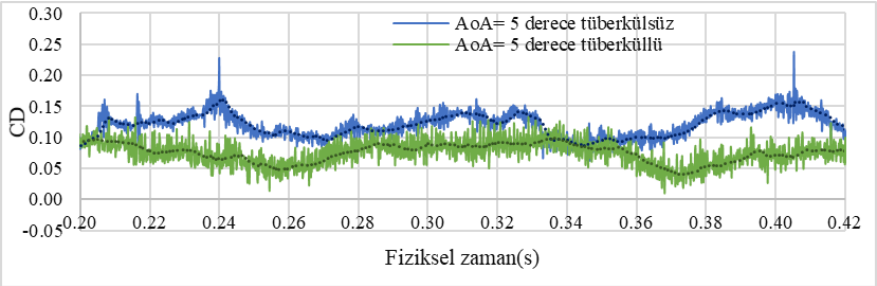
Tablo 5.3 Yarı bükümlü kesitli hidrofoillerin kaldırma ve direnç katsayılarının 5 derecelik hücum açısında karşılaştırılması

AoA = +5º	C_L	C_D
Tüberkülsüz	0.20-0.80	0.08-0.185
Tüberküllü	0.22-0.53	0.04-0.11

Tablo 5.3'e göre, +5 derecelik hücum açısında, tüberküllü hidrofoil, tüberkülsüz hidrofoil ile karşılaştırıldığında hem daha düşük kaldırma kuvveti hem de daha az direnç üretmektedir.



Şekil 5.12 5 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin kaldırma katsayısının kıyaslanması



Şekil 5.13 5 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin direnç katsayısının kıyaslanması

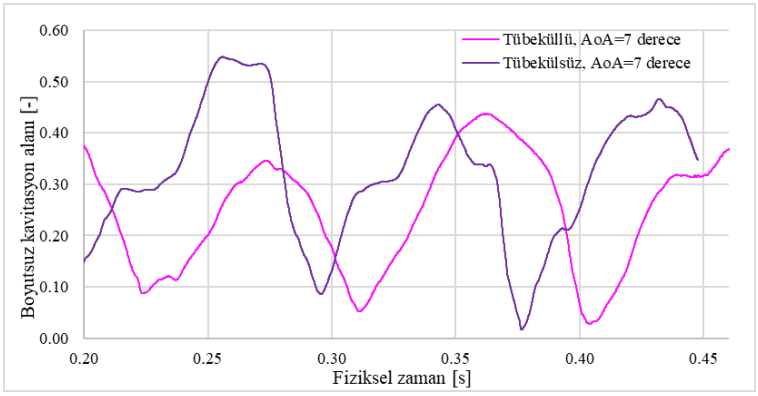
Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'deki kaldırma ve direnç katsayıları grafiğindeki hareketli ortalamalara bakıldığında da bu durum açıkça görülmektedir. Tüberküllü hidrofoillerin kaldırma kuvveti çok değişmemesine rağmen, direncin düşmesi sebebiyle hidrodinamik performansının daha yüksek olduğu görülmektedir.

5.4 7 derece hücum açısı analizleri

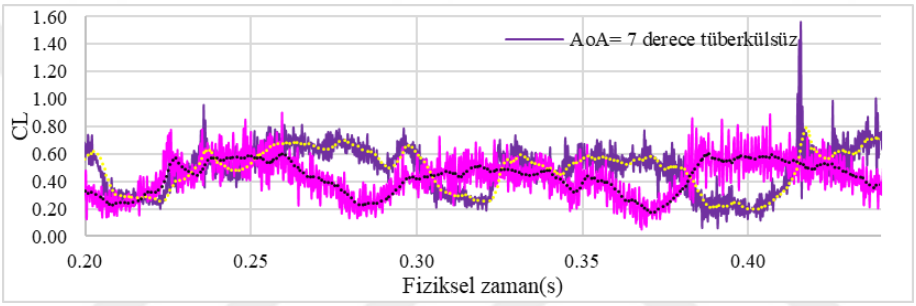
Şekil 5.14 incelendiğinde, yüksek hücum açısında tüberküllü hidrofoillerde daha az kavitasyon oluştuğu ve periyodun da bir miktar azaldığı görülmektedir. Önceki hücum açılarındaki değerlendirmelere benzer şekilde, +7 derece hücum açısında da kaldırma ve direnç katsayıları tüberküllü ver tüberkülsüz hidrofoiller için kıyaslanmıştır.

Tablo 5.4 Yarı bükümlü tüberkülsüz ve tüberküllü hidrofoillerin kaldırma ve direnç katsayılarının 7 derecelik hücum açısında karşılaştırılması

AoA = +7º	**C_L**	**C_D**
Tüberkülsüz	0.68 – 0.27	0.095
Tüberküllü	0.65 – 0.23	0.075

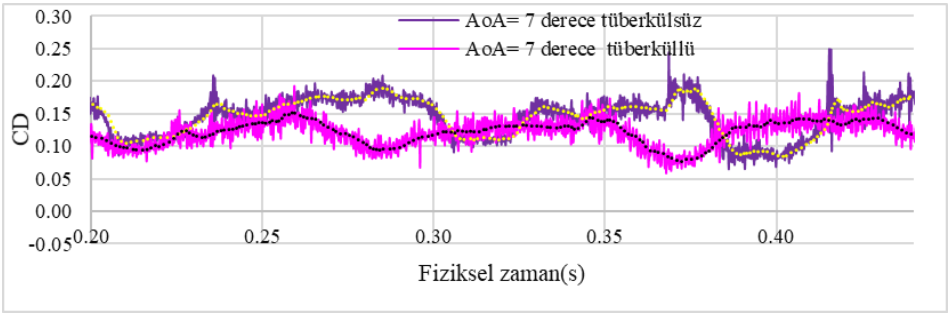


Şekil 5.14 AoA=7º hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz yarı bükümlü hidrofoillerinin boyutsuz kavitasyon alanı



Şekil 5.15 7 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin kaldırma katsayısının kıyaslanması

Kaldırma katsayısı grafiğine (Şekil 5.15) bakıldığında, tüberkülsüz ve tüberküllü hidrofoilde çok benzer bir karakteristik görülmesine karşın, direnç katsayısı grafiğinde (Şekil 5.16) tüberküllüde daha az direnç oluştuğu gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak tüberküllü hidrofoilin, yüksek hücum açılarında daha fazla performans sağladığı sonucuna ulaşılabilir.



Şekil 5.16 7 derece hücum açısında tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoillerin direnç katsayısının kıyaslanması

Her iki hidrofoile ait maksimum kavitasyon oluşumu görüntüsü Şekil 5.17'de görülmektedir. Burada tüberküllerin, kanat üzerinde daha düzenli bir kavitasyon alanı oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 5.17 Yarı bükümlü tüberkülsüz (a) ve tüberküllü (b) hidrofoiller üzerindeki maksimum kavitasyon oluşumu (+**7**^{o} hücum açısında)

Şekil 5.2, Şekil 5.6, Şekil 5.10 ve Şekil 5.14'deki grafikler dikkatlice incelendiğinde, tüberkülsüz hidrofoillerde daha az kavitasyon oluşumu görülmektedir. Özellikle 1, 3 ve 5 derece hücum açılarında, tüberkül yapılarının, yüzeyde oluşan tabaka kavitasyonunu parçalayıp daha belirgin ve kısa süreli periyoda sahip oluşumlara sebep olduğunu söylemek mümkündür. 7 derecede ise, kavitasyon periyodu her iki hidrofoilde neredeyse aynı olurken, oluşan kavitasyon miktarı tüberküllü hidrofoilde azalmaktadır. Bu durum tüberküllerin pasif akış kontrolcüsü gibi davrandığını ifade eden çalışmaları desteklemektedir ((Mishra ve De, 2021),(Fish ve Lauder, 2006)). Ancak tüberküllerin kavitasyon oluşumu üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olduğu yorumunun incelenen mevcut akış koşulları için geçerli olduğu belirtilmedir.

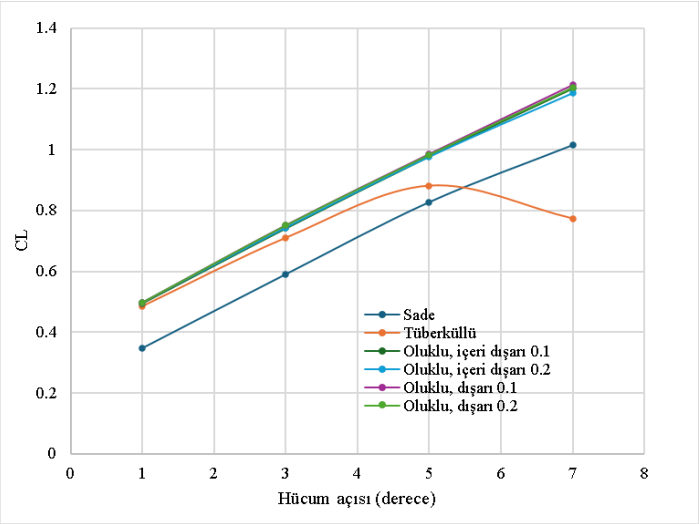
5.5 Sade, tüberküllü ve oluklu hidrofoillerin kıyaslanması

Daha önceki bölümlerde gerçekleştirilen analizler sonucunda yarı bükümlü kalın kanat geometrisine ön kenar tüberkülü eklenmiş, farklı hücum açılarında analizler gerçekleştirilerek tüberkülsüz olan hidrofoille kıyaslanmıştır. Bu bölümde ise literatürde de uygulama alanları bulunan yüzey olukluluğu etkisi incelenmiştir. Bu amaçla kalın kesitli ve yarı bükümlü olan kanada farklı derinliklerde çit/kanal uygulaması yapılmıştır. Tüberkülsüz yarı bükümlü hidrofoil bu bölümden itibaren Sade olarak isimlendirilmiştir.

Oluklu olarak ifade edilen bu yeni geometrilerden İçeri ve Dışarı olarak isimlendirilenler, hidrofoilin yüzeyine, hidrofoilin toplam kalınlığının en fazla %10'u ve %20'si kadar girinti ve çıkıntı olacak şekilde kanallar açılmasıyla oluşturulmuştur. Dışarıdan oluklu hidrofoiller ise kanadın sadece dışına, kanadın kalınlığının en fazla %10'u ve %20'si olacak şekilde çıkıntı eklenmesiyle oluşturulmuştur. Bu geometriler sırasıyla Oluklu İçeri Dışarı 0.1, Oluklu İçeri Dışarı 0.2, Oluklu Dışarı 0.1 ve Oluklu Dışarı 0.2 olarak isimlendirilmiştir.

5.5.1 Kavitasyonsuz Akış Analizleri

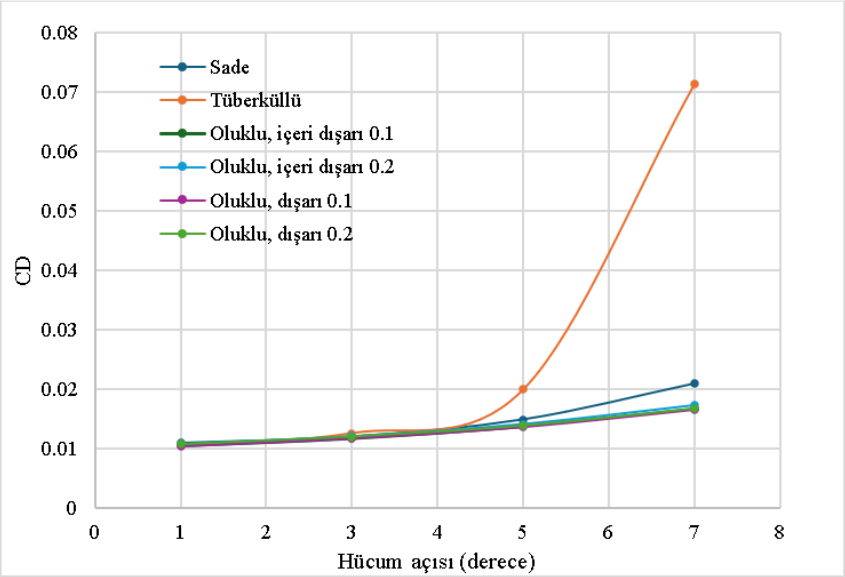
Sade, Tüberküllü ve Oluklu geometrilerin 1<AoA<7 derece hücum açısı aralığında kavitasyonsuz akış koşullarında analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Şekil 5.18'de görüldüğü üzere Sade hidrofoilde en düşük kaldırma katsayısı değerleri elde edilmiştir. Tüberkül ve oluk ilavesi yapılmış olan hidrofoillerde, en düşük hücum açısındaki C_L değerinde yaklaşık %44 artış sağlamıştır. Hücum açısının arttırılmasıyla birlikte oluklu geometrilerin C_L değerlerinin tüberküllü geometriye göre daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 5.18 Sade, Tüberküllü ve Oluklu geometrilerin farklı hücum açılarındaki kaldırma katsayılarının kıyaslanması (kavitasyonsuz akış koşullarında)

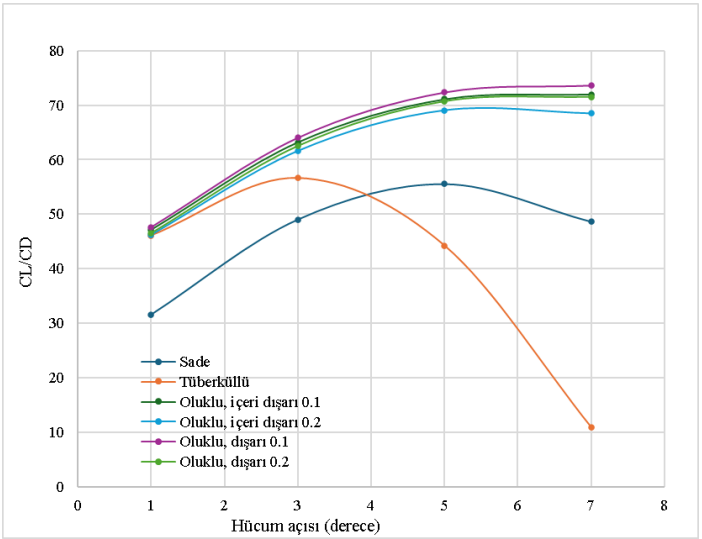
Bununla birlikte, 5 derece hücum açısından sonra tüberküllü hidrofoilin kaldırma katsayısında düşüş gözlemlenmekte, ancak Oluklu geometrilerde Sade (tüberkülsüz, yarı bükümlü) geometriye göre yaklaşık %20 oranında daha fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 5.19'daki direnç katsayılarına (C_D) bakıldığında ise geometride yapılan değişikliklerin kavitasyonsuz akış koşullarında bariz bir farklılık göstermediği, ancak tüberkül ilavesinin yaklaşık 4.5 dereceden sonra dirençte önemli bir artışa sebep olduğu söylenebilir.



Şekil 5.19 Sade, Tüberküllü ve Oluklu geometrilerin farklı hücum açılarındaki direnç katsayıları (kavitasyonsuz akış koşullarında)

Hidrofoillerin hidrodinamik verimliliklerinin sunulduğu Şekil 5.20'e bakıldığında oluklu geometrilerin %50 civarında bir verim artışı sağladığı açıkça görülebilmektedir. Bu geometriler içerisinde ise hidrofoilin yüzeyine dışarıdan eklenmiş kanalları ifade eden dışarıdan oluklu 0.1 hidrofoilinin en yüksek verimi sağladığı açıktır. Tasarım aşamasında, kavitasyonsuz akış durumunda bir hidrofoilin verimini arttırmak için tüberkül ilavesine göre daha az karmaşık ve daha az maliyetli üretimi yapılabilecek bu modelin kullanılması önerilebilir.

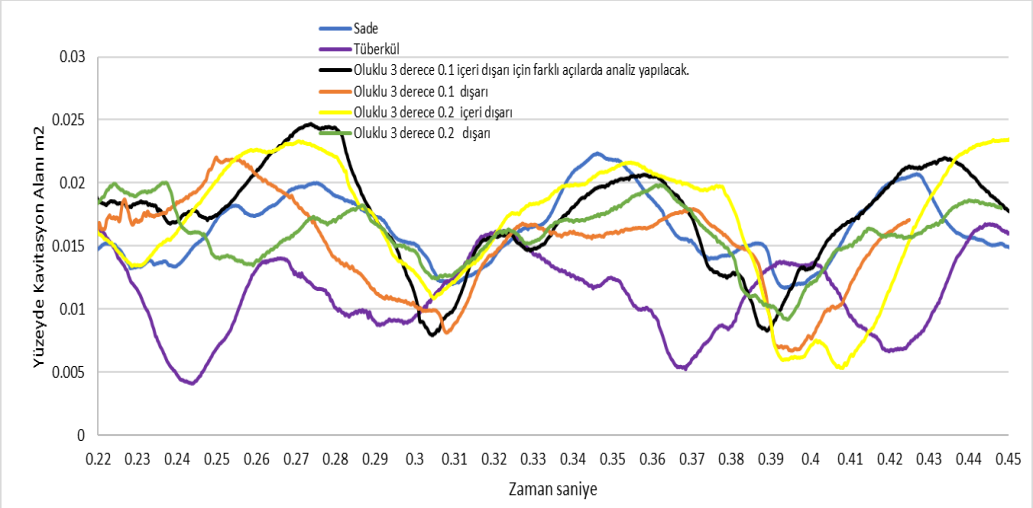


Şekil 5.20 Sade, Tüberküllü ve Oluklu hidrofoillere ait hidrodinamik verimlerin (C_L/C_D) farklı hücum açılarında kıyaslanması (kavitasyonsuz akış koşullarında)

5.5.2 Kavitasyonlu Akış Analizleri

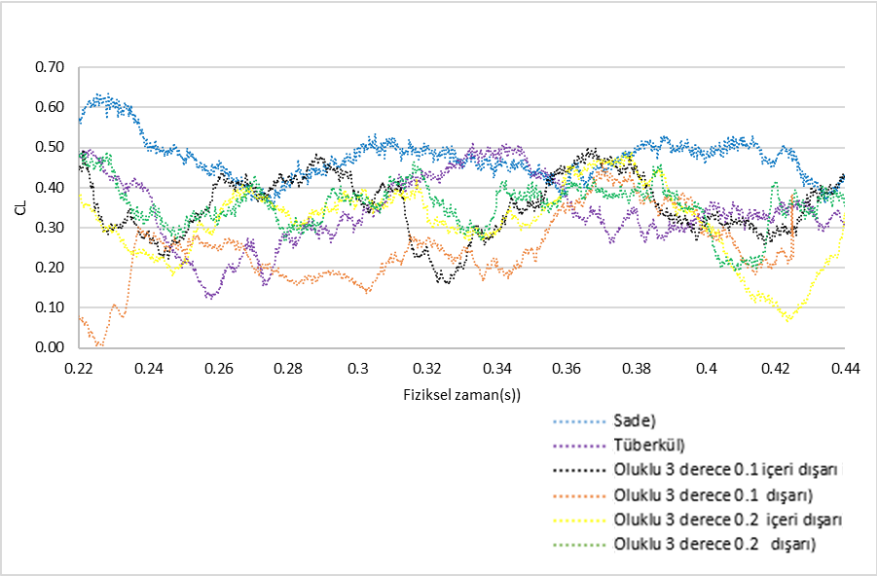
Bu kısımda daha önceki bölümde kavitasyonsuz akış analizleri tamamlanmış olan Sade, Tüberküllü ve Oluklu hidrofoillerin, kavitasyonlu akış analizleri tek bir hücum açısında (AoA= 3 derece) gerçekleştirilmiştir. Burada amaç, oluklu hidrofoiller içerisinde en iyi performansı sağlayan modeli belirlemektir. Daha sonra belirlenmiş olan Oluklu model, Sade ve Tüberküllü hidrofoil ile farklı hücum açılarında kıyaslanacaktır (Bölüm 5.5.3).

Şekil 5.21'de tüm hidrofoillerin yüzeyinde oluşan tabaka kavitasyonu alanı kıyaslanmıştır. Bu grafikte daha kolay kıyaslama yapabilmek adına zaman kaydırması yapılmıştır. Grafiğe bakıldığında yüzeyde en az kavitasyon oluşumu Tüberküllü kanatta görülmektedir. Şekil 5.22 - Şekil 5.24'de kaldırma katsayısı, direnç katsayısı ve hidrodinamik verim tüm geometriler için kıyaslanmıştır.



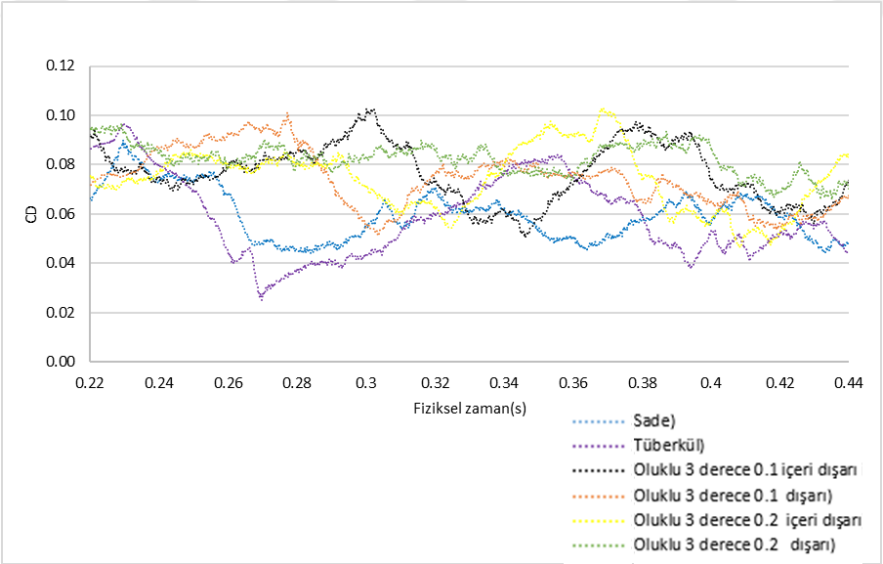
Şekil 5.21 Sade, tüberküllü ve oluklu geometrilerin yüzeydeki kavitasyon alanının (m^2) kıyaslanması (Hücum açısı: 3 derece)

Kaldırma ve direnç katsayısı grafiklerini daha kolay yorumlayabilmek ve geometriler arasında daha anlaşılır kıyaslama yapabilmek için bu değerlerin hareketli ortalaması alınarak grafikler oluşturulmuştur. Hareketli ortalama (Moving Average), bir veri serisindeki dalgalanmaları düzleştirmek ve genel bir eğilim belirlemek için kullanılan bir istatistiksel yöntemdir.



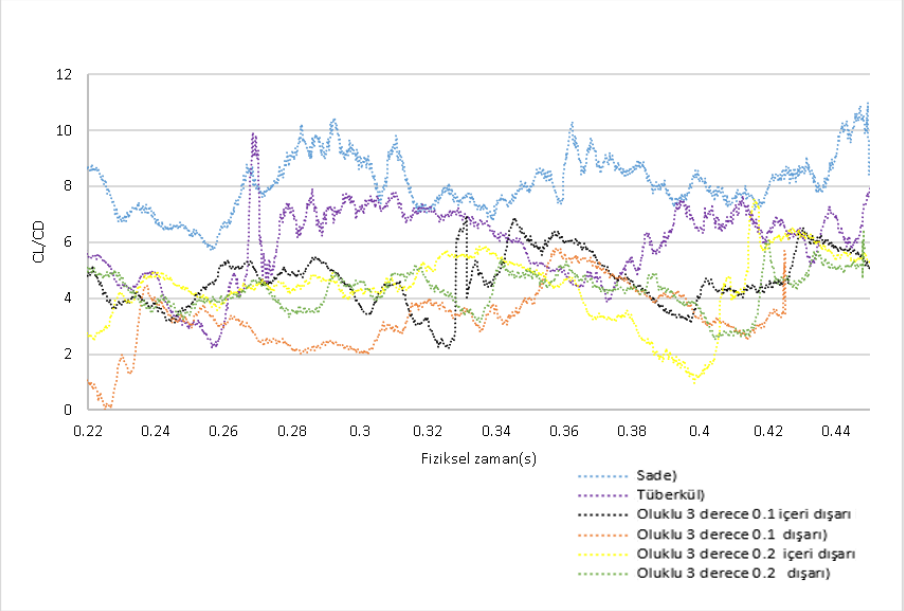
Şekil 5.22 Sade, tüberküllü ve oluklu geometrilerin yüzeydeki kaldırma katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 3 derece)

Şekil 5.22'de kaldırma katsayıları ortalamasına bakıldığında Oluklu 0.1 Dışarı hidrofoilinin en düşük kaldırma kuvvetini ürettiği görülmektedir. Bununla birlikte en yüksek kaldırma kuvveti Sade hidrofoil tarafından üretilmektedir.



Şekil 5.23 Sade, tüberküllü ve oluklu geometrilerin yüzeydeki direnç katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 3 derece)

Şekil 5.23'de ise direnç katsayıları kıyaslanmıştır. Burada ise en düşük direnç kuvvetinin Tüberküllü ve onu takip eden Sade hidrofoil tarafından üretildiği görülmektedir.



Şekil 5.24 Sade, tüberküllü ve oluklu geometrilerin yüzeydeki hidrofoil performanslarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 3 derece)

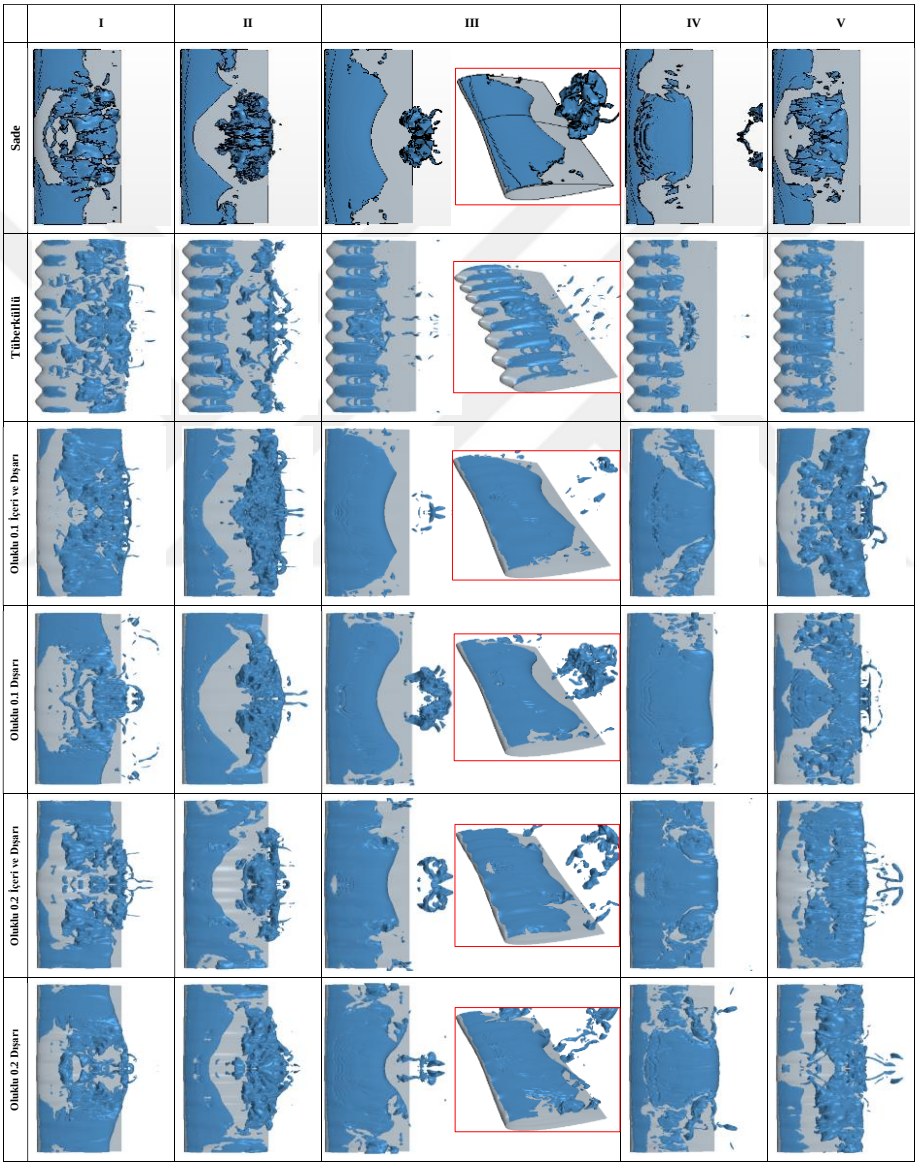
Hidrodinamik verimler kıyaslandığında ise Sade hidrofoilin verimi en yüksektir. Bununla birlikte en düşük verim Oluklu 0.1 Dışarı hidrofoiline aittir. Tüm hidrofoillerin bir kavitasyon döngüsündeki fazları kıyaslamak için belirlenmiş olan zaman aralıkları Tablo 5.5'de verilmiştir. Bu değerler üstte verilen kavitasyon alanı grafiğindeki değerler dikkate alınarak kararlaştırılmıştır.

Tablo 5.5 Sade, tüberküllü ve oluklu hidrofoillerin 3 derece hücum açısında oluşan bir kavitasyon döngüsü için seçilmiş olan zaman aralıkları

Hidrofoil Geometrisi	**Zaman aralığı (s)**
Sade	0.230 – 0.307
Tüberküllü	0.243 – 0.292
Oluklu 0.1 İçeri ve Dışarı	0.305 – 0.390
Oluklu 0.1 Dışarı	0.309 – 0.391
Oluklu 0.2 İçeri ve Dışarı	0.305 – 0.391
Oluklu 0.2 Dışarı	0.307 – 0.394

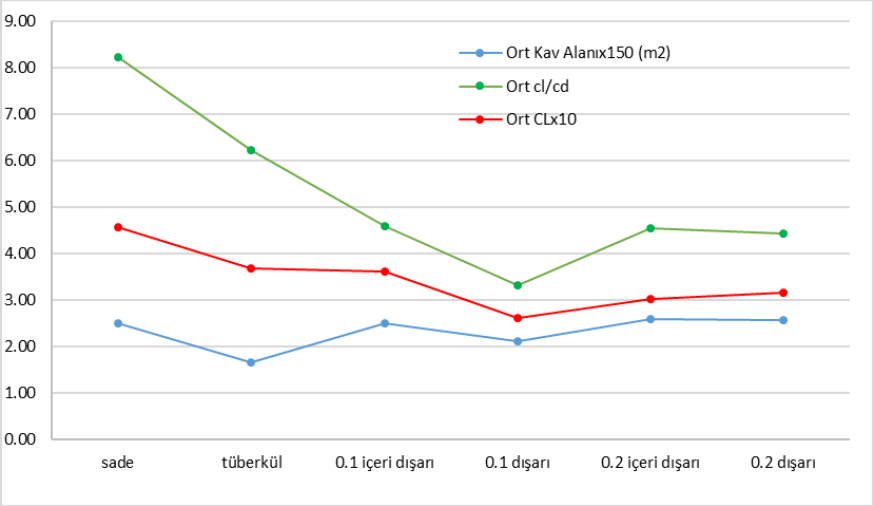
3 derece hücum açısı için belirlenen zaman aralıklarında, bir periyot içerisindeki faz oluşumları Tablo 5.6'da verilmiştir. Burada görülen I-V arasındaki fazlar, bir kavitasyon periyodunun dört eşit parçaya bölünmesiyle elde edilmiş olup, ilgili zaman adımına ait kavitasyon görsellerinin kullanılmasıyla oluşturulmuştur.

Tablo 5.6 Bir kavitasyon periyoduna ait fazların Sade, Tüberküllü ve Oluklu hidrofoil geometrileri için değişimi (3 derece hücum açısında)



Tablodaki görseller incelendiğinde tüberküllerin yüzey kavitasyonunu parçaladığı ve sadece çukur bölgelerde kavitasyon oluştuğu görülmektedir. Sade ve Oluklu geometrilerin üzerinde oluşan kavitasyonun ise genel olarak oldukça benzer

karakteristik gösterdiği dikkat çekmektedir. Maksimum kavitasyon oluşumunu gösteren III numaralı görseller incelendiğinde Oluklu 0.1 Dışarı hidrofoilinde en fazla kavitasyon oluşumu görülmektedir. Bu görsellerde tabaka ve bulut kavitasyonunun birlikte görüldüğü bu sebeple tek başına incelenmesinin yanıltıcı olabileceği unutulmamalıdır.



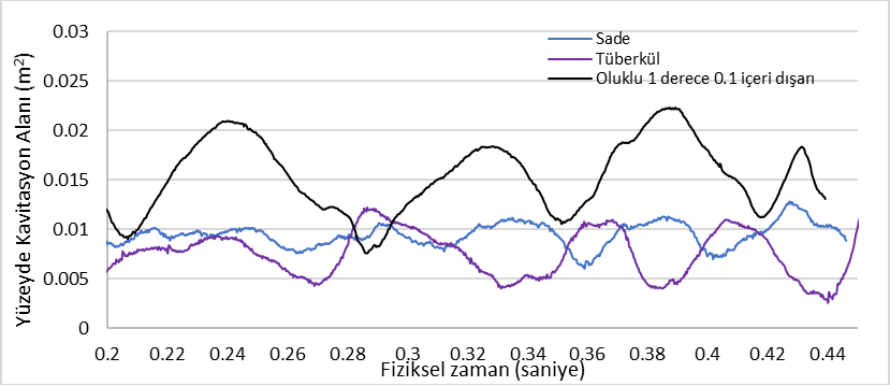
Şekil 5.25 Sade, Tüberküllü ve Oluklu hidrofoillerin ortalama kavitasyon alanı, ortalama kaldırma katsayısı ve hidrodinamik performans değerlerinin (C_L/C_D) kıyaslanması

Bu amaçla, Şekil 5.25'da Sade, Tüberküllü ve Oluklu hidrofoillere ait ortalama kavitasyon alanı, ortalama kaldırma katsayısı ve ortalama hidrodinamik performans değerleri kıyaslanmıştır. Burada açıkça görüldüğü üzere, en yüksek performans değerleri öncelikle Sade kanatta, daha sonra Tüberküllüde, onu takiben ise Oluklu 0.1 içeri dışarı hidrofoilde görülmektedir. Ayrıca, Oluklu 0.2 içeri dışarı hidrofoilinin verimi de bu oluklu hidrofoile oldukça yakındır. Ancak kaldırma katsayısı değerleri dikkate alındığında, oluklu 0.1 içeri dışarı hidrofoilinin diğer oluklu hidrofoillere göre daha fazla kaldırma kuvveti ürettiği görüldüğünden, Tüberküllü ve Sade hidrofoiller ile kıyaslama için farklı hücum açısı analizlerine bu geometriyle devam edilmesi kararına ulaşılmıştır.

5.5.3 Sade, Tüberküllü ve Oluklu (0.1 içeri dışarı) hidrofoillerin farklı hücum açılarında kıyaslanması

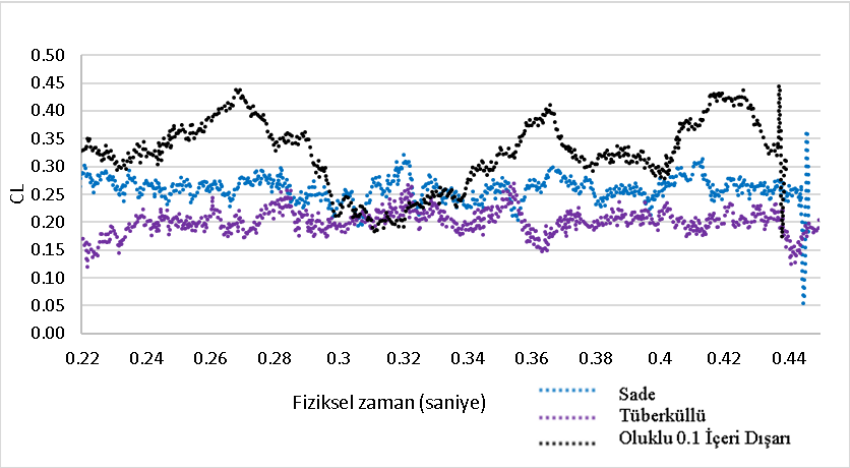
Bir önceki bölümde farklı boyutlarda yüzeye girinti çıktı ve sadece çıkıntı şeklinde ilave edilen Oluklu geometrilerle Sade ve Tüberküllü geometri sonuçları kıyaslanmış, farklı hücum açılarında kıyaslanma için Oluklu 0.1 içeri dışarı olarak adlandırılan hidrofoil geometrisi seçilmiştir.

Bu kısımda ise, +1, +5 ve +7 derece hücum açılarında Sade, Tüberküllü ve Oluklu (0.1 içeri dışarı) geometrilerinin yüzeyde oluşan kavitasyon alanı, kaldırma ve direnç katsayıları ile hidrodinamik performans değerleri kıyaslanmıştır. Burada amaç tamamı yarı büküme sahip olan her üç geometride tüberkül ve oluk etkilerinin belirtilen parametreler için etkisini incelemektir.



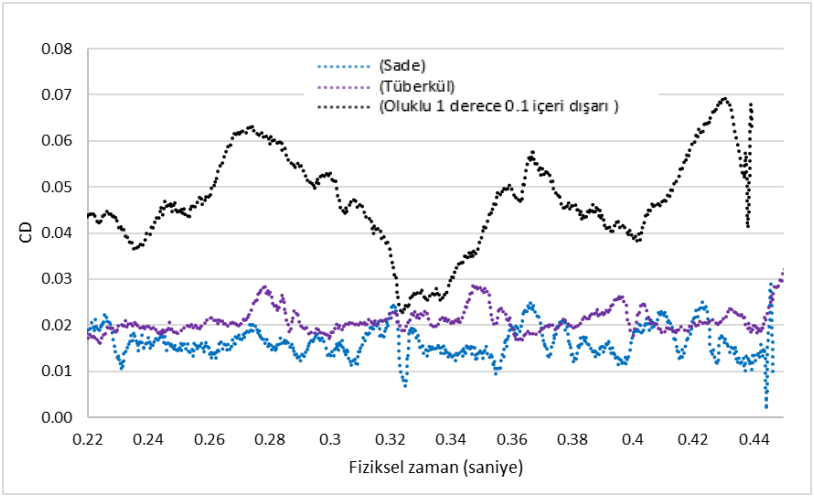
Şekil 5.26 Sade, Tüberküllü ve Oluklu 0.1 içeri dışarı geometrilerinin yüzeydeki kavitasyon alanının (m^2) kıyaslanması (Hücum açısı: 1 derece)

Şekil 5.26'da üç hidrofoile ait kavitasyon alanı değerleri 1 derece hücum açısında kıyaslanmıştır. Burada açıkça görüldüğü üzere, en yüksek kavitasyon oluşumu Oluklu hidrofoilde görülmektedir. Bununla birlikte en uzun kavitasyon periyodu süresi yine bu hidrofoilde oluşmaktadır. Sade ve Tüberküllü hidrofoillerde kavitasyon periyodu süresi yaklaşık olarak benzerdir. Yine ortalama kavitasyon oluşumları da her iki hidrofoilde birbirine oldukça yakındır.



Şekil 5.27 Sade, Tüberküllü ve Oluklu 0.1 içeri dışarı geometrilerin kaldırma katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 1 derece)

Şekil 5.27'de ise bu hidrofoillerin kaldırma katsayıları, grafiklerdeki dalgalanmayı azaltıp kıyaslanabilir hale getirmek için hareketli ortalamaları alınarak verilmiştir. Burada en yüksek kaldırma kuvvetini Oluklu, en düşük ise Tüberküllü hidrofoilin ürettiği görülmektedir.



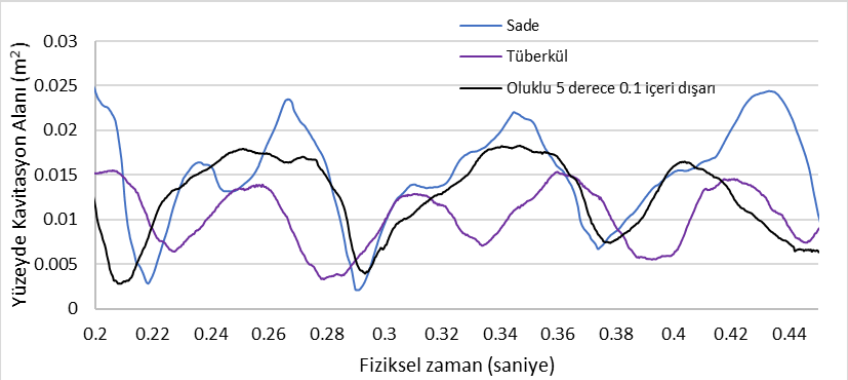
Şekil 5.28 Sade, Tüberküllü ve Oluklu 0.1 içeri dışarı geometrilerin direnç katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 1 derece)

Şekil 5.28'de ise bu geometrilere ait direnç katsayıları hareketli ortalamaları alınarak sunulmuştur. Grafik incelendiğinde Tüberküllü hidrofoilin en düşük direnç

katsayısını verdiği, Oluklu hidrofoilde ise bu değerin en yüksek olduğu görülmektedir.

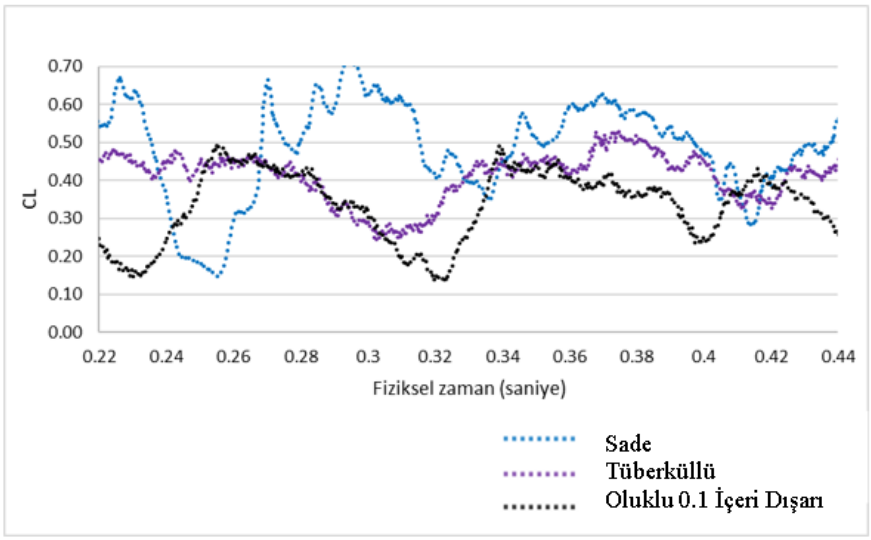
Şekil 5.29'da hücum açısı artırılarak analizler yeniden gerçekleştirilmiş, kavitasyon alanı değerleri kıyaslanmıştır (AoA=5 derece). Bu grafikte dikkati çeken en önemli detay kavitasyon periyotlarının tüm geometrilerde daha belirgin hale gelmesidir.

Sade ve Oluklu hidrofoilde kavitasyon alanı değerleri birbirine oldukça yakındır. En az kavitasyon ise Tüberküllü hidrofoilde oluşmaktadır.



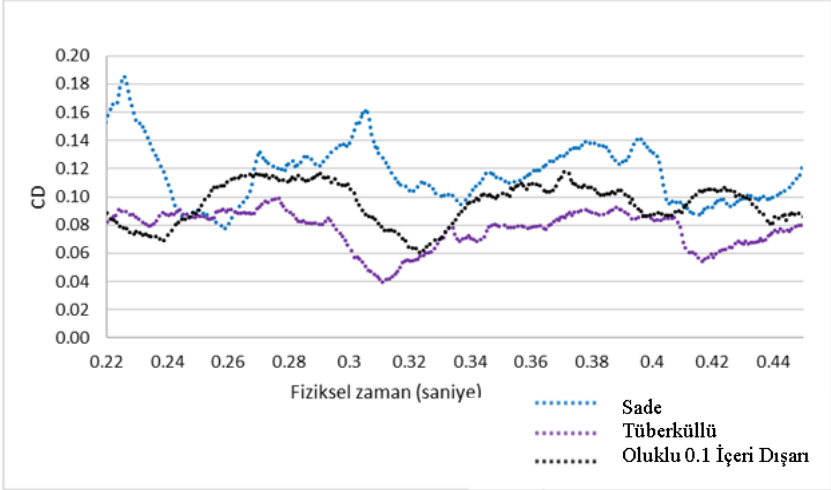
Şekil 5.29 Sade, Tüberküllü ve 0.1 içeri dışarı Oluklu geometrilerin yüzeydeki kavitasyon alanının (m^2) kıyaslanması (Hücum açısı: 5 derece)

Her üç hidrofoilin 5 derece hücum açısındaki zamanla değişen kaldırma katsayısı değerleri hareketli ortalaması alınarak Şekil 5.30'da verilmiştir. Burada, kavitasyonun periyodik davranışının kaldırma katsayısında da görüldüğü dikkati çekmektedir. Bununla birlikte Oluklu hidrofoilin ürettiği kaldırma kuvvetinin en az olduğu görülmektedir.



Şekil 5.30 Sade, Tüberküllü ve 0.1 içeri dışarı Oluklu geometrilerin kaldırma katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 5 derece)

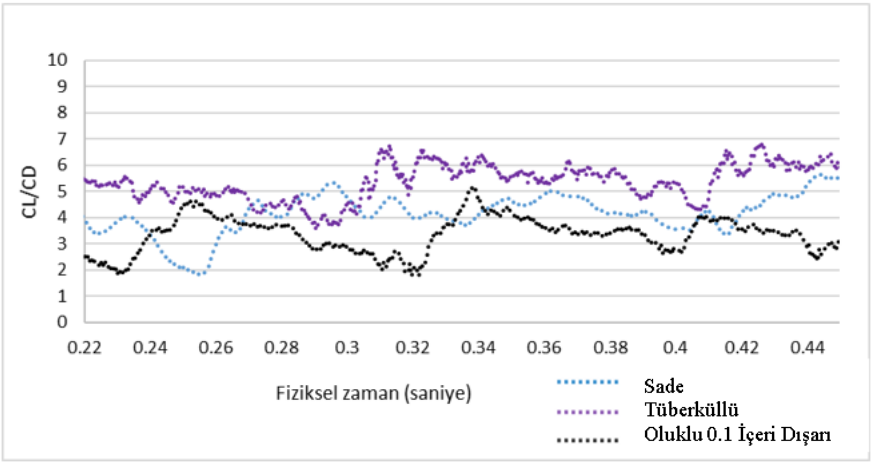
Şekil 5.31'de direnç katsayısının hareketli ortalamalarına bakıldığında ise en düşük direncin Tüberküllü hidrofoilde, en yüksek ise Sade hidrofoilde oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5.31 Sade, Tüberküllü ve 0.1 içeri dışarı Oluklu geometrilerin direnç katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 5 derece)

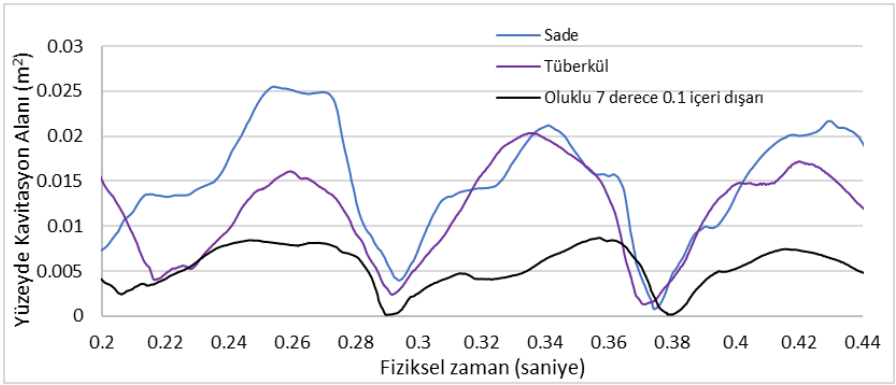
Şekil 5.32'de bu hidrofoillerin 5 derece hücum açısındaki hidrodinamik performansları kıyaslanmıştır. En yüksek performans Tüberküllü hidrofoilde

görülürken Sade ve Oluklu hidrofoillerin ortalama performanslarının birbirine yakın olduğu görülmektedir.

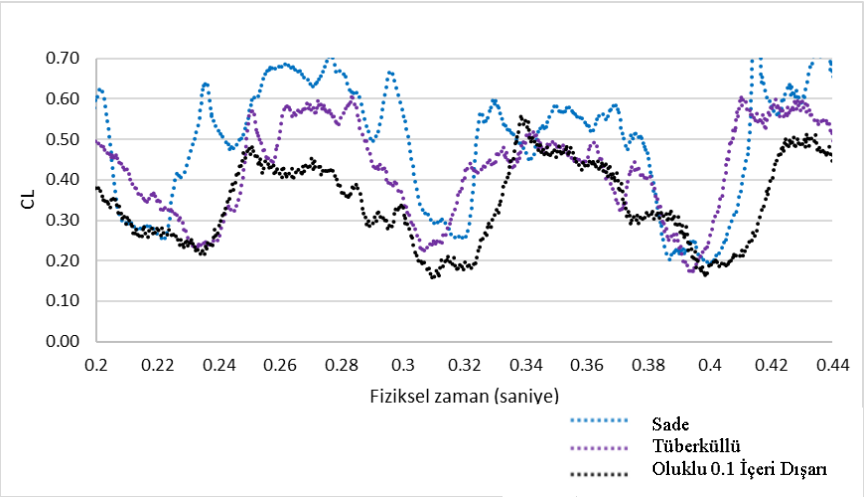


Şekil 5.32 Sade, tüberküllü ve 0.1 içeri dışarı oluklu geometrilerin hidrofoil performanslarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 5 derece)

Şekil 5.33'de 7 derece hücum açısında hidrofoiller üzerinde oluşan kavitasyon alanı grafiği görülmektedir. Hücum açısının artmasıyla Sade hidrofoilde belirgin bir artış görülürken, en az kavitasyon oluşumu Oluklu hidrofoilde görülmektedir. Kavitasyon periyotları ise her üç hidrofoilde de birbirine yakındır.

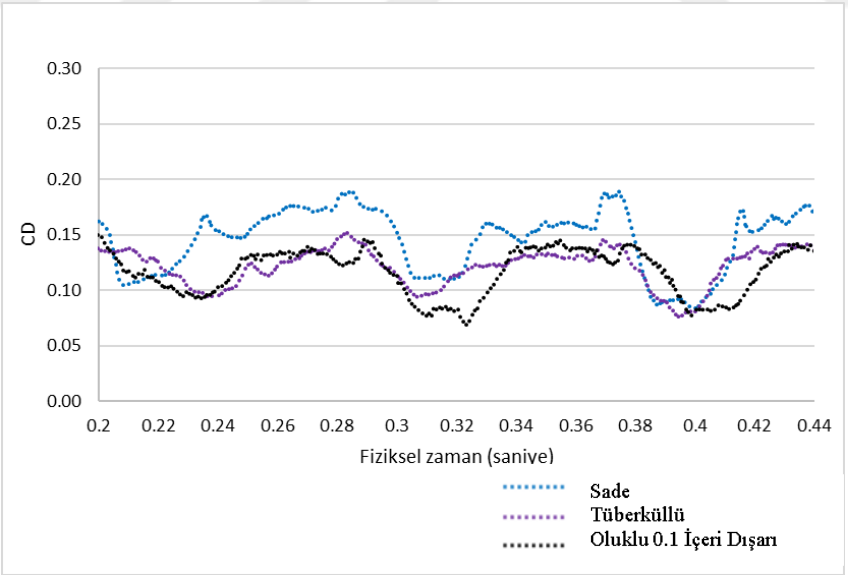


Şekil 5.33 Sade, Tüberküllü ve Oluklu 0.1 içeri dışarı geometrilerin yüzeydeki kavitasyon alanının (m^2) kıyaslanması (Hücum açısı: 7 derece)



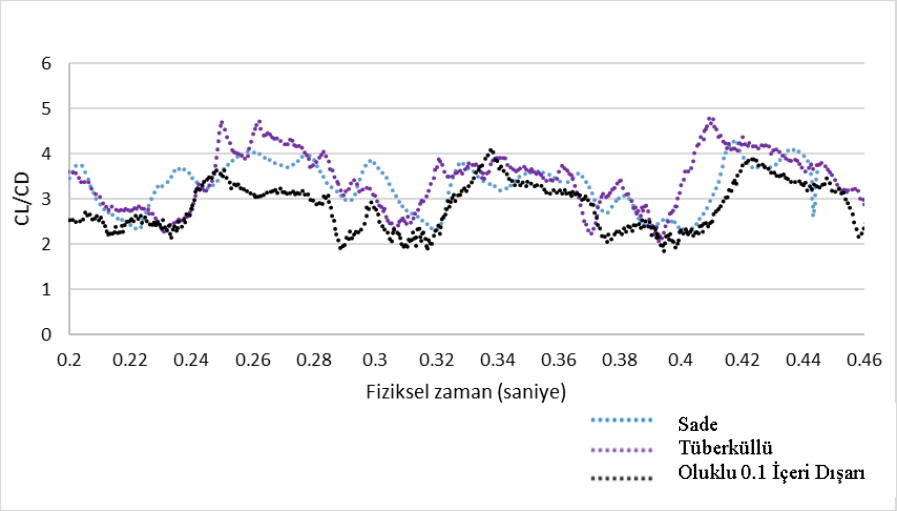
Şekil 5.34 Sade, Tüberküllü ve Oluklu 0.1 içeri dışarı geometrilerin kaldırma katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 7 derece)

Şekil 5.34'de 7 derece hücum açısında elde eldilen kaldırma katsayıları görülmektedir. Burada en fazla kaldırma kuvveti Sade hidrofoilde, en az ise Oluklu hidrofoilde üretildiği görülmektedir.



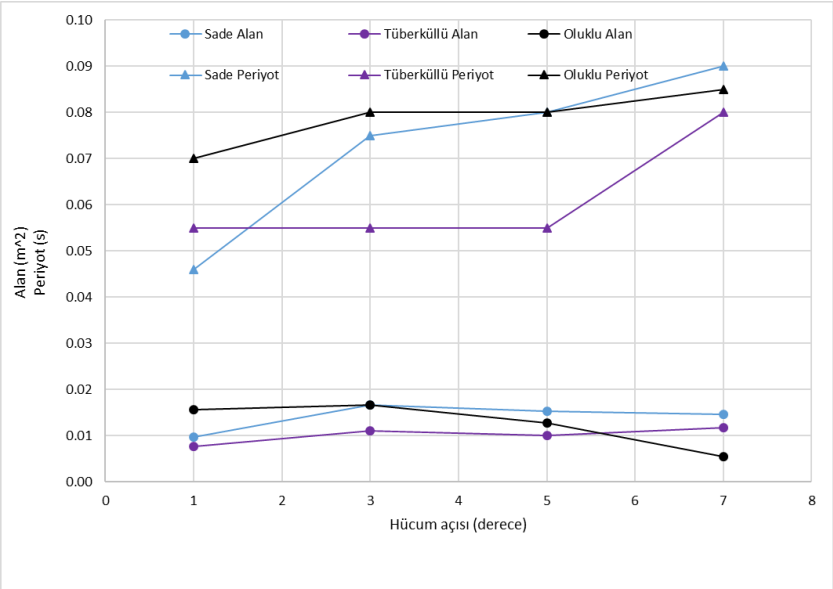
Şekil 5.35 Sade, Tüberküllü ve 0.1 içeri dışarı Oluklu geometrilerin direnç katsayılarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 7 derece)

Şekil 5.35'da ise aynı hücum açısında (AoA=7 derece) meydana gelen direnç katsayıları kıyaslanmıştır. Burada en fazla direnci Sade hidrofoilin ürettiği, diğer hidrofoillerde nispeten daha az direnç oluştuğu görülmektedir.



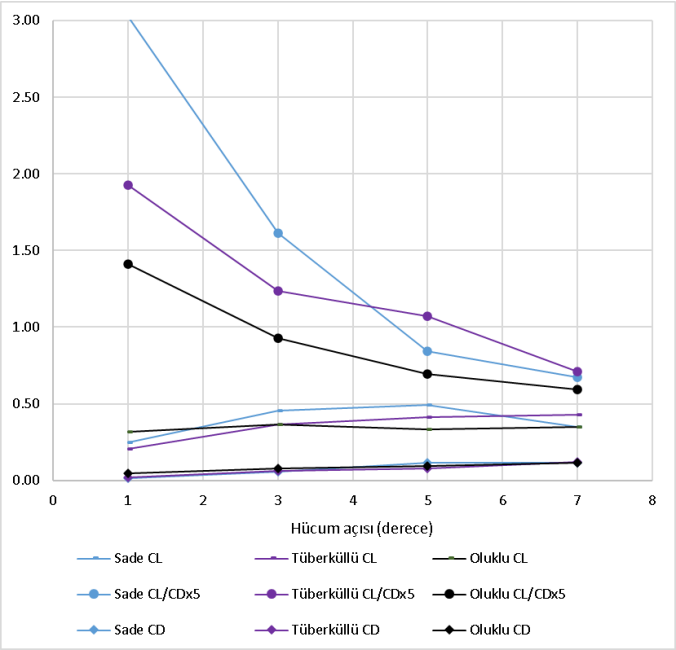
Şekil 5.36 Sade, tüberküllü ve 0.1 içeri dışarı oluklu geometrilerin hidrofoil performanslarının (hareketli ortalama ile) kıyaslanması (Hücum açısı: 7 derece)

Hidrofoil verimlerinin kıyaslandığı Şekil 5.36'de verimlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durumda yüksek hücum açılarında Oluklu hidrofoil etkisinin kavitasyonu azaltmada önemli rol oynadığı, buna karşın performansta çok fazla iyileştirme sağlamadığı söylenebilir.



Şekil 5.37 Sade, tüberküllü ve oluklu (içeri dışarı 0.1) hidrofoillerin kavitasyon alanı ve kavitasyon periyotlarının hücum açısıyla değişimi

Şekil 5.37'de kavitasyon alanı ve kavitasyon periyodunun hücum açısına bağlı değişimi görülmektedir. Düşük hücum açısı değerlerinde en az kavitasyon oluşumu Sade hidrofoilde görülürken, açı arttıkça bu durum değişmektedir. Genel karakteristiğe bakıldığında yaklaşık 1.7 derece hücum açısından sonra en az kavitasyon oluşumu Tüberküllü hidrofoil üzerinde oluşmaktadır. Periyotlara bakıldığında ise analizlerin gerçekleştirildiği en düşük açı olan 1 derece hücum açısında Tüberküllü hidrofoildeki periyot oluşumu en az iken, açı arttıkça özellikle 5.6 dereceden sonra Oluklu hidrofoil üzerindeki kavitasyon periyodu en az olmaktadır.



Şekil 5.38 Sade, tüberküllü ve oluklu (içeri dışarı 0.1) hidrofoillerin performans değerlerinin hücum açısıyla değişimi

Şekil 5.38'da performans değerlerinin tüm hücum açısına bağlı değişimi tek bir grafik üzerinde gösterilmiştir. Hidrodinamik verim değerlerini aynı grafikte gösterebilmek için bu değerler 5 ile çarpılmıştır. Grafik incelendiğinde düşük hücum açısında en yüksek verim Sade hidrofoilde iken, açı arttıkça Tüberküllü hidrofoilin veriminin arttığı görülmektedir. Kaldırma katsayısı değerlerine bakıldığında ise 1 derece hücum açısında en yüksek değer Oluklu hidrofoilde iken 7 derece hücum açısında Tüberküllü hidrofoilin daha fazla kaldırma kuvveti ürettiği görülmektedir.

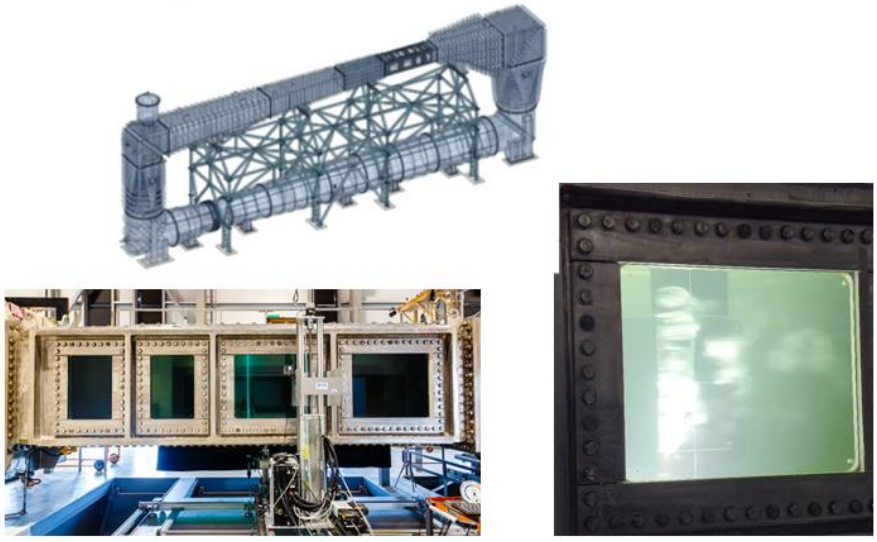
6

DENEY ÇALIŞMASI

6.1 Deney Düzeneği ve Deney Senaryoları

Bir önceki bölümde gerçekleştirilen HAD analizleri neticesinde, deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Sade, Tüberküllü ve Oluklu (0.1 İçeri Dışarı) hidrofoilleri seçilmiştir. Modeller daha büyük boyutlarda, ahşap malzemeden imal edilmiştir. Modellerle ilgili detaylar takip eden Bölüm 6.1.1'de verilmiştir.

Deneylerin gerçekleştirildiği İstanbul Teknik Üniversitesi Kavitasyon Tüneli (İTÜ-KAT) sahip olduğu kapasiteyle bu alandaki en gelişmiş kavitasyon test sistemlerini ve imkanlarını bünyesinde bulundurmaktadır. İTÜ-KAT, 5.5 m x 1.5 m x 1.5 m x 1.2 m (Uzunluk x Genişlik x Yükseklik) boyutlarında bir test alanına, 16.5 m/s maksimum akış hızına ve 0.85 bar vakumlama kapasitesine sahiptir.



Şekil 6.1 İTÜ-KAT'ın 3 boyutlu çizimi ve test bölgesinin görünümü

6.1.1 Deneyde Kullanılan Model Geometrileri

Çalışmada kullanılan tüm hidrofoil geometrileri AR=3.33 (kanat açıklığı 1.20 metre ve kord uzunluğu 0.36 metre) olan dikdörtgen planform alanına sahiptir (Şekil 6.3). Tüberküllü ve Oluklu hidrofoil geometrileri, boyutları (kanat açıklığı ve kord uzunluğu) ve büküm açısının dağılımı değiştirilmeden Sade (orijinal) geometrinin deforme edilmesiyle oluşturulmuştur. Bu geometrilerin detayları önceki bölümlerde verilmiştir.

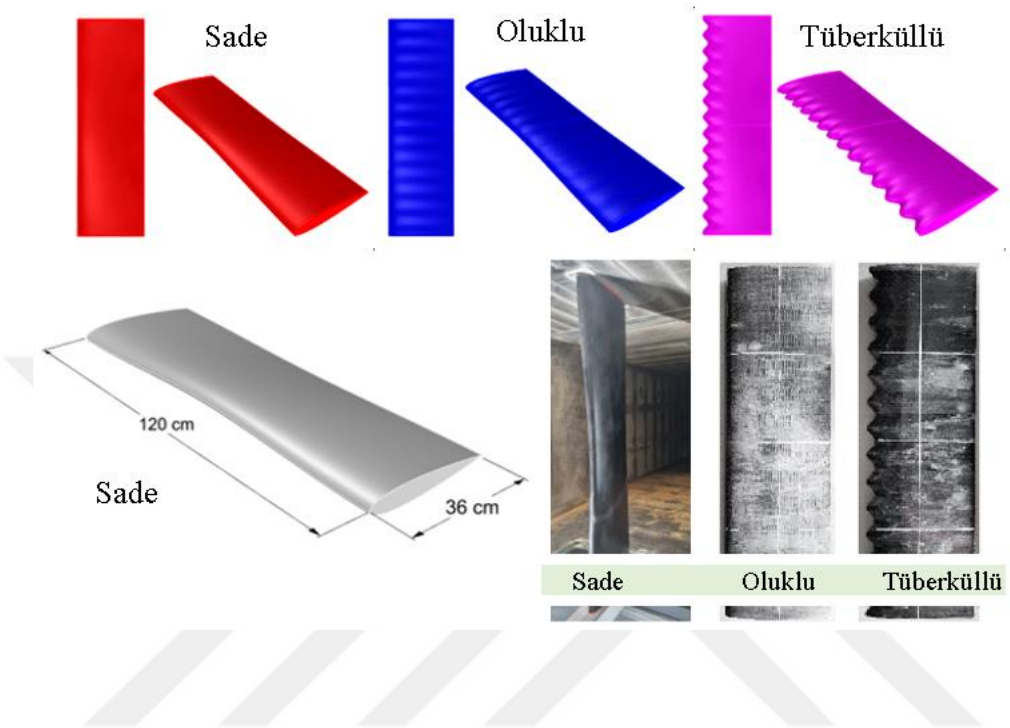
Deneylerde kullanılan hidrofoil modelleri yekpare ahşap blokların CNC ile işlenmesi ile üretilmiştir. Bu yöntemin uygulanabilir olması için her model için 40 adet 3 cm kalınlığında masif kayın ahşap levha kullanılmış, lamine şekilde birbirine geçmeli olarak ve deniz tutkalı da kullanılarak birleştirilmiştir (Şekil 6.2). Modelin mukavemetini artırmak ve tünel ile modelin bağlantılarını güvenilir kılmak için ahşap modellerin içine tüm açıklık boyunca 3 adet paslanmaz çelik çubuk yerleştirilmiştir. Her model için 2 adet 20 mm çapında yekpare paslanmaz çubuk ve 1 adet 20x40 mm ebatında 3 mm et kalınlığına sahip içi boş dikdörtgen paslanmaz profil kullanılmıştır.



Şekil 6.2 Tüberküllerin imalatı

Su geçirmezliği sağlamak ve vakum etkisi altında yüzey dayanıklılığını artırmak için en az 2 kat yüksek mukavemetli epoksi kaplama uygulanmıştır. Kavitasyon görselleştirmesini kolaylaştırmak için epoksiye siyah pigmentler karıştırılarak koyu bir renk elde edilmiştir. Şekil 6.3'de gösterildiği gibi, kavitasyon alanlarının ve

maksimum uzunlukların doğru okunabilmesi için hidrofoilin sırt yüzeyine eşit aralıklar oluşturacak şekilde kanat açıklığı yönünde bir beyaz çizgi ve kord yönünde üç beyaz çizgi çizilmiştir.



Şekil 6.3 Sade, Oluklu ve Tüberküllü hidrofoil geometrileri

Sade hidrofoil, kanat açıklığı boyunca sabit NACA 0015 kesitine sahiptir, ancak hücum açıları hidrofoilin ucundan ortasına doğru kademeli olarak artmaktadır. Bükülmüş hidrofoil için hücum açısı, kanadın uç kısımlarına göre tanımlanır. Kanadın her iki ucunda da hücum açısı 0 derece iken, orta bölümde 5.5 derecedir. Sade hidrofoil için hücum açısı dağılımı, (Hoekstra vd., 2011) tarafından verilen Delft Twist-11 hidrofoili için kesitin kanat açıklığı doğrultusundaki hücum açısı değişiminin yarısı alınarak belirlenmiştir (Şekil 3.1).

6.1.2 Deney Senaryoları ve Akış koşulları

Testlerin gerçekleştirildiği kavitasyon tünelindeki suyun özellikleri Tablo 6.1'de verilmiştir. Deney koşullarındaki farklılıklar deneylerin farklı günlerde gerçekleştirilmesinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 6.1 Kavitasyon tünelindeki suyun özellikleri

Test	Sıcaklık, T (°C)	Su yoğunluğu, ρ (kg/m^3)	Kinematik viskozite, ν (m^2/s)	Buharlaşma basıncı, Pv (Pa)
Sade ve Oluklu	22.2	997.7279	9.520E-07	2677.8
Tüberküllü	21.7	997.8412	9.633E-07	2597.3

Kavitasyonlu akış testleri, test durumları ve akış koşulları Tablo 6.2'de verilen tüm bükümlü hidrofoiller için 3 derece hücum açısında gerçekleştirilmiştir. Statik basınç (P_o) ve kavitasyon sayısı (σ), dikey olarak test bölgesinin ortası, yani hidrofoilin orta kesiti için aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\boldsymbol{\sigma = \frac{(P_o - P_v)}{\frac{1}{2}\rho U^2}} \tag{6.1}$$

$$\boldsymbol{P_o = (P_{dip} - P_{vakum}) - \rho g h} \tag{6.2}$$

Tablo 6.2 Test senaryoları ve akış koşulları

Test No	Deney	Geometri	Akım hızı V (m/s)	Reynolds sayısı Re (-)	Vakum basıncı (bar)	Statik basınç Po (kPa)	Kavitasyon sayısı σ (-)
Test-1	Kıyaslama	Sade	5.0	1.89 x10^6	0.85	24.359	2.21
Test-2 (530)	Kıyaslama	Oluklu	5.0	1.89 x10^6	0.85	24.359	2.21
Test-3 (545)	Kıyaslama	Tüberküllü	5.0	1.87 x10^6	0.85	23.857	2.18
Test-4 (523)	Belirsizlik ve İlave Deney	Oluklu	5.5	2.08 x10^6	0.75	34.359	2.49
Test-5 (524)	İlave Deney	Oluklu	6.0	2.27 x10^6	0.75	34.359	2.09
Test-6 (537)	İlave Deney	Tüberküllü	5.5	2.06 x10^6	0.75	33.857	2.46
Test-7 (538)	İlave Deney	Tüberküllü	6.0	2.24 x10^6	0.75	33.857	2.07
Test-8 (544)	İlave Deney	Tüberküllü	5.5	2.06 x10^6	0.85	23.857	1.80
Test-9 (522)	İlave Deney	Oluklu	5.0	1.89 x10^6	0.75	34.359	3.01
Test-10 (536)	İlave Deney	Tüberküllü	5.0	1.87 x10^6	0.75	33.857	2.98

Test-1, 2 ve 3, sabit Reynolds ve kavitasyon sayısı koşulları altında Sade, Oluklu ve Tüberküllü hidrofoiller için zamana bağlı kavitasyon oluşumunu incelemek üzere gerçekleştirilmiştir.

Test-4'ün aynı koşullar altında 5 kez tekrarından elde edilen tabaka kavitasyon uzunlukları ve tabaka kavitasyon alanları kullanılarak belirsizlik analizleri yapılmıştır. Yazım aşamasında olan makale çalışması kapsamında gerçekleştirilen belirsizlik analizlerine göre toplam belirsizlik kavitasyon alanı için %3.96, kavitasyon periyodu için %3.62 ve kavitasyon uzunluğu için %2.94 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, en yüksek belirsizlik kavitasyon alanı ölçümlerinde gözlemlenirken, en düşük belirsizlik kavitasyon uzunluğu sonuçlarında bulunmuştur.

Test-5 ila Test10 için yapılan deneylerden Oluklu ve Tüberküllü hidrofoillerde kavitasyon oluşumunun Reynolds ve kavitasyon sayısı değişimlerinden nasıl etkilendiği incelenmiştir. Kavitasyon tünelindeki vakum basıncı ve/veya akış hızı değiştirilerek farklı kavitasyon sayıları elde edilmiştir. Deneyler, kavitasyon tünelinin kapasitesini akış hızı ve vakum açısından sınıra kadar test etmek için tasarlanmıştır. Maksimum vakumlama kapasitesi 0.85 bar tam olarak uygulanabilirken, 16.5 m/s maksimum akış hızı model ile tünel arasındaki bağlantı elemanlarındaki yapısal sorunlar nedeniyle uygulanamamıştır

Bu çalışmada bükümlü hidrofoil yüzeyleri üzerindeki kavitasyon görüntüleri, 1024 x 1024 piksel çözünürlükte 3000 f/s kare hızında yüksek hızlı bir video kamera (Photron Fastcam Nova S6) kullanılarak çekilmiştir. Bu cihaz, 1024 x 1024 piksel çözünürlükte 6400 f/s ve 128 x 16 piksel düşük çözünürlükte maksimum 800000 f/s kare hızında kayıt yapabilme özelliğine sahiptir. Veri boyutunu çok fazla artırmamak için 1024 × 1024 piksel ile 1000 f/s yeterli görülmüştür. ImageJ (Schneider *vd.,* 2012) görüntü işleme yazılımı kullanılarak, kaydedilen görüntüler zamana göre kavitasyon oluşumlarını analiz etmek için işlenmiştir. Böylece, bükümlü hidrofoil modelleri üzerindeki tabaka kavitasyon bölgelerinin alanları ve maksimum uzunlukları hesaplanabilmiştir.

6.2 Kavitasyon Testi Sonuçlarının Analizi

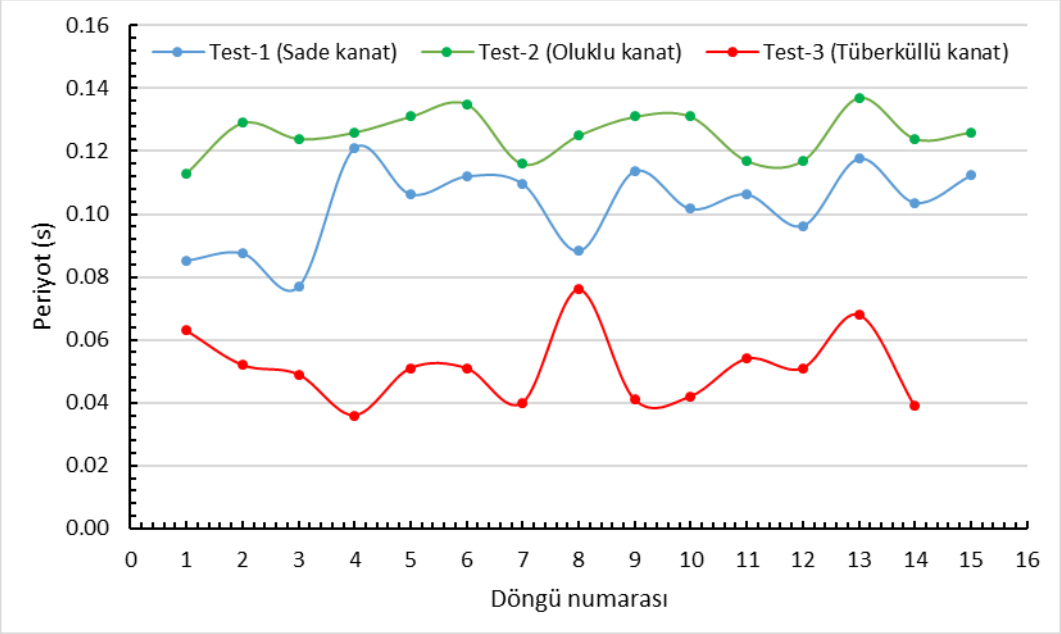
Bu bölümde, Şekil 6.3'de gösterilen üç adet bükümlü hidrofoil modelinin kavitasyonlu akış durumundaki deney sonuçları verilmektedir. Burada bükümlü hidrofoillerde yüzey oluğu ve ön kenar tüberkül etkilerinin kavitasyon oluşumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, Reynolds ve kavitasyon sayısının kavitasyon oluşumu üzerindeki etkileri için Oluklu ve Tüberküllü modellerle ek deneyler yapılmış ve sonuçlar aşağıdaki alt bölümlerde verilmiştir.

6.2.1 Oluk ve Ön Kenardaki Tüberkülün Etkileri

Burada, kısmi kavitasyonlu akışta yapılan deneylerden elde edilen zamana bağlı kavitasyon görüntüleri Sade (Test-1), Tüberküllü (ön kenar) (Test-3) ve Oluklu

(yüzey) (Test-2) bükümlü hidrofoiller için analiz edilmiştir. Ardışık 15 kavitasyon döngüsünün periyotları (T) ve periyotların yaklaşık olarak birbirine eşit olduğu ardışık 3 döngü için her döngüdeki 5 kavitasyon gelişim fazları, kavitasyon alanları ve maksimum kavitasyon uzunlukları 3 hidrofoil için karşılaştırılmıştır. Tam bir döngü içindeki kavitasyon gelişim aşamalarına ait kavitasyon görüntülerinin karşılaştırmaları da burada verilmiştir. Sade ve Oluklu hidrofoiller için yapılan deneylerde akış hızı V = 5 m/s, vakum basıncı 0.85 bar ve kavitasyon sayısı σ= 2.21 (σ= Tüberküllü için 2.18) olarak alınmıştır. Kavitasyon görüntü analizlerinde bulut kavitasyonu göz ardı edilmiştir.

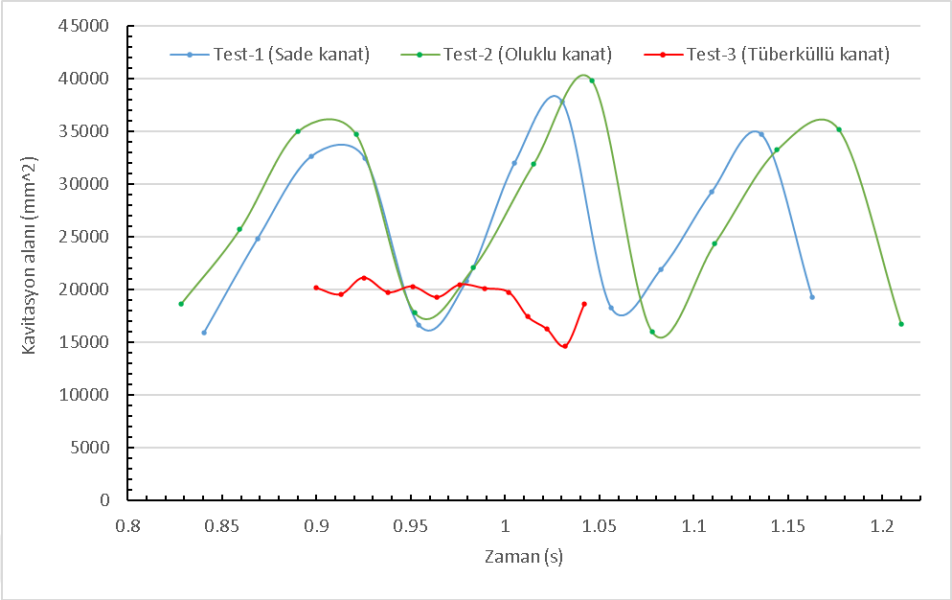
Deneylerden elde edilen 15 kavitasyon döngüsü için kavitasyon periyotları, 3 döngü için kavitasyon alanları ve maksimum kavitasyon uzunluklarının değişimleri sırasıyla Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'de verilmiştir.



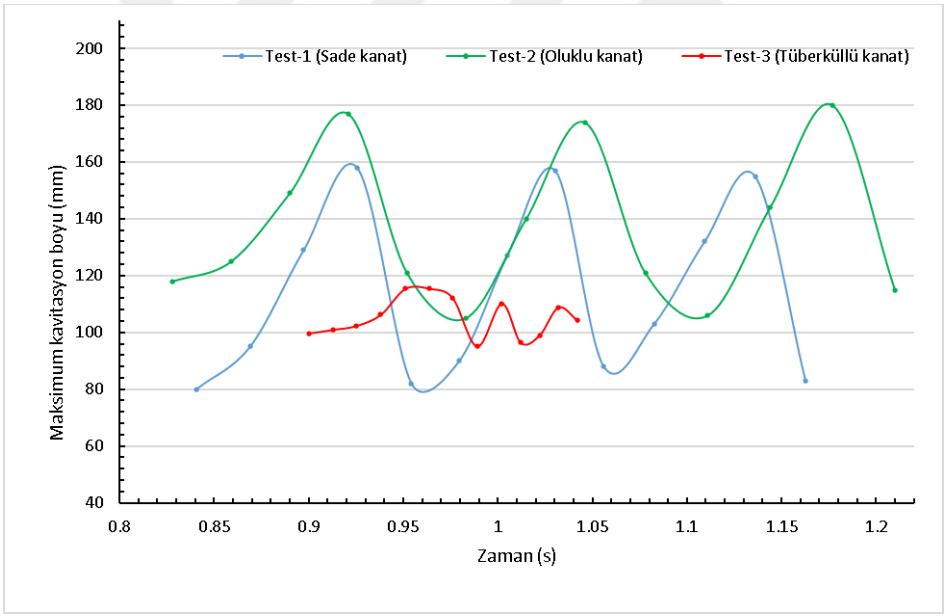
Şekil 6.4 Kavitasyon periyotlarının 15 döngü boyunca değişimi

(Hız V= 5.0 m/s, kavitasyon sayısı σ = 2.21 (Tüberküllü hidrofoil için σ = 2.18)

Şekil 6.5 (a) ve (b), Sade hidrofoil için 9., 10. ve 11.; Tüberküllü için 5., 6. ve 7.; ve Oluklu geometri için 3., 4. ve 5. kavitasyon döngüleri dikkate alınarak, her döngüde 5 aşamalı kavitasyon alanı ve maksimum kavitasyon uzunluğu eğrilerini göstermektedir. Ancak, Şekil 6.5'deki bazı grafikler uygun bir karşılaştırma için zaman kaydırmasıyla oluşturulmuştur.



(a)



(b)

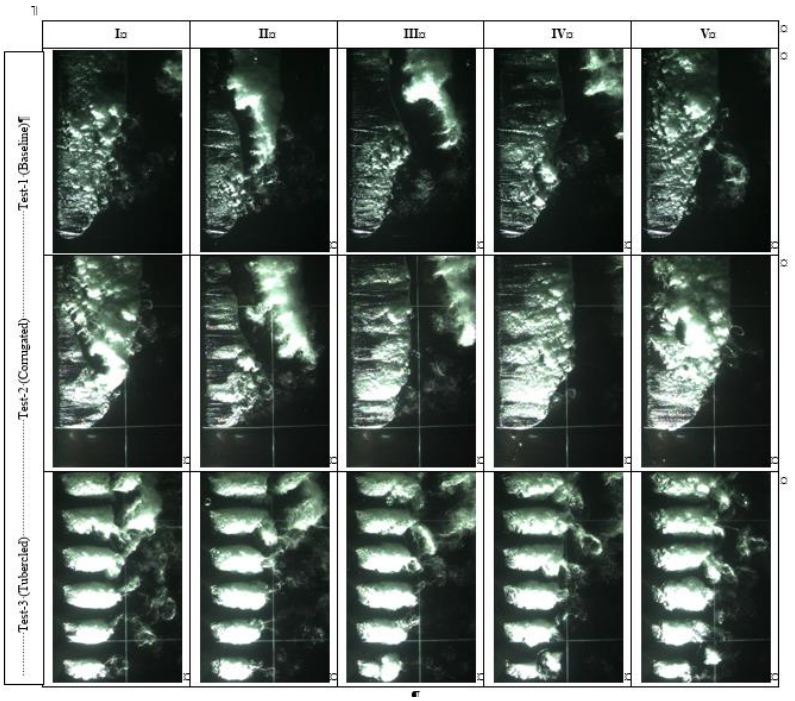
Şekil 6.5 Kavitasyon alanları(a) ve Maksimum kavitasyon uzunluğunun (b) 15 döngü için zamana bağlı olarak değişimi.

Şekil 6.4'da gösterilen grafiklerden hesaplanan ortalama kavitasyon periyodunun en yüksek Oluklu (T= 0.126 s), sonra Sade (T= 0.103 s) ve en düşük Tüberküllü geometride (T= 0.051 s) oluştuğu görülmektedir. Burada görüldüğü üzere

Tüberküllü hidrofoildeki kavitasyon süresi diğerlerinin yaklaşık yarısı kadar olmaktadır.

Şekil 6.5 'den, en yüksek kavitasyon alanı ve maksimum kavitasyon uzunluğu değerlerinin Oluklu geometriye ait olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, grafiklerden hesaplanan ortalama kavitasyon alanı değeri de 27031 mm^2 olarak en yüksek bu model için, daha sonra Sade için 25905 mm^2 olarak ve en az alan değeri ise Tüberküllü model için 19030 mm^2 olarak hesaplanmıştır. Ön kenar tüberkülünün uygulanması, Simanto *vd.* (2022) bulgularına benzer şekilde, tabaka kavitasyon oluşumunu orijinal geometriye kıyasla yaklaşık %42 oranında azaltmaktadır. Beklendiği gibi, maksimum kavitasyon uzunluğu eğrileri, kavitasyon alanı eğrileri ile genel olarak benzer bir eğilim göstermektedir. Tüberküllü hidrofoil modeli için kavitasyon alanı ve maksimum kavitasyon uzunluğu eğrisinin salınımları diğer modellerinkinden çok daha küçüktür.

Şekil 6.5 (a)'daki ilk kavitasyon döngüsü Sade hidrofoil için 0.841- 0.954 s, Oluklu için 0.358- 0.482 s ve Tüberküllü hidrofoil geometrisi için 0.200 - 0.251 s zaman aralığında eşit aralıklı bölünmüş, elde edilen beş kavitasyon görüntüsü aşağıda verilmiştir (Şekil 6.6.).



Şekil 6.6 Hidrofoiller için bir tam döngüde meydana gelen 5 kavitasyon gelişim aşamasının kavitasyon görüntüleri

(Hız V= 5.0 m/s, kavitasyon sayısı σ = 2.21 (Tüberküllü hidrofoil için σ = 2.18))

Şekil 6.6'de gösterildiği gibi, Tüberküllü hidrofoil için, tabaka-bulut kavitasyonu sadece tüberküller arasında (çukur bölgelerde) ön kenardan yaklaşık olarak hidrofoil kordunun yarısına kadar uzanır ve kavitasyon bölgesi zamanla neredeyse sabit kalır. Bununla birlikte, bulut kavitasyonu tabaka kavitasyonunu neredeyse tamamen kapladığından, tabaka kavitasyonu bölgesinin sınırlarını belirlemek diğer hidrofoillere göre daha zordur. Sade ve Oluklu hidrofoiller için, kavitasyonun gelişim aşamaları sırasında tabaka kavitasyon bölgeleri benzerdir ve en fazla hidrofoil yüzeyinin yaklaşık yarısına kadar uzanır. Bununla birlikte, tabaka kavitasyonunu takip eden bulut kavitasyonu Oluklu geometri için biraz daha yüksektir.

6.2.2 Reynolds ve Kavitasyon Sayılarının Etkileri

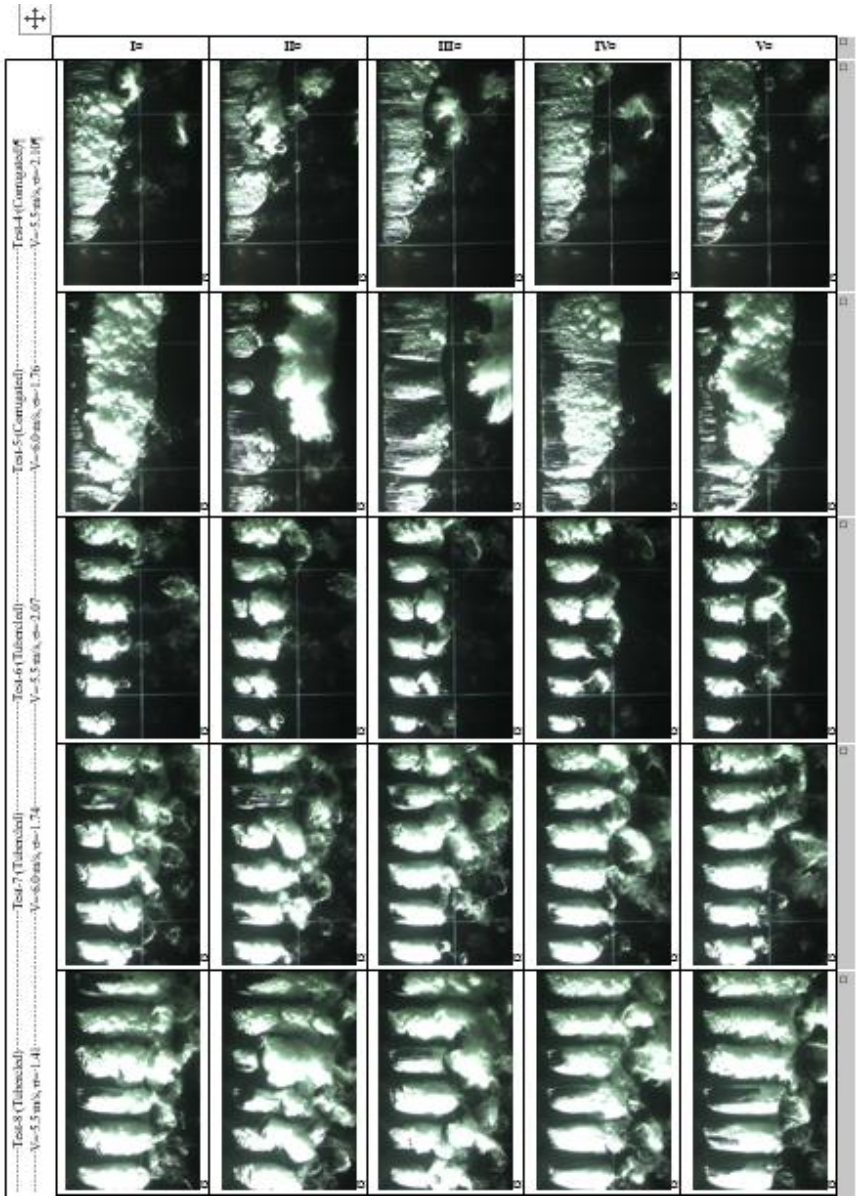
Yukarıda sonuçları sunulan karşılaştırma analizleri kapsamında gerçekleştirilen deneylerin yanı sıra, Oluklu ve Tüberküllü modellerle Tablo 6.3'te verilen farklı Reynolds ve kavitasyon sayıları koşulları için ilave deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, hidrofoil model ve model ile tünel arasındaki bağlantı elemanları için yapısal açıdan ortaya çıkabilecek sorunlar göz önünde bulundurularak, kavitasyon tünelinin kapasitesi debi ve vakum açısından test düzeneği sınırına kadar test edilmiştir.

Tablo 6.3 Ek kavitasyon deneylerine ait akış koşulları ve zaman aralıkları

Test No	Geometri	Giriş hızı, V (m/s)	Reynolds Sayısı, Re (-)	Kavitasyon sayısı, σ (-)	Zaman aralığı		Periyot, T (s)
Test-4	Oluklu	5.5	2.08×10^6	2.49	0.155	0.228	0.073
Test-5	Oluklu	6	2.27×10^6	2.09	0.087	0.205	0.118
Test-6	Tüberküllü	5.5	2.06×10^6	2.46	0.039	0.072	0.033
Test-7	Tüberküllü	6	2.24×10^6	2.07	0.09	0.132	0.042
Test-8	Tüberküllü	5.5	2.06×10^6	1.80	0.277	0.364	0.087

Şekil 6.6'daki Test-2 (Oluklu, V=5 m/s, σ =2.21) ve Şekil 6.7'deki Test-5'in (Oluklu, V=6 m/s, σ =2.09) yaklaşık sabit kavitasyon sayısı ve farklı hızlardaki kavitasyon

görüntülerinden de açıkça görüleceği üzere, artan Reynolds sayısı ile tüm kavitasyon aşamalarında tabaka kavitasyon bölgeleri hidrofoil ucuna doğru genişlemektedir. Tabaka kavitasyonu esas olarak çukur bölgelerde oluşmakta, kavitasyonun bazı aşamalarında tümseklerde hiç kavitasyon oluşmamakta ve kavitasyon bölgesinin parçalı kısımları daha yüksek hızlarda çok daha belirgin olmaktadır. Buna ek olarak, tabaka kavitasyonunu takip eden bulut kavitasyonu miktarı, artan hız ile önemli ölçüde daha büyük bir seviyeye ulaşmaktadır. Benzer şekilde, Test-3 (Oluklu, V=5 m/s, σ =2.18) ve Test-7 (Oluklu, V=6 m/s, σ =2.07) kavitasyon görüntülerinde yaklaşık sabit kavitasyon sayısında artan hız ile kavitasyon oluşumunda hafif bir artış gözlemlenmektedir.



Şekil 6.7 Ek deneylerden elde edilen kavitasyon görüntüleri

Yaklaşık olarak aynı kavitasyon sayısı ve aynı hızlara sahip Test-4 (Oluklu, V=5.5 m/s, σ =2.49) ve Test-6 (Tüberküllü, V=5.5 m/s, σ =2.46) kavitasyon görüntülerinden, Tüberküllü modelin kavitasyon bölgesinin Oluklu modele göre hidrofoil ucuna doğru kanat yönünde daha fazla genişlediği görülmektedir. Bununla birlikte, tabaka kavitasyon bölgesinin alanı Tüberküllü model için daha küçüktür ve kavitasyon gelişim aşamalarındaki değişim, diğer Tüberküllü model testlerinde olduğu gibi oldukça azdır. Oluklu model için Test-5 ve Tüberküllü model için Test-7 yaklaşık olarak aynı akış koşullarına sahiptir, ancak kavitasyon sayıları Test-4 ve Test-6'ya göre daha düşük ve Reynolds sayıları daha yüksek olduğundan, hidrofoiller üzerindeki kavitasyon oluşumları da daha fazla gözlemlenmektedir.

Tüberküllü modelinin Test-6, 7 ve 8 sonuçları da Şekil 6.7'de sunulmuştur. Her bir durum için kavitasyon gelişim aşamaları yaklaşık olarak benzer olsa da kavitasyon bölgesinin büyümesinin kavitasyon sayıları azaldıkça meydana geldiği görüntülerden açıkça görülebilir.

6.3 Sonuçlar

Kanat açıklığı oranı 3.33 olan üç bükümlü hidrofoil (NACA 0015 kesitli Sade, Tüberküllü ve Oluklu) için farklı kavitasyon sayıları ve Reynolds sayılarında yapılan deneysel çalışmaların sonuçları sunulmuştur. Modeller zamana bağlı kavitasyon görüntüleri ve kavitasyon oluşum süreleri açısından karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Deneysel modeller, bükümlülük, giriş ucu tüberkülü ve yüzey oluğu gibi geometrik detayları en iyi şekilde temsil etmek için mümkün olan en büyük boyutlarda (120 cm x 36 cm) üretilmiştir ve literatürde benzer deneylerde kullanılan en büyük modeller arasındadır. Test-4 (Oluklu, V=5.5 m/s, σ =2.49) model testleri için hesaplanan toplam belirsizlik değerleri kavitasyon alanı için %3.96, kavitasyon süresi için %3.62 ve maksimum kavitasyon uzunluğu için %2.94'tür.
- Kıyaslama testlerinden (Sade için Test-1, Oluklu için Test-2 ve Tüberküllü için Test-3); Oluklu modelin tabaka kavitasyon alanı ve periyodu Sade modelinkilerden biraz daha yüksekken, Tüberküllü modelin kavitasyon alanı diğer değerlerin yaklaşık %70'i ve kavitasyon periyodu yaklaşık %50'sidir.

Tüberküllü modelin kavitasyonu sadece oluklar arasında meydana gelmekte ve bir döngü içindeki kavitasyon uzunlukları neredeyse sabit kalmaktadır. Ayrıca, Oluklu modelde, tabaka kavitasyonunu takip eden bulut kavitasyonunun Sade'ye göre daha fazla oluştuğu gözlenmektedir.

- Sabit kavitasyon sayısı (σ) için farklı akış hızlarında Oluklu model ile yapılan deneylerde; hız arttıkça kavitasyonun hidrofoilin ucuna doğru yayıldığı ve kavitasyon bölgesinin özellikle hidrofoilin oluklu kısımlarında parçalanabildiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, sabit kavitasyon sayısında Tüberküllü model için artan hız biraz daha fazla kavitasyon oluşumuna neden olmaktadır.
- Oluklu ve Tüberküllü modellerle sabit hız ve sigmada yapılan deneylerde; Tüberküllü modelin kavitasyon bölgesi, hidrofoilin ucuna doğru kanat açıklığı yönünde Oluklu modele göre daha fazla genişlemektedir. Bununla birlikte, tabaka kavitasyon bölgesinin alanı Tüberküllü model için daha küçüktür ve kavitasyon gelişim aşamalarındaki değişiklikler oldukça azdır. Bu sebeple de Tüberküllü hidrofoilde fazları ayırt etmek oldukça zordur.
- Farklı hızlarda ve sigma değerlerinde gerçekleştirilen Tüberküllü model deneylerinden; beklendiği gibi kavitasyon sayısının azalmasıyla birlikte kavitasyon bölgesinin büyüdüğü gözlemlenmiştir, ancak her durumda kavitasyon gelişim aşamaları yaklaşık olarak benzerdir.

7

SONUÇ

Mevcut tez çalışması kapsamında denizcilikte pek çok kullanım alanı bulunan hidrofoillerin performansını arttırmak, kavitasyon oluşumunu ve buna bağlı ortaya çıkabilecek olumsuzlukları azaltmak amacıyla büküm, tüberkül ve olukluluk modifikasyonlarının etkisi incelenmiştir.

Bu bağlamda, çalışmanın ilk kısmında kavitasyonsuz akış koşullarında HAD analizleriyle modelleme yapılmıştır. Geçerleme çalışması için Delft Twist-11 olarak bilinen hidrofoil etrafındaki akış alanı modellenmiş, basınç katsayısı ve kaldırma kuvveti literatürdeki deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Ağ bağımsızlığı çalışmaları da deneysel kaldırma katsayısı değeri ile kıyaslanarak tamamlanmıştır. RANS ile gerçekleştirilen analizler, 4.5M ağ hücresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra farklı kesit kalınlığı ve bükümlülüğe sahip yeni hidrofoil geometrileri oluşturulmuştur. Bu geometriler -2 ila 8 derece hücum açısı aralığında kavitasyonsuz akış koşullarında analiz edilmiştir. Analizlerin sonucunda kaldırma katsayısının bükümlü hidrofoillerde en yüksek olduğu ancakkesit kalınlığından etkilenmediği görülmüştür. Bununla birlikle direnç katsayılarının bükümlülüğe bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği tespit edilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci kısmında ise kavitasyonsuz akış koşullarında analizleri tamamlanan geometrilerin kavitasyonlu durumdaki analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda öncelikle geçerleme çalışması, kavitasyonlu akış koşullarına ait deneysel verilerle tamamlanmıştır. Başarılı bir şekilde tamamlanan geçerleme çalışmasından sonra tüm geometriler kavitasyonlu durumda analiz edilmiştir. Bu kısımda ilk aşamada RANS yöntemiyle gerçekleştirilen analizlerde kaldırma ve direnç katsayılarının literatürle uyumlu bir şekilde elde edilebildiği, ancak kavitasyon fazlarının elde edilmesinde aynı başarının sağlanamadığı görülmüştür. Bu sebeple analizlere DES yöntemiyle devam edilmiş, bu şekilde kavitasyon doğası gereği salınımlı bir şekilde meydana gelen kavitasyon alanı değişimi, kavitasyon fazları ve kavitasyon periyodu başarılı bir şekilde elde edilebilmiştir.

Çalışmanın üçüncü kısmında gerçekleştirilen analizler doğrultusunda kalın kesitli ve yarı bükümlü olarak tanımlanan hidrofoile giriş ucu tüberkülü ilavesi yapılmıştır. Tüberkülsüz ve tüberküllü olarak tanımlanan hidrofoiller kavitasyonlu akış durumlarında farklı hücum açılarında kıyaslanmıştır. Burada dikkati çeken, tüberkül ilavesinin mevcut akış koşullarında kaldırma kuvvetini arttırmada yetersiz kaldığı, ancak hücum açısı arttıkça direnç kuvvetini azaltarak hidrofoil performansına olumlu etki katmasıdır. Bununla birlikte, yüzeyde oluşan kavitasyon alanını belirgin bir şekilde azalttığı ve belli hücum açılarında kavitasyon periyodunu da azalttığı görülmektedir.

Çalışmanın dördüncü kısmında ise kalın kesitli yarı bükümlü hidrofoile tüberkül modifikasyonu ile uyumlu olacak şekilde yüzey olukluluğu uygulaması yapılmıştır. Dört farklı oluk uygulaması yapılmış hidrofoil, tüberküllü ve tüberkülsüz hidrofoiller ile önce kavitasyonsuz durumda kıyaslanmıştır. Daha sonra tek bir hücum açısında kavitasyonlu akış durumunda kıyaslamalar yapılmıştır. Burada en iyi performans gösteren oluklu geometriye karar verilmiştir. Daha sonra, farklı hücum açılarında seçilen oluklu hidrofoil ile tüberkülsüz ve tüberküllü hidrofoiller kavitasyon alanı, kaldırma ve direnç katsayıları dikkate alınarak kıyaslanmıştır. Burada elde edilen veriler dikkate alındığında, yüzey olukluluğunun küçük açılarda olumlu etkisinin görülemediği, ancak yüksek hücum açılarında performans ve kavitasyon oluşumlarında olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Tez çalışmasının son kısmında HAD analizleri sonucunda belirlenmiş olan Oluklu hidrofoil ile Sade ve Tüberküllü hidrofoil kavitasyon tünelinde farklı kavitasyon sayısı ve Reynolds sayısı durumlarında test edilmiştir. Deneyler tek bir hücum açısında (3 derece) gerçekleştirilmiştir. Farklı kavitasyon sayıları tüneldeki vakum basıncı ve hızı değiştirerek elde edilmiştir. Burada elde edilen veriler ışığında, Oluklu ve Sade hidrofoillerin oldukça benzer kavitasyon oluşumu karakteristiği gösterdiği görülmüştür. Tüberküllü hidrofoil üzerindeki kavitasyon oluşumunun çukur bölgelerde, oldukça düşük periyotlarda (diğer hidrofoillere göre yaklaşık %50 daha az) oluştuğu gözlemlenmiştir.

Çalışmanın bir sonraki hedefi, deneysel verileri elde edilmiş olan geometrilerin farklı hücum açısı ve farklı akış koşullarında HAD analizlerini gerçekleştirerek bu geometrilerin farklı durumlardaki performanslarını incelemektir.

8

KAYNAKÇA

Abbott, I. H., von Doenhoff, A. E., & Stivers, L. J. (1945). Summary of Airfoil Data (NACA-TR-824). Work of the US Gov. Public Use Permitted.

Amano, R. and Xu, C. (2003) ' Aerodynamic Blade Design of Turbomachinery ', in *Proceedings of the International Gas Turbine Congress*. Tokyo. Available at: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Aerodynamic blade optimal design of turbomachinery&publication_year=2003&author=R.S. Amano&author=C. Xu (Accessed: 19 December 2024).

Asnaghi, A., Feymark, A. and Bensow, R. E. (2018) 'Numerical investigation of the impact of computational resolution on shedding cavity structures', *International Journal of Multiphase Flow*, 107, pp. 33–50. doi: 10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2018.05.021.

Bangga, G. *et al.* (2017) 'Aerodynamic performance of a small vertical axis wind turbine using an overset grid method', *AIP Conference Proceedings*, 1867(1), p. 20005. doi: 10.1063/1.4994408/972713.

Bensow, R. (2011) 'Cavitation on foil Simulation of the unsteady cavitation on the the Delft Twist 11 foil using RANS , DES and LES'.

Bensow, R. E. (2014) 'Simulation of the unsteady cavitation on the the Delft Twist11 foil using RANS , Simulation of the unsteady cavitation on the the Delft Twist11 foil using RANS , DES and LES', (May).

Bin, J. I., Xian-Wu, L. and Peng, X.-X. (2013) 'Three-dimensional large eddy simulation and vorticity analysis of unsteady cavi-tating flow around a twisted hydrofoil *', 510(4), pp. 510–519. doi: 10.1016/S1001-6058(11)60390-X.

Chau, S. W. *et al.* (2004) 'Investigation of cavitation inception characteristics of hydrofoil sections via a viscous approach', *Journal of Marine Science and Technology*, 8(4), pp. 147–158. doi: 10.1007/S00773-003-0165-3/METRICS.

Chen, J. ., Li, S. . and Nguyen, V. . (2012) ‘The Effect Of Leading Edge Protuberances On ThePerformance Of Small Aspect Ratio Foils’. doi: 10.13140/RG.2.1.3716.7841.

Chen, Y. *et al.* (2017) ‘Large Eddy Simulation and investigation on the flow structure of the cascading cavitation shedding regime around 3D twisted hydrofoil’, *Ocean Engineering*, 129(June 2016), pp. 1–19. doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.11.012.

Chen, Y. *et al.* (2019) ‘Large eddy simulation and investigation on the laminar-turbulent transition and turbulence-cavitation interaction in the cavitating flow around hydrofoil’, *International Journal of Multiphase Flow*, 112, pp. 300–322. doi: 10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2018.10.012.

Cheng, H. Y. *et al.* (2020) ‘Large eddy simulation of the tip-leakage cavitating flow with an insight on how cavitation influences vorticity and turbulence’, *Applied Mathematical Modelling*, 77, pp. 788–809. doi: 10.1016/J.APM.2019.08.005.

Clancy, L. J. (1975) *Aerodynamics*, *(No Title)*. Pitman. Available at: https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282272014882304 (Accessed: 19 December 2024).

Cruz, A. *et al.* (2022) ‘Aerodynamic Performance of Symmetric and Cambered Airfoils at Low Reynolds Numbers’, *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM*, 1. doi: 10.1115/FEDSM2022-86960.

Custodio, D., Henoch, C. and Johari, H. (2018) ‘Cavitation on hydrofoils with leading edge protuberances’, *Ocean Engineering*, 162, pp. 196–208. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.033.

Dongli, M. *et al.* (2015) ‘Effects of relative thickness on aerodynamic characteristics of airfoil at a low Reynolds number’, *Chinese Journal of Aeronautics*, 28(4), pp. 1003–1015. doi: 10.1016/J.CJA.2015.05.012.

Drela, M. (1989) ‘XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils’, *Low Reynolds Number Aerodynamics. Proc. Conf., Notre Dame, U.S.A., JUNE 5-7, 1989 }Edited By T.J. Mueller]. (Lecture Notes in,*

(54), Berlin, Germany, Springer-Verlag, 1989), pp. 1–12. doi: 10.1007/978-3-642-84010-4_1.

Fan, M. *et al.* (2023) 'Effect of leading-edge tubercles on the hydrodynamic characteristics and wake development of tidal turbines', *Journal of Fluids and Structures*, 119, p. 103873. doi: 10.1016/J.JFLUIDSTRUCTS.2023.103873.

Ferziger, J. H. and Perić, M. (2002) *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd edn, *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd edn. Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-56026-2.

Fish, F. E., & Battle, J. M. (1995). Hydrodynamic design of the humpback whale flipper. *Journal of Morphology*, *225*(1), 51–60. https://doi.org/10.1002/JMOR.1052250105

Fish, F. E. and Lauder, G. V. (2006) 'Passive and active flow control by swimming fishes and mammals', *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38(Volume 38, 2006), pp. 193–224. doi: 10.1146/ANNUREV.FLUID.38.050304.092201/CITE/REFWORKS.

Foeth, E.-J. (2008a) *The Structure Of Three-Dimensional Sheet Cavitation*. Delft University of Technology.

Foeth, E. J. (2008b) *Pressure and Lift Measurements on the Twist 11 Hydrofoil*. Available at: http://maritimetechnology.tudelft.nl/SHS/ (Accessed: 19 December 2024).

Fujii, A. *et al.* (2007) 'Effect of Hydrofoil Shapes on Partial and Transitional Cavity Oscillations', *Journal of Fluids Engineering*, 129(6), pp. 669–673. doi: 10.1115/1.2734183.

Goundar, J. N., Ahmed, M. R. and Lee, Y. H. (2012) 'Numerical and experimental studies on hydrofoils for marine current turbines', *Renewable Energy*, 42, pp. 173–179. doi: 10.1016/J.RENENE.2011.07.048.

Hoekstra, M., Van Terwisga, T. and Foeth, E. J. (2011) *smp'11 Workshop-Case 1: DelftFoil*. Available at: http://maritimetechnology.tudelft.nl/SHS/.

Jacobs, E. N. and Edwards Ward, K. (1933) *The Characteristics of 78 Related Airfoil Section from Tests in the Variable -Density Wind Tunnel*. Available

at: https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=DnuiVJ5_NTsC&oi=fnd&pg=PA5&ots=4J4QmtEeAm&sig=cHYvId0YC0eiHmum3nAb6eFrpUA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (Accessed: 19 December 2024).

Jacobs, E. and Sherman, A. (1939) *Report no. 586, Airfoil section characteristics as affected by variations of the Reynolds number*, *Journal of the Franklin Institute*. Elsevier BV. doi: 10.1016/S0016-0032(37)90818-4.

Ji, B. *et al.* (2013) 'Numerical analysis of unsteady cavitating turbulent flow and shedding horse-shoe vortex structure around a twisted hydrofoil', *International Journal of Multiphase Flow*, 51, pp. 33–43. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.11.008.

Johari, H.. (2008) *Applications of Hydrofoils with Leading-Edge Protuberances*.

Kangmin, C. (2009) 'Aerodynamic characteristics of twisted blade influenced by twisted power in micro axial fans', *Journal of Mechanical Engineering*. Available at: http://qikan.cmes.org/jxgcxb/EN/PDF/17992 (Accessed: 19 December 2024).

Kaygan[1], E. and Ulusoy, C. (2018) 'Effectiveness of Twist Morphing Wing on Aerodynamic Performance and Control of an Aircraft', *Journal of Aviation*, 2(2), pp. 77–86. doi: 10.30518/JAV.482507.

Kinnas, S. A. (1991) 'Leading-Edge Corrections to the Linear Theory of Partially Cavitating Hydrofoils', *Journal of Ship Research*, 35(01), pp. 15–27. doi: 10.5957/JSR.1991.35.1.15.

Klapwijk, M. *et al.* (2021) 'On the use of synthetic inflow turbulence for scale-resolving simulations of wetted and cavitating flows', *Ocean Engineering*, 228, p. 108860. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2021.108860.

Koop, A. H. (Arjen H. (2008) *Numerical simulation of unsteady three-dimensional sheet cavitation*. s.n.].

Le, T. Q. *et al.* (2013) 'Improvement of the aerodynamic performance by wing flexibility and elytra-hind wing interaction of a beetle during forward flight', *Journal of the Royal Society Interface*, 10(85). doi: 10.1098/rsif.2013.0312.

Lebeau, A. and Isaac, K. M. (2018) ‘Aerodynamics of Bio-Inspired Wings’.

Leroux, J. B., Astolfi, J. A. and Billard, J. Y. (2004) ‘An Experimental Study of Unsteady Partial Cavitation’, *Journal of Fluids Engineering*, 126(1), pp. 94–101. doi: 10.1115/1.1627835.

Li, D. *et al.* (2021) ‘Bionic leading-edge protuberances and hydrofoil cavitation’, *Physics of Fluids*, 33(9), p. 093317. doi: 10.1063/5.0069587.

Liu, J. *et al.* (2017) ‘Hydrodynamic characteristics of multiple-rudder configurations’, *Ships and Offshore Structures*, 12(6), pp. 818–836. doi: 10.1080/17445302.2016.1275472.

Lohry, M. W., Clifton, D. and Martinelli, L. (2012) ‘Characterization and Design of Tubercle Leading-Edge Wings’, in *Seventh International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD7)*. Big Island, Hawai: Seventh International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD7).

Long, X. *et al.* (2018) ‘Large eddy simulation and Euler–Lagrangian coupling investigation of the transient cavitating turbulent flow around a twisted hydrofoil’, *International Journal of Multiphase Flow*, 100, pp. 41–56. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.12.002.

Lu, N., Bensow, R. E. and Bark, G. (2010) ‘LES of unsteady cavitation on the delft twisted foil’, *Journal of Hydrodynamics 2010 22:1*, 22(1), pp. 742–749. doi: 10.1016/S1001-6058(10)60031-5.

Macduff, T. (2004) ‘Rudder with horizontal corrgugations on each side face’. United Kingdom: UK Patent Application. Available at: https://patentimages.storage.googleapis.com/90/4f/ed/f45df26472270c/GB2393170A.pdf (Accessed: 17 January 2025).

Maquil, T. *et al.* (2011) *RANS Simulation of the Delft Twist 11 Foil*.

Melissaris, T., Bulten, N. and Van Terwisga, T. J. C. (2019) ‘On the applicability of cavitation erosion risk models with a URANS solver’, *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 141(10). doi: 10.1115/1.4043169.

Mishra, A. and De, A. (2021) ‘Investigation of passive flow control over an airfoil using leading edge tubercles’, *Journal of Flow Visualization and Image*

Processing, 30(1), pp. 1–36. doi: 10.1615/JFlowVisImageProc.2022040289.

Movahedian, A., Pasandidehfard, M. and Roohi, E. (2019) 'LES investigation of sheet-cloud cavitation around a 3-D twisted wing with a NACA 16012 hydrofoil', *Ocean Engineering*, 192(March). doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106547.

Obeid, S., Jha, R. and Ahmadi, G. (2017) 'RANS Simulations of Aerodynamic Performance of NACA 0015 Flapped Airfoil', *Fluids 2017, Vol. 2, Page 2*, 2(1), p. 2. doi: 10.3390/FLUIDS2010002.

Oksuz, S., Celik, F. and Bayraktar, S. (2023) 'Three-dimensional computational analysis of flow over twisted hydrofoils', *Ocean Engineering*, 267, p. 113304. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2022.113304.

Papadopoulos, C. *et al.* (2022) 'Numerical investigation of the impact of tubercles and wing fences on the aerodynamic behaviour of a fixed-wing, tactical Blended-Wing-Body UAV platform', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1226(1), p. 012015. doi: 10.1088/1757-899X/1226/1/012015.

Park, S. and Rhee, S. H. (2013) 'Numerical analysis of the three-dimensional cloud cavitating flow around a twisted hydrofoil', *Fluid Dynamics Research*, 45(1). doi: 10.1088/0169-5983/45/1/015502.

Piranha Propellers (no date). Available at: https://piranha.com/ (Accessed: 17 January 2025).

Posa, A., Broglia, R., Shi, W., & Felli, M. (2024). Large eddy simulation of a marine propeller with leading edge tubercles. *Physics of Fluids, 36*(11). https://doi.org/10.1063/5.0239789/3320079

Roache, P. J. (1998) 'Verification of codes and calculations', *AIAA Journal*, 36(5), pp. 696–702. doi: 10.2514/2.457.

Roy, A. and Mukherjee, R. (2020) 'Three dimensional rectangular wing morphed to prevent stall and operate at design local two dimensional lift coefficient', *Aerospace Science and Technology*. doi: 10.1016/j.ast.2020.106312.

Sarraf, C., Djeridi, H. and Billard, J.-Y. (2007) 'Thickness and cavitation effects

on vibrations of hydrofoils at large angle of attack', p. 10. doi: 10.1007/978-1-4020-8630-4_20ï.

Schneider, C. A., Rasband, W. S. and Eliceiri, K. W. (2012) 'NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis', *Nature methods*, 9(7), pp. 671–675. doi: 10.1038/NMETH.2089.

Seeni, A. (2022) 'A theory on understanding aerodynamic phenomena of airfoils and the significance of airfoil's thickness on lift and drag', *INCAS BULLETIN*, 14(3), pp. 101–110. doi: 10.13111/2066-8201.2022.14.3.9.

Shi, W. *et al.* (2016) 'Numerical optimization and experimental validation for a tidal turbineblade with leading-edge tubercles', *Renewable Energy*, 96(A), pp. 42–55. doi: 10.1016/j.renene.2016.04.064.

Shin, Y. J. *et al.* (2019) 'A numerical and experimental study on the performance of a twisted rudder with wavy configuration', *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11(1), pp. 131–142. doi: 10.1016/J.IJNAOE.2018.02.014.

Shukla, S. *et al.* (2023) 'Flow over a hydrofoil subjected to traveling wave-based surface undulation: effect of phase difference between surface waves and wave number', *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 37(3), pp. 319–336. doi: 10.1007/s00162-023-00646-1.

Simanto, R. I. A. *et al.* (2022) 'Experimental investigation on cavitation and induced noise of two-dimensional hydrofoils with leading-edge protuberances', *Physics of Fluids*, 34(12). doi: 10.1063/5.0127170.

Sogukpinar, H. (2017) 'Numerical simulation of 4-digit inclined NACA 00xx airfoils to find optimum angle of attack for airplane wing'. Uludağ Üniversitesi. doi: 10.17482/uumfd.309470.

Star CCM+ User Guide version 9.04. (2022). CD-adapco Corporation.

Stark, C. and Shi, W. (2021) 'Hydroacoustic and hydrodynamic investigation of bio-inspired leading-edge tubercles on marine-ducted thrusters', *Royal Society Open Science*, 8(9). doi: 10.1098/RSOS.210402.

Tanarro, Á. *et al.* (2020) 'Enabling Adaptive Mesh Refinement for Spectral-

Element Simulations of Turbulence Around Wing Sections', *Flow, Turbulence and Combustion*, 105(2), pp. 415–436. doi: 10.1007/S10494-020-00152-Y/FIGURES/17.

Tezdogan, T. *et al.* (2015) 'Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming', *Ocean Engineering*, 97, pp. 186–206. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2015.01.011.

Usta, O. (2018) *Gemi Pervanelerinde Kavitasyon Ve Kavitasyon Erozyonu Modellemesi*. Istanbul Technical University.

Usta, O. and Korkut, E. (2019) 'Prediction of cavitation development and cavitation erosion on hydrofoils and propellers by Detached Eddy Simulation', *Ocean Engineering*, 191. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2019.106512.

Vaz, G., Lloyd, T. and Gnanasundaram, A. (2017) *Improved modelling of sheet cavitation dynamics on Delft Twist 11 hydrofoil*. Available at: www.refresco.org.

Wang, G. and Ostoja-Starzewski, M. (2007) 'Large eddy simulation of a sheet/cloud cavitation on a NACA0015 hydrofoil', *Applied Mathematical Modelling*, 31(3), pp. 417–447. doi: 10.1016/J.APM.2005.11.019.

Whitworth, S. (2011) 'Cavitation prediction of flow over the Delft Twist 11 Foil', in *Second International Symposium on Marine Propulsors*. Hamburg, Germany, pp. 15–17.

Wilcox, D. C. (2006) *Turbulence Modelling for CFD 3rd Edition*. 3rd edn. Available at: http://www.dcwindustries.com.

Wu, X. C., Wang, Y. W. and Huang, C. G. (2016) 'Effect of mesh resolution on large eddy simulation of cloud cavitating flow around a three dimensional twisted hydrofoil', *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 55, pp. 229–240. doi: 10.1016/j.euromechflu.2015.09.011.

Xu, R. E. and Wu, Z. (2023) 'Numerical Simulation of Flow Over Airfoil and Its Optimization', *Journal of Physics: Conference Series*, 2441(1). doi: 10.1088/1742-6596/2441/1/012004.

Yin, T. *et al.* (2018) ‘Comparison of Various Turbulence Models Applied to a Twisted Hydrofoil’, *Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018)*, pp. 269–275. doi: 10.1115/1.861851_CH52.

Yin, T. *et al.* (2021) ‘Numerical investigation of unsteady cavitation around a twisted hydrofoil’, *International Journal of Multiphase Flow*, 135. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103506.

You, H. *et al.* (2019) ‘New Concept for Aircraft Morphing Wing Skin: Design, Modeling, and Analysis’. doi: 10.2514/1.J058102.

9

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Öksüz, S.; Usta, O.; Celik, F.(2024).Experimental and Numerical Investigation of Twisted Hydrofoils in Cavitating Flow.*G-NAOE 2024*.

2. Öksüz, S.; Çelik, F.; Usta, O.(2023).Numerical Investigation of the Twisted Profile Effect on Hydrofoils in Cavitating Flow.*4th International Symposium on Naval Architecture and Maritime*.

Makaleler

1. Çelik, F., Usta, O., Öksüz, S., Delikan, M., Kara, E., Özsayan, S., & Ünal, U. O. (2025). Experimental investigation of leading-edge tubercle and surface corrugation effects on cavitation and noise in partially cavitating twisted hydrofoils. *Ocean Engineering, 324,* 120646. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2025.120646

2. Öksüz, S.; Usta, O.; Celik, F.(2024).Investigation of Numerical Solution Approaches for The Cavitating Flow Analysis of Twisted Hydrofoils.*Ocean Engineering*, vol.312.

3. Öksüz, S.; Celik, F.; Bayraktar, S.(2023).Three-dimensional Computational Analysis of Flow Over Twisted Hydrofoils.*Ocean Engineering*, vol. 267, p. 113304.

Projeler

1. YTU Genel Araştırma Projesi: Üç Boyutlu Bükülmüş Hidrofoillerde Tüberkül ve Kanal Etkisinin Deneysel Kavitasyon Tüneli Testleri ve Sayısal HAD Analizleri Olarak İncelenmesi (Proje Kodu: FBA-2024-6032)