



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**BİR OTONOM SU ALTI ARAÇ MODELİNİN
HİDRODİNAMİK AKIŞ
KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL
ARAŞTIRILMASI**

Mehmet ERDEM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı

**Kasım-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİR OTONOM SU ALTI ARAÇ MODELİNİN HİDRODİNAMİK AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Mehmet ERDEM

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Muammer ÖZGÖREN

2022, 120 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mesut UYANER

Prof. Dr. Muammer ÖZGÖREN

Dr. Öğr. Üyesi Havva DEMİRPOLAT

Bu tez çalışmasında, arkası küt bir su altı otonom araç modelinin burun yapısı, uzunluğu ve model etrafındaki akış parametreleri değiştirilerek, söz konusu akış yapısının ve karakterinin ne şekilde değiştiği deneysel olarak incelenmiştir. Modelin iki farklı burun yapısı (eliptik ve yarı eliptik) ve iki farklı uzunluğu ($L=220$ ve 320 mm) için su tüneline PIV (Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme) ve boya görselleştirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. PIV ve boya deneylerinde, su tüneline Reynolds sayısı ($Re=32000$ ve 64000), daldırma oranı ($0.5 \leq h/D \leq 3.5$) ve hücum açısı ($\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ ve 12°) parametreleri değiştirilerek akış karakteristiği ve serbest yüzeyin etkisi araştırılmıştır. Çalışmada geometri etrafında oluşan akış özellikleri; akım yönündeki ve dik yöndeki hız bileşenleri (u ve v), akım çizgileri (ψ), Reynolds gerilmeleri, türbülans kinetik enerji (TKE), girdap ve türbülans çalkantı kontur değişimleri anlık ve ortalama olarak ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlarda, daldırma oranı $h/D < 1.5$ durumunda her iki Reynolds sayısı için art izi bölgesinin serbest yüzey etkisinden dolayı çok karmaşık olduğu ve yine art izinin söz konusu daldırma oranlarında, çoğunlukla alt kayma tabakasının etkisinde oluşmasından kaynaklı olarak asimetric bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca daldırma oranlarının $h/D=0.5$ ve 0.75 olduğu durumlarda geometrinin alt tarafından ayrılan akış serbest yüzeye yönelerek tekrar bağlanmıştır. Daldırma oranı $h/D \geq 1.5$ durumlarında ise zaman ortalamalı akış yapıları, serbest yüzey etkisi ciddi oranda azaldığı için neredeyse simetric yapılar göstermiştir. Reynolds sayısının $Re=32000$ değerinden 64000 'e çıkarıldığı durumlarda art izindeki kritik noktaların geometrinin arka kenarına daha yakın olduğu açıkça görülmüştür. Ayrıca, rüzgâr tüneline kuvvet ölçüm ve çeşitli akış görselleştirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde $D=40$ mm ve 60 mm çap değerleri için $L/D=5.5$ ve 8 oranlarını sağlayan modeller oluşturulmuştur. Her bir model için, rüzgâr tüneline ve kuvvet sensörünün hassasiyeti de göz önüne alınarak $Re=1.2 \times 10^5, 2.4 \times 10^5, 3.6 \times 10^5, 4.8 \times 10^5, 6.0 \times 10^5$ ve 7.2×10^5 değerlerinden en az üçünde ölçüm alınmıştır. Modellerin hücum açısı $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığında 2° aralıklarla artacak şekilde değiştirilmiştir. Kuvvet deneyleri sonucunda; hücum açısının belirlenen aralıkta artışının, C_L ve C_D değerlerini artırdığı; uygulanan Re sayısı değerleri için, Reynolds sayısındaki artışın C_L ve C_D değerlerinde düşüş meydana getirdiği; eliptik uçlu modelin yarı- eliptik uçlu modele kıyasla, belirlenen hücum açısı aralığında ve Reynolds sayısı değerlerinde, daha yüksek C_D ve daha düşük C_L 'e sahip olduğu ve boy/en (L/D) oranının artışının hem C_L hem C_D değerleri için artış meydana getirdiği yargılarına ulaşılmıştır. Bu çalışmada elde edilen değerler ve sonuçlar, literatürdeki sonuçlarla da karşılaştırılmıştır. Sayısal araştırma ve tasarım için faydalı olabilecek çıktılar oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik, Hidrodinamik, o-give, otonom, PIV, Reynolds gerilmeleri, türbülanslı akış

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC FLOW CHARACTERISTICS OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE MODEL

Mehmet ERDEM

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN AIRCRAFT ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Muammer ÖZGÖREN

2022, 120 Pages

Jury

Prof. Dr. Mesut UYANER
Prof. Dr. Muammer ÖZGÖREN
Asst. Prof. Dr. Havva DEMİRPOLAT

In this thesis, of a blunt-back underwater autonomous vehicle model, the nose structure and the length, and the flow parameters around the model were changed, and how the flow structure changed was analysed experimentally. For two different nose structures (elliptical and semi-elliptical) and lengths (220 and 320 mm) of the model, PIV and dye visualization experiments were carried out in a water tunnel. In PIV and dye experiments, changing Re number (32000 and 64000), immersion ratio ($0.5 \leq h/D \leq 3.5$) and angle of attack ($\alpha = 0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ ve 12°) parameters, the effect of free surface was investigated. Streamwise and cross-stream velocity components (u and v), streamlines (ψ), Reynolds stresses correlations, turbulence kinetic energy (TKE), vorticity and turbulence fluctuation contour variations are considered as time-averaged. Then, it was observed that in the case of immersion ratio $h/D < 1.5$, the wake region for both Re numbers is very complex due to the free surface effect. Due to the formation of the wake under the effect of the lower shear layer at these immersion ratios, it has an asymmetrical structure. In cases where h/D was 0.5 and 0.75, the flow leaving the bottom of the geometry was directed towards the free surface and reconnected. In cases of $h/D \geq 1.5$, time-averaged flow structures showed almost symmetrical structures as the free surface effect was significantly reduced. In cases where the Re is increased from 32000 to 64000, it is clearly seen that the critical points in the wake region are closer to the trailing edge of the geometry. In addition, force measurement and various flow visualisation experiments were carried out in a wind tunnel. Models providing the ratios $L/D = 5.5$ and 8 with a diameter of $D = 40$ and 60 mm were designed. Taking into account the sensitivity of the wind tunnel and the force sensor, for each model here, data were obtained using at least three of the Re values in the interval of $1.2 \times 10^5 - 7.2 \times 10^5$. The angle of attack was chosen to increase in 2° intervals in the range of $0^\circ < \alpha < 30^\circ$. Then, the following conclusions have been reached: Increasing the angle of attack in the determined range increased the C_L and C_D ; for the applied Re values, the increase in the Re caused a decrease in the C_L and C_D ; the elliptical model had higher C_D and lower C_L compared to the semi-elliptical model in the determined angle of attack and Re, and the increase in L/D ratio resulted in an increase for both C_L and C_D . The results obtained in this study were also compared with the literature and the outputs that could be useful for numerical research and design were presented.

Keywords: Aerodynamics, autonomous, Hydrodynamics, ogive, PIV, Reynolds stresses, turbulent flow

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca her konuda tecrübesini, zamanını, sabrını, her şekilde ilgi ve yardımını kesinlikle esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Muammer ÖZGÖREN'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tarsus Üniversitesi Rektörü Prof. Dr. Orhan AYDIN'a, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Kasım OCAKOĞLU'na, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölüm Başkanı Doç. Dr. Muharrem KUNDURACI'ya akademik hayata verdikleri destekten dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımda teknik ve akademik altyapılarını hiçbir şekilde esirgemeyen Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Başkanı Doç. Dr. Bülent YANIKTEPE'ye ve yine çalışma sürecimde destek olan Öğr. Gör. Ertuğrul ŞEKEROĞLU'na, Ömer KENAN'a, Ezgi AKBUDAK'a, Alpaslan KILAVUZ'a ve Fuad SARIĞIGÜZEL'e teşekkürü borç bilirim. Aynı şekilde, Karadeniz Teknik Üniversitesi Aerodinamik ve Rüzgâr Enerjisi Araştırma Laboratuvarını kullanmama izin veren Doç. Dr. Mustafa SARIOĞLU'na ve deneylerimde tecrübeleriyle destek olan Arş. Gör. Dr. Mehmet SEYHAN'a, Aleyna ÇOLAK'a ve Oğuz CUMHUR'a teşekkür ederim.

Bu zorlu yolculukta her türlü desteklerinden dolayı sevgili çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Emre GÜLER'e ve Arş. Gör. Burak DEMİRTAŞ'a teşekkür ederim.

Ayrıca, bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 214M318 nolu proje ve Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 221316001 nolu proje ile desteklenmiştir. Destekleri için TÜBİTAK'a ve Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman ve her şekilde yanımda olan eşime ve aileme desteklerinden dolayı minnettarım.

Mehmet ERDEM
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
ÇİZELGELER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM	12
3.1. Akışı Etkileyen Parametreler	12
3.1.1. Burun Yapısı	12
3.1.2. İncelik Oranı	14
3.1.3. Reynolds Sayısı.....	15
3.1.4. Hücum Açısı	16
3.1.5. Daldırma Oranı	17
3.1.6. Diğer Parametreler	17
3.2. Deney Düzenekleri	18
3.2.1. PIV Deneyleri	19
3.2.2. Boya Deneyleri	22
3.2.3. Kuvvet Ölçüm Deneyleri ve Yüzey Yağ, İplikçik ve Duman Tel Akış Görselleştirme Deneyleri	23
3.2.4. Akış Karakteristiğini İfade Eden Değerler	27
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	30
4.1. PIV ve Boya Deney Sonuçları	30
4.1.1. Reynolds Sayısı ve Daldırma Oranı Değişiminin İncelenmesi	30
4.1.2. Hücum Açısı Değişiminin İncelenmesi	46
4.1.3. PIV Sonuçlarına Genel Bakış: Reynolds Değeri Değişimi, Hücum Açısı Değişimi, Burun Yapısı Değişimi ve Boy/En Oranı Değişiminin İncelenmesi	77
4.2. Kuvvet Ölçüm Deney Sonuçları	97
4.3. Yüzey Yağ, İplikçik ve Duman Tel Akış Görüntüleme Deney Sonuçları.....	104
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	112
5.1 Sonuçlar	112
5.2 Öneriler	116
6. KAYNAKLAR	117

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Ojiv silindir örnekleri	2
Şekil 1.2 Nüfuz Edici Bomba (NEB) (a) tasarlanmış ve (b) üretilmiş halleri	3
Şekil 3.1 Bazı ogive silindir örnekleri	13
Şekil 3.2 Çalışmada kullanılan eliptik (üst) ve yarı- eliptik (alt) ogive silindir şekilleri	13
Şekil 3.3 Uzunluk/Çap oranının model üzerine etkiden sürüklenme kuvvetine etkisi	14
Şekil 3.4 NACA2414 kanat profili (üst) için farklı Reynolds sayılarında, değişen hücum açısına göre C_D (sol alt) ve C_L (sağ alt) değişim grafikleri	16
Şekil 3.5 Kanat yapısı (airfoil) üzerinde hücum açısı gösterimi	17
Şekil 3.6 PIV deneylerinde kullanılan modellerin görselleri	19
Şekil 3.7 Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi su tüneli ve deneysel sistem	19
Şekil 3.8 PIV sistem düzeni ve çalışma şematik görünümü	20
Şekil 3.9 PIV akış diyagramı	22
Şekil 3.10 Boya deneyi sürecinden bir görüntü	22
Şekil 3.11 Emmeli tip rüzgâr tüneli test bölgesi ve kuvvet ölçüm sistemi	23
Şekil 3.12 Yarı-eliptik ve eliptik uçlu modellerin kuvvet ölçümü taslak görüntüleri	25
Şekil 3.13 Kuvvet ölçümü için yarı-eliptik ve eliptik uçlu modeller	25
Şekil 3.14 Yüzey yağ akış görüntüleme örneği	25
Şekil 3.15 Eliptik model üzerinde iplikçik akış görüntülemesi	26
Şekil 3.16 Yarı-eliptik model üzerinde duman tel akış görüntülemesi	27
Şekil 4.1 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında eliptik burun (uç) ve küt kuyruk model tasarım çevresindeki akış yapısı etkileri boy/en oranı $L/D=5.5$, hücum açısı ($\alpha=0^\circ$), daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, Reynolds sayısının $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde Rodamine 6G boya ile akış görüntülenme sonuçları	36
Şekil 4.2 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı hız vektör alanı $\langle V \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	37
Şekil 4.3 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım çizgileri topolojisi $\langle \Psi \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	38
Şekil 4.4 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle u/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	39
Şekil 4.5 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle v/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	40
Şekil 4.6 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı girdap konturları $\langle \omega L/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	41
Şekil 4.7 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	42
Şekil 4.8 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	43
Şekil 4.9 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi kontur dağılımları $\langle u'v'/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	44
Şekil 4.10 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji konturları $\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış	

yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	45
Şekil 4.11 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı hız vektör alanı $\langle V \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	50
Şekil 4.12 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım çizgileri topolojisi $\langle \Psi \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	51
Şekil 4.13 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle u/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	52
Şekil 4.14 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle v/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	53
Şekil 4.15 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı girdap konturları $\langle \omega L/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	54
Şekil 4.16 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	55
Şekil 4.17 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	56
Şekil 4.18 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi kontur dağılımları $\langle u'v'/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	57
Şekil 4.19 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji konturları $\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	58
Şekil 4.20 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı hız vektör alanı $\langle V \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	59
Şekil 4.21 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım çizgileri topolojisi $\langle \Psi \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	60
Şekil 4.22 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle u/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	61
Şekil 4.23 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle v/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	62
Şekil 4.24 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı girdap konturları $\langle \omega L/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	63
Şekil 4.25 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım	

modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	64
Şekil 4.26 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	65
Şekil 4.27 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi kontur dağılımları $\langle u'v'/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	66
Şekil 4.28 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji konturları $\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	67
Şekil 4.29 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı hız vektör alanı $\langle V \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	68
Şekil 4.30 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım çizgileri topolojisi $\langle \Psi \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	69
Şekil 4.31 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle u/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	70
Şekil 4.32 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle v/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	71
Şekil 4.33 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı girdap konturları $\langle \omega L/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	72
Şekil 4.34 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	73
Şekil 4.35 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	74
Şekil 4.36 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi kontur dağılımları $\langle u'v'/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	75
Şekil 4.37 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji konturları $\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması	76
Şekil 4.38 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı hız vektör alanı $\langle V \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması	78
Şekil 4.39 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım çizgileri topolojisi $\langle \Psi \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması	80
Şekil 4.40 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle u/U_\infty \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması	82

Şekil 4.41 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle v/U_\infty \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması	84
Şekil 4.42 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı girdap konturları $\langle \omega L/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması	86
Şekil 4.43 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması	87
Şekil 4.44 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması	89
Şekil 4.45 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi kontur dağılımları $\langle u'v'/U_\infty^2 \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması	90
Şekil 4.46 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji konturları $\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması	91
Şekil 4.47 $L/D=5.5$ boy/en oranına sahip eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=32000$ koşullarındaki Zaman-Dikey Hız grafikleri ve bunlara bağlı Frekans-Spektral Güç Yoğunluğu grafiklerinin $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ daldırma oranı değerlerinde karşılaştırılması	92
Şekil 4.48 $L/D=5.5$ boy/en oranına sahip eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=32000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığındaki Daldırma Oranı-Strouhal Sayısı grafiği	93
Şekil 4.49 Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=32000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenini üzerindeki çizgisel dağılımı	94
Şekil 4.50 Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=64000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenini üzerindeki çizgisel dağılımı	94
Şekil 4.51 Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=32000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenini üzerindeki çizgisel dağılımı	95
Şekil 4.52 Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=64000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenini üzerindeki çizgisel dağılımı	96
Şekil 4.53 Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=32000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenini üzerindeki çizgisel dağılımı	97
Şekil 4.54 Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=64000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenini üzerindeki çizgisel dağılımı	97
Şekil 4.55 $D=40$ mm ve $L=220$ mm ($L/D=5.5$), eliptik ve yarı-eliptik uçlu, küt kuyruklu modellerin $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı Reynolds sayısı değerlerinde kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları	99
Şekil 4.56 $D=40$ mm ve $L=220$ mm ($L/D=5.5$), küt kuyruklu modellerin $Re=1.2 \times 10^5$, $Re=2.4 \times 10^5$ ve $Re=3.6 \times 10^5$ değerlerinde $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı burun yapılarında kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları	99
Şekil 4.57 $D=40$ mm ve $L=320$ mm ($L/D=8$), eliptik ve yarı-eliptik uçlu, küt kuyruklu modellerin $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı Reynolds sayısı değerlerinde kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları	101
Şekil 4.58 $D=40$ mm ve $L=320$ mm ($L/D=8$), küt kuyruklu modellerin $Re=2.4 \times 10^5$, $Re=3.6 \times 10^5$ ve $Re=4.8 \times 10^5$ değerlerinde $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı burun yapılarında kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları	101
Şekil 4.59 $D=40$ mm, eliptik burun yapılı, küt kuyruklu modellerin $Re=2.4 \times 10^5$ ve $Re=3.6 \times 10^5$ değerlerinde $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı en/boy oranlarındaki kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları	103
Şekil 4.60 $D=40$ mm, yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu modellerin $Re=2.4 \times 10^5$ ve $Re=3.6 \times 10^5$ değerlerinde $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı en/boy oranlarındaki kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları	103

Şekil 4.61 D=60 mm, L=330 mm yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ hücum açısı aralığında yüzey yağ akış görüntülemesi.....	104
Şekil 4.62 D=60 mm, L=330 mm yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, $\alpha=20^\circ$ hücum açısında üst görünümünden çizgilerin detaylı gösterimi	106
Şekil 4.63 D=60 mm, L=330 mm yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, $0^\circ < \alpha < 16^\circ$ hücum açısı aralığında yüzey yağ akış görüntülemesi.....	107
Şekil 4.64 D=60 mm, L=330 mm eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ hücum açısı aralığında yüzey yağ akış görüntülemesi	107
Şekil 4.65 D=60 mm, L=480 mm yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ hücum açısı aralığında yüzey yağ akış görüntülemesi.....	108
Şekil 4.66 D=60 mm, L=330 mm yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, 0° ve $26^\circ < \alpha < 50^\circ$ hücum açısı aralığında iplikçik akış görüntülemesi	109
Şekil 4.67 D=60 mm, L=330 mm eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, 0° ve $26^\circ < \alpha < 50^\circ$ hücum açısı aralığında iplikçik akış görüntülemesi	109
Şekil 4.68 D=60 mm, L=330 mm yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, 0° ve $26^\circ < \alpha < 50^\circ$ hücum açısı aralığında duman tel akış görüntülemesi.....	110



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1 Rüzgâr tüneli genel özellikleri.....	24
--	----



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C_D	: Sürüklenme katsayısı	
C_L	: Taşıma katsayısı	
C_P	: Basınç katsayısı	
D	: Model çapı	[m]
f	: Frekans	[1/sn]
Fr	: Froude sayısı	
g	: Yer çekimi ivmesi	[m/sn ²]
k	: Pürüzlülük yüksekliği	[m]
L	: Karakteristik uzunluk	[m]
P	: Basınç	[Pa]
Re	: Reynolds sayısı	
St	: Strouhal sayısı	
t	: Zaman	[sn]
u	: Anlık akım yönündeki hız bileşeni	[m/sn]
U_∞	: Serbest akım hızı	[mm/sn]
v	: Anlık akıma dik yöndeki hız bileşeni	[m/sn]
V	: Toplam hız	[m/sn]
x	: x eksen	[m]
y	: y eksen	[m]
ρ	: Yoğunluk	[kg/m ³]
μ	: Dinamik viskozite	[kg/m.sn]
ν	: Kinematik viskozite	[m ² /sn]
$\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$: Boyutsuz ortalama türbülans kinetik enerji	
$\langle u \rangle$: Ortalama akım yönünde hız bileşeni	[m/s]
$\langle u/U_\infty \rangle$: Boyutsuz ortalama akım yönünde hız bileşeni	
$\langle u_{rms} \rangle$: Ortalama akım yönündeki çalkantı hız bileşeni	[m/s]
$\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$: Boyutsuz ortalama akım yönündeki çalkantı hız bileşeni	
$\langle u'v'/U_\infty^2 \rangle$: Boyutsuz ortalama kayma gerilmesi	
$\langle V \rangle$: Ortalama hız vektör alanı	
$\langle v \rangle$: Ortalama akım yönüne dik hız bileşeni	[m/s]
$\langle v/U_\infty \rangle$: Boyutsuz ortalama akım yönüne dik hız bileşeni	
$\langle v_{rms} \rangle$: Ortalama akım yönüne dik çalkantı hız bileşeni	[m/s]
$\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$: Boyutsuz ortalama akım yönüne dik çalkantı hız bileşeni	
$\langle \omega \rangle$: Ortalama girdap değerleri	[1/s]
$\langle \omega L/U_\infty \rangle$: Boyutsuz ortalama girdap değerleri	
$\langle \psi \rangle$: Ortalama akım çizgileri	

Kısaltmalar

AOA	Angle of Attack (Hücum Açısı)
AUV	Autonomous Underwater Vehicle (Otonom Su Altı Aracı)
CFD	Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
CTA	Constant Temperature Anemometry (Sabit Sıcaklık Anemometrisi)
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
PIV	Particle Image Velocimetry (Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Tekniği)
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes)
TKE	Türbülans Kinetik Enerji

1. GİRİŞ

Mühendislik bilimlerinin teori ve pratiğinde aranan en temel fayda genel olarak minimum enerji ile maksimum iş yapabilmektir. Belirli bir miktar enerji ile sağlanacak olan faydanın artırılabilmesi için ise o süreç veya işlemdeki doğal kayıpların azaltılması gerekmektedir. Pratikte, sınırlı bir miktar enerji ile ne sonsuz fayda elde etmek ne de doğal kayıpları sıfıra indirmek mümkündür. Dolayısıyla mühendislik, olabilecek en verimli ve optimum sistemi elde etmeye çalışır. Bunun için her verimli hale getirme sürecinin kendine has yöntemleri mevcuttur.

Aerodinamik ve hidrodinamik etmenler özellikle savunma sanayisinde olmak üzere, bu disiplinleri direkt olarak ilgilendiren her projede hem enerjiyi hem de bunun sonucunda o projenin ekonomisini dengede tutabilmek adına çok önemlidir. Aerodinamik olarak bir sistemi daha optimum hale getirmek için pek çok akış kontrol yöntemi var olsa da ilk akla gelen şey, akış yönünde sürtünmeyi artıracak küt geometrik yapılardan uzak durmak olacaktır. Örneğin deniz altı otonom araçlar incelendiğinde, temelde silindirik bir şekle sahip bu cisimlerin basitçe akışla karşılaşan ve akışın ayrıldığı bölümlerinin yuvarlatıldığı ve böylece bu karşılaşmanın ya da ayrılmanın yumuşatılması yoluyla sürtünmeden ve yüzeydeki basınç değişiminden kaynaklı kayıpların en aza indirilmeye çalışıldığı görülecektir. Bu yuvarlatılma sonucunda ortaya çıkan iki ya da üç boyutlu konik uca ojiv (ogive) adı verilir.

Aerodinamik, hidrodinamik ve balistik alanlarında, sürüklenme kuvvetinden kaynaklı kayıpları azaltmak amacıyla çoğunlukla ojiv yapıları tercih edilir. Cismin dinamik ortamdaki seyir hızına göre daha küresel, daha eliptik ya da daha sivri uçlar tercih edilebilmektedir. Hız ciddi miktarda arttıkça daha sivri uçlu ojiv yapıları daha faydalı sonuçlar vermektedir (Koren ve ark., 1992).



(a) Mini İHA Roketi (D=40mm, L=170mm)

(b) Atmaca Füzesi, Akya ve Orka Torpidoları



(c) Mühimmatlarıyla birlikte Bayraktar TB2

(d) Roketsan Çakır Seyir Füzesi

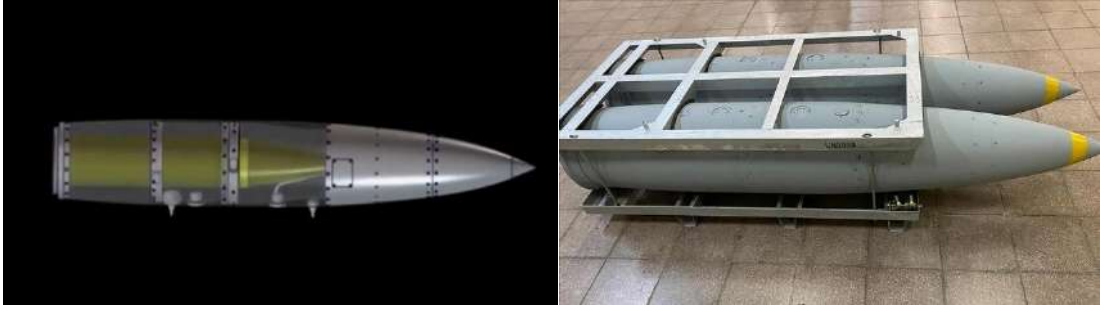


(e) Tusaş-Şimşek Uçak Sistemi

(f) İskender-M Balistik Füzesi

Şekil 1.1 Ojiv silindir örnekleri (Anonim, 2022)

Ojiv yapıların kullanımıyla alakalı olarak nüfuz edici bombalara da değinmekte fayda olacaktır: MKE (Makine ve Kimya Endüstrisi) AŞ'nin bir yıl önce faaliyete geçen Enerjetik Malzemeler Üretim Tesisinde ürettiği ve Türk savunma sanayisinin kritik alanlarda dışa bağımlılığı bitirmek için geliştirdiği teknolojilerden biri olan nüfuz edici bombaların 2022 Eylül ayı içerisinde Hava Kuvvetlerine teslimatına başlandı.



(a) NEB Teknik Tasarım (Anonim, 2020)

(b) Nüfuz Edici Bomba (Anonim, 2022)

Şekil 1.2 Nüfuz Edici Bomba (NEB) (a) tasarlanmış ve (b) üretilmiş halleri (Anonim, 2020 ve 2022)

Sığınak delici adıyla da bilinen nüfuz edici bomba, ojiv şekli sayesinde akışkan içerisinde sağladığı yararlara benzer şekilde katı zeminlere nüfuz etmede de avantaj sağlıyor. Katı zeminin direncini daha kolay kırarak düşük çarpma hızlarında ve düşük çarpma açılarında bile yüksek delme kabiliyeti sergileyen bu silahlar, Türkiye'nin yerli kaynaklarla üretilen ilk beton delen özelliğe sahip mühimmatı olma özelliğini de gösteriyor.

Bu tezde, iki farklı ojiv burun yapısı (eliptik ve yarı eliptik) tercih edilerek ortaya çıkan sonuçlar incelenmiştir. Bununla birlikte, modellerin arka ayrılma kenarı küt olarak tercih edilmiştir. Her iki burun yapısı için de farklı boy/en (L/D) oranlarında modeller kullanılmıştır. Bu farklı burun yapıları ve L/D oranları neticesinde, değişen akış şartlarında (açı, daldırma oranı ve Reynolds sayısı) akış karakteristiğinin ne şekilde etkilediği su tüneline PIV ve boya deneyleriyle, rüzgâr tüneline ise kuvvet ölçüm deneyleriyle incelenmiş ve derlenen sonuçlar birbirleriyle ve literatürle karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Denizlerin ve gökyüzünün keşif amaçlı incelenmesi, savunma amaçlı sistemlerin kurulması veya enerji endüstrisinde kullanılması açısından akışkanlar mekaniği çok önemli bir disiplindir. Deniz altında ya da gökyüzünde kullanılacak insanlı/insansız araçların hem daha az enerji kaybıyla çalışması hem de kontrollerinin sağlanabilmesi için aerodinamik ve hidrodinamik özelliklerinin araştırılması mühendislik açısından zaruridir. Dolayısıyla hem ülkemizde hem de dünyada bu konudaki temel araştırma ve geliştirme çalışmalarına son yüzyılda ciddi önem ve ağırlık verilmektedir. İşte bu konuda, genel akış karakteristiği, model üzerine etki eden aerodinamik kuvvetler, türbülans etkileri, hücum açısı etkileri ve stall açısının belirlenmesi, sınır tabaka akışları gibi parametreler üzerine yapılan bazı çalışmalar tarihsel açıdan çok da geriye gitmeksizin kronolojik olarak sıralanmıştır:

Bearman (1965) küt bir firar kenarına sahip iki boyutlu bir modelin art bölgesindeki akışı, 1.4×10^5 ve 2.56×10^5 Reynolds sayılarında modelin yatay merkez çizgisini baz alarak incelemiştir. Firar kenarındaki toplam sınır tabaka kalınlığının model yüksekliğine oranı yaklaşık 0.5'ti. Çalışmada, sıcak telli bir anemometre kullanılarak art izindeki akışın traversleri ile birlikte taban basıncı ve girdap dökülme frekansı ölçümleri alındı. İz boyunca gerçekleştirilen traversler, modelin arka yüzünden bir model yüksekliğine eşit mesafede, ortalama karekök hız dalgalanmasında bir tepe oluşturdu. Burada zirvenin konumu, oluşmuş girdabın da konumudur. Araştırmada, dört model yüksekliğine kadar ayırıcı plakalarla donatılmış bir model de kullanılmıştır. Test edilen her plaka için, oluşmuş bir girdabın da konumu bulunmuş ve modelden uzaklığın basınç katsayısıyla ters orantılı olduğu keşfedilmiştir.

Koren, Arieli ve Rom (1992) çeşitli ogive burun yapılarına sahip torpido benzeri 8 farklı model üzerinde aerodinamik özelliklerin araştırıldığı kapsamlı bir deneysel çalışma yapmışlardır. Burun şekli, konik, von Karman, tanjant ve küresel şekiller arasında farklılık gösterir. Deneysel veriler, $Ma=0.1$ 'den başlayan düşük hızlı bölgede 80° 'ye kadar hücum açılarında, $Ma=1$ dolaylarındaki orta hızlı bölgede 30° 'ye kadar ve $M=3.2$ 'ye kadarki süpersonik bölgede 15° 'ye kadar alınabilmiştir. Her model için yanal ve boyuna kuvvetler ve momentlerin yanı sıra akış görselleştirme verileri de sunulmaktadır. Çalışmada, Mach ve Reynolds sayılarının farklı durumlardaki etkileri tartışılmıştır.

Evans ve Nahon (2004) otonom sualtı aracının dinamik modeli için farklı hücum açılarında 2.5° ile 15° için her seferinde 2.5° artırarak hidrodinamik kuvvetlerinin etkisini 0.5 m/s ile 4 m/s hız aralığında 0.5 m/s hız artımı yaparak araştırmışlardır.

Alvarez ve ark. (2009) serbest yüzey seviyesinde seyreden sualtı aracının optimum gövde şeklinin saptanması amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Serbest yüzeye yakın bölgede dalga direncini görebilmek için birinci dereceden Rankine panel yönteminden yararlanmışlardır. Artan Froude sayıları için direnç kuvvetlerini ele almışlardır ve optimum şekli saptayarak %25 olarak toplam direnci azaltmayı başarmışlardır.

Jagadeesh ve Murali (2010) simetrik olmayan sualtı aracının hidrodinamik katsayılarına serbest yüzey etkisini RANS çözücü ile incelemişlerdir. Bu çalışmada asıl hedef olarak farklı türbülans modellerini akış hacim (VOF) modeli ile birlikte yüzeye yakın bölgede değerlendirmişlerdir. Hücum açısı ve daldırma oranına bağlı olarak Fr sayısı, sürüklenme katsayısı C_D ve kaldırma kuvvet katsayısı C_L 'nin değişimini incelemiştir.

Özğören ve ark. (2011) Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme yöntemi (PIV) ve boya deneyleri ile küre-serbest su yüzey ile etkileşimini, değişik daldırma oranları için incelemişlerdir. Karakteristik küre çapına göre hesaplanmış olan Reynolds sayısı $2500 \leq Re \leq 10000$ aralığında deneyler gerçekleştirmişlerdir. Kürenin su içerisine daldırılmasıyla kürenin su içerisine daldırılan kısmından akış ayrılması ile oluşan dalgalı akış yapısının oldukça karmaşık bir yapı sergilediğini gözlemlemişlerdir. Daldırma oranı $h/D=0$ için oluşan ayrılmış akışın yüzeye yeniden birleşmesinin kürenin arkasından itibaren yaklaşık $1.9D$ 'lik mesafede olduğunu saptamışlardır. Bu durumun $h/D=0.5$ değerine dek sürdüğünü ve daha yüksek daldırma oranlarında $1 \leq h/D \leq 2$ ayrılmış akış bölgesi yüzeye birleşmeden akım yönünde sönmüldüğünü ve sonrasında da bunun serbest akım şartlarına ulaştığını bildirmişlerdir.

Pan ve ark. (2012) bir denizaltı modeline ait hidrodinamik katsayıların belirlenmesi amacıyla sayısal simülasyondan faydalanmışlardır. Daimî ve daimî olmayan Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) simülasyonları akış analizleri için uygulanmıştır. Dinamik ağ yapısı yöntemi manevra kabiliyetinin incelenmesi için kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar, deneysel verilerle kıyaslanarak doğrulanmıştır ve dolayısıyla bu yöntem önerilmiştir.

Dantas ve de Barros (2013) otonom sualtı aracı için hidrodinamik etkileri farklı hücum açılarında hem deneysel hem de sayısal olarak değerlendirmişlerdir ve en uygun modelin $k-\omega$ SST modeli olduğuna karar vermişlerdir.

Allston ve ark. (2014) otonom bir sualtı aracı üzerindeki hidrofoilin art izin bölgesini deneysel incelemişlerdir. Dört farklı akış hızında ve beş farklı hücum açısında, geniş bir tank içerisinde bulunan tam boyuttaki prototip için PIV kullanılarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir ve bu sonuçlar iki boyutlu sayısal simülasyonlarla kıyaslanmıştır.

Nematollahi ve ark. (2015) aksisimetrik sualtı aracı serbest yüzeyin etkileşimini sayısal çalışma olarak araştırmışlardır. Viskoz ve dalga oluşturan dirençleri içeren toplam sürüklenme katsayısı sualtı aracı için 0.4 m/s ($Re=1.05*10^5$) ile 1.4 m/s ($Re=3.6*10^5$) arasında değişen hızlarda ve $H=0.75$ ile $H=4$ daldırma oranlarında gerçekleştirmişlerdir. Sayısal olarak gerçekleştirdikleri çalışmada $k-\epsilon$ türbülans modeli ve VOF (Volume of Fluid) ara yüzey etkileşimini kullanmışlardır. Aynı daldırma oranında $H=0.75$ iken hız arttıkça daha düşük sürüklenme katsayısı değerlerini saptamışlardır ve aynı hız değeri için daldırma oranı artış gösterdikçe de daha düşük sürüklenme katsayısı değerlerini bulmuşlardır. Bunun yanı sıra sürüklenme katsayısı değerleri artan Froude sayısı (Fr) ile beraber artma göstermiştir.

Yağmur (2016) üniform akış şartlarında torpido benzeri bir geometrinin akış karakteristiklerini PIV ve HAD yöntemleriyle incelemiştir. Üniform akış şartlarına yerleştirilen torpido benzeri geliştirilen geometrinin $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ hücum açılarında ve bu geometriye pasif akış kontrolü uygulanmış geometriler etrafında oluşan hidrodinamik akış karakteristiği PIV ve ANSYS-Fluent paket programı kullanılarak HAD yöntemi ile $Re=20000-40000$ aralığında zaman bağımlı olarak incelenmiştir. Reynolds sayısının yüksek olduğu değerlerde sürüklenme katsayısının azaldığı belirlenmiştir. $Re=20000$ ve $Re=40000$ olduğu değerlerde sürüklenme katsayısı sırasıyla $C_D=0.2278$ ve $C_D=0.1665$ olarak hesaplamıştır.

Kaynarcalıoğlu (2016) uniform akım şartlarında eliptik burun kesitli silindir çevresinde oluşan hidrodinamik ve aerodinamik akış karakteristiklerinin araştırmıştır. Hidrodinamik araştırma için deneyler PIV metodu ile $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde su tüneline gerçekleştirilmiştir. Hidrodinamik ortamda geometrilerin karşılaştırılması $0-25^\circ$ hücum arasında beş derecelik açılar ile sayısal ve deneysel olarak, $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 90° derecelik açılar ile sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Aerodinamik ortamda ise yalnızca sayısal olarak $0.1 \leq Ma \leq 4.0$ aralığında ve $0-90^\circ$ arasındaki hücum açılarında akış yapısı incelenerek literatürle karşılaştırılması yapılmıştır. Sayısal

analizleri zamana bağılı olarak $k-\omega$ SST türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HAD ve PIV sonuçlarının çizgisel değişimi geometri çevresinde akım yönündeki hız bileşeni karşılaştırıldığında %1-5 arasında değişen bir benzeşim gösterdiğini ifade etmiştir.

Manshadi ve ark. (2017) yağ akışı görselleştirme yöntemini kullanarak $0^\circ-30^\circ$ sapma yönü aralığında, CFD yöntemi kullanarak $0^\circ-30^\circ$ sapma yönü aralığında ve $0^\circ-30^\circ$ yunuslama yönü aralığında, vorteks oluşturmalar kullanılan standart bir su altı modeli etrafındaki akış alanı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sonuçlar, denizaltı boyunca yerleştirilen girdap jeneratörlerinin, denizaltı üzerindeki çapraz akış ayrımını yüksek bir olay açısında önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

Liu ve ark. (2017) küçük ölçekli bir otonom su altı aracının hidrodinamik modellemesi için genel bir çerçeve sunmak için ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımı ile bir sanal model testi ve simülasyonu hidrodinamik katsayıları tahmin etmek için yapmışlardır. Çalışmada, Fourier analizi ve hidrodinamik katsayıları hesaplamak için doğrusal küçük kareler yaklaşımı kullanıldı. Yöntem daha sonra, yöntemin etkinliğini gösteren, teorik olarak belirlenmiş bir test vakası kullanılarak doğrulanmıştır.

Thomareis ve Papadakis (2017), 5×10^4 Reynolds değeri ve 5° hücum açısında NACA0012 kanat profili etrafındaki akış alanının 3 farklı firar kenarı şekliyle (düz, kesik ve art izine ulaşacak şekilde dişli) CFD simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Çalışmada zaman ortalamalı akış özellikleri, baskın akış yapıları ve bunların frekansları incelenmiştir. Düz standart firar kenarlı profil için, temel frekans verileri literatürdeki ilgili verilerle uyumludur. Kesik ve küt firar kenarı, doğal kayma tabakası frekansının alt harmoniğine yakın bir frekansla, periyodik girdap dökülmesine neden olmuştur. Girdap dökülmesinin yukarı yönlü etkisinin ayırma kesme katmanını zorlaması nedeniyle, doğal frekans (ve onun alt harmoniği) bastırılırken kesme tabakası frekansı da dökülme frekansına sabitlenmiştir. Firar kenarının dişli yapısı yayılma yönünde bir basınç gradyanı oluşturur, bu da yayılma yönünde ikinci bir akış modelinin gelişmesini sağlamıştır. Bu model, art izindeki nispeten yakın bölgenin ortalama akış şeklini ve parametrelerini etkilemiştir. Ayrıca, çentiklerin eklenmesi, girdapların aralıklı tutarlılığını bozarak girdap dökülmesinin enerjisini azaltmıştır. Bu durum, ayırıcı kesme tabakasının zayıflaması ile sonuçlanır ve hem doğal frekansın alt harmonikleri hem de saçılma frekansı spektrumunda görünür.

Alijani ve ark. (2019) gövde şekil parametrelerinin, otonom bir su altı araç gövdesinin sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisini araştırmak için deneyler yapmışlardır. Bu amaçla, Hydrolab500 gövdesiyle ilgili ampirik ve sayısal sonuçlar arasındaki karşılaştırma ile kullanılan sayısal yaklaşımın geçerliliğini doğrularak, mevcut çalışmanın, nihai tasarımda özerk bir dalgıç aracın sürüklenme katsayısının sunulan yöntem yardımıyla doğru bir şekilde tahmin edilebildiğini göstermişlerdir.

Shariati ve ark. (2018) suyun serbest yüzeyine yakın hareket eden su altı araçları tarafından üretilen dalgaların özelliklerini kullanarak, araçların genel boyutlarını, hızını ve batma derinliğini tanımlamak için bir algoritma geliştirmek üzerine bir çalışma yaptılar. Gövde etrafındaki basınç dağılımı, sonlu uzunluktaki segmentlere ayırarak her bölümün serbest yüzey üzerinde kendi kosinüs dalgasını oluşturduğu durumda, gövdenin uzunluğunu bu dalgaların genlik dağılımını kullanarak elde ettiler. Su altında kalma derinliğini, boyutsuz genliğin ve Froude sayısının bir fonksiyonu olarak boyutsuz derinliğin varyasyonunu gösteren gelişmiş bir boyutsuz diyagram kullanılarak tahmin ettiler. Farklı hızlarda hareket eden farklı batma derinliğinde çeşitli boyutlara sahip birkaç gövde üzerinde uygulanan algoritma, istenen parametrelerin iyi bir tahminini vermiştir.

Muthuvel ve ark. (2018) darpa sub-off modelinin çıplak gövdesinin (pervane hariç) geometrik modellemesi için gövde üzerindeki akış simülasyonlarını ticari bir CFD paketi kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Çeşitli türbülans modellerinin ve farklı kafes tiplerinin C_p , C_f , eksenel kuvvetler gibi akış karakteristiklerine etkisi ayrıntılı olarak incelenmiş ve literatürde bildirilen deneysel değerlere göre onaylanmıştır.

Mitra ve ark. (2019) otonom su altı araç gövdelerinin eğimli kanal yatakları üzerindeki farklı Reynolds sayılarındaki hidrodinamik özelliklerini deneysel ve sayısal olarak araştırdılar. Deneysel verileri Reynolds Stres Modeli tahminlerini doğrulamak için kullandılar. Sürüklenme, basınç ve yüzey sürtünme katsayıları gibi hidrodinamik parametreler, farklı test yatağı eğimlerinde, otonom su altı araç gövdesinin hücum açıları ve sürüklenme kuvvet katsayıları RSM simülasyonlarından tahmin etmişlerdir.

Hoth ve ark. (2019) bir otonom su altı araç yüzeyine basınç sensörleri yerleştirmişler ve elde edilen basınç verilerini işleyerek akış bozulmalarının doğrudan tespit edilmesi üzerine çalışmışlardır. Bu amaçla, bir otonom su altı araç gövdesi üzerindeki basınçtan çevre bir sıvının akış parametrelerini belirlemek için farklı öğrenme yöntemlerinin uygulanabilirliğini test etmişlerdir. Çalışma, yüzeyde belirtilen noktalardan basınç verilerini kullanan CFD (HAD) simülasyonlarına dayandırılmıştır.

Cardenas ve Barros (2020) otonom su altı araçlarında (AUV'ler) hidrodinamik katsayı tanımlamasının zorluğu üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışmada önerilen tanımlama yaklaşımı, denizaltı taşıtlarının hidrodinamik ve geometrik özelliklerine dayanan analitik ve yarı deneysel yöntemler ile çalışarak bir deneysel verilerden faydalanıp bir tahmin yöntemi geliştirmişlerdir. Deneysel veriler ve deniz denemeleri sırasında otonom su altı model aracın hareketini simüle etmek için kullanılmış ve hareket değişkenleri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Tian ve ark. (2019) birleştirilmiş dalga akımı akışlarında bir aksisimetrik otonom su altı aracının hidrodinamik performansını, iki fazlı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Dalgaların etkileri, farklı dalga yükseklikleri, Reynolds sayıları ve aracın daldırılmış derinlikleri için nicel olarak analiz edilmiş ve HAD yöntemi mevcut deneysel verilerle doğrulanmıştır. Aracın kaldırma varyasyonunun dalgadan önemli ölçüde etkilendiği ve ortalama sürüklemenin artan dalga yüksekliği ve azalan daldırma derinliği ile arttığı bulunmuştur.

Sarıgöz (2020) bombe uçlu torpido benzeri geometrileri farklı kuyruk ve hücum açılarında HAD, boya ve kısmen PIV yöntemiyle araştırmıştır. Büyük Girdap Simülasyonu (LES) türbülans modeli ve serbest yüzeyde hava-su ara yüzeyindeki akış özelliklerinin belirlenmesi için sıvı/gaz akış oranı hacmi modelleme (VOF) yöntemi kullanılmıştır. Torpido benzeri geometrinin serbest yüzeye yakın olması nedeniyle hız alanı, akım çizgileri, girdap ve kinetik enerji gibi akış karakteristiklerin simetrik olmadığını göstermiştir. Reynolds sayısı 20000'den 40000'e yükseldiğinde ve sürüklenme kuvvetinin (F_D), daldırma oranı (h/D) arttıkça azaldığı, girdap uzunluğunun kısalarak modelin kuyruk kısmına yaklaştığı ve art izi bölgesinin küçüldüğünü göstermiştir.

Kılavuz (2020)'de eliptik ve küresel uçlu torpido benzeri geometrinin farklı kuyruk modellerini sayısal ve deneysel olarak farklı ve hücum daldırma oranlarında araştırmıştır. Eliptik ve küresel burun yapıları kullanılarak ve kuyruk kısmına kanatlar eklenerek pasif kontrol yöntemleri uygulamıştır. Daldırma oranının azalması ile sürüklenme katsayısı C_D 'nin arttığını göstermiştir. Akış alanının daha düşük daldırma oranlarındaki daralması nedeniyle, geometrinin üst yüzeyi ile serbest yüzey arasında jet benzeri akış her iki burun yapısı içinde oluşmaktadır. Küresel burun yapısı eliptik olana göre, tüm durumlar için serbest yüzey ile daha fazla etkileşimi ile yüzeyde daha fazla bozulmaya neden olduğunu ifade etmiştir. Pasif akış kontrol uygulaması ile aynı burun geometrisine sahip modelin kuyruğuna 3 ve 4 kanat eklenmesinin akış yapısı ve sürüklenme kuvveti üzerindeki etkisi incelemiştir. Sayısal sonuçlara göre kanatların art izi

bölgesindeki akışı olumlu yönde etkilediği ancak sürüklenme kuvveti katsayısının kısmen yükseldiğini bulmuştur.

Sun ve ark. (2021), gözenekli bir tabaka yardımıyla, sırasıyla yüzde $\beta=37$, 48 , 61 ve 67 'lik alanı gözenekli hale getirilen dairesel bir silindirin iz girdaplarının ne şekilde değiştiğini incelemişlerdir. Deneyler bir su kanalında, sabit Reynolds sayısında, PIV tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gözeneklilik oranları $\beta=37$ ve 48 için elek örtüsü ve çıplak silindir arasındaki boşluktan gelen akıntı, kesme tabakaları arasındaki etkileşimleri geciktirmiş ve girdap oluşum uzunluğunu uzatmıştır. $\beta=61$ ve 67 gözeneklilik oranları için birleştirilmiş kesme katmanlarındaki girdaplar, birleşme ve yutma süreçleriyle boyut olarak büyümüş ve sonunda konvektif kararsızlık nedeniyle art arda dökülmüştür. Bunun yanında, gözenekli tabakanın varlığının, girdapların gücünü azalttığı ve Reynolds gerilimlerini zayıflattığı da bulunmuştur.

Kılavuz ve ark. (2021) boya görselleştirme ve PIV yöntemlerini kullanılarak farklı hücum açılarında serbest yüzey etkisi altında torpido benzeri bir geometri etrafındaki hidrodinamik özellikleri incelemişlerdir. Model $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ arasındaki daldırma oranlarında su tüneline yerleştirilmiştir. Deneylerde iki farklı Reynolds sayısı ($Re=20000$ ve 40000) için hücum açıları $0^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ$ arasında değiştirilmiştir. Çalışmada $0.5 \leq h/D \leq 1.0$ değerlerindeki daldırma oranlarında tüm hücum açıları için, $h/D=1.5$ değerinde ise 8° lik hücum açısı için, model ile serbest yüzey arasında jet benzeri bir akış bölgesinin oluştuğu gözlenmiştir. Tüm durumlar için art izi bölgesi içindeki dikey çizgilerden elde edilen türbülans verilerinin noktasal değişimlerinin, serbest yüzeyin türbülans istatistikleri üzerindeki etkisinin $h/D=2.0$ değerinden sonrasında ihmal edilebilir olduğu ortaya koyulmuştur.

Sun ve ark. (2022), yüzey pürüzlülük yüksekliğinin (k/D) dairesel bir silindirin art izi karakteristiği üzerindeki etkilerini, bir su kanalında PIV yöntemini kullanarak sabit Reynolds sayısında ($Re=2520$) deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde, $k/D=5$, 10 , 15 ve 20 pürüzlülük yükseklik oranları ve 79 kapsama oranı dikkate alınmış ve sonuçlar, düz bir silindir ($k/D=0$) ile karşılaştırılmıştır. Burada k pürüzlülük yüksekliğidir. Yüzey pürüzlülüğünün silindirin kayma katmanlarını bozduğu, girdap dökülme frekansını ve iz oluşum bölgesini etkilediği bulunmuştur. Strouhal sayısı k/D 'nin artmasıyla azalmıştır. Ayrıca, girdap dökülmeleri daha düzenli hale gelmiş ve Reynolds gerilmelerinin büyüklükleri pürüzlülüğün varlığı ile artmıştır. Uygun ortogonal ayrıştırma (POD) analizi de yüzey pürüzlülüğünün varlığı ile büyük ölçekli Kármán girdap yapılarının yoğunlaştığını göstermektedir.

Sarigiguzel ve ark. (2022) bombeli bir burun yapısına sahip torpido benzeri bir geometrinin art izi bölgesindeki serbest yüzey etkisini, boya görselleştirme ve PIV yöntemlerini kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Sabit hücum açısında ($\alpha=0^\circ$) gerçekleştirilen deneylerde iki farklı Reynolds sayısı hücum açısı ($Re=20000$ ve 40000) kullanılmış ve daldırma oranı $0.50 \leq h/D \leq 3.5$ aralığında değiştirilmiştir. Çalışmada serbest yüzeyinin akış karakteristiği üzerindeki etkisi, zaman ortalamalı akış hızı, girdap konturları, Reynolds stres korelasyonu, TKE değişimi, akış yönündeki hız dalgalanmaları gibi sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Daldırma oranları $h/D \leq 1.0$ için art izindeki akış yapılarının asimetric hale geldiği gözlemlenmiştir. Daldırma oranı büyüdükçe geometrinin her iki tarafındaki akışın daha simetric hale geldiği gözlenmiştir.

Sharma ve Dutta (2022), çalışmalarında biyomimetik yüzey modifikasyonu kullanarak navigasyon nesnelarının aerodinamik performansını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Köpekbalığı derisi üzerinde yer alan dişlerden ilham alınan çalışmada, bir torpido modeli kullanılmıştır. Çalışmada, ilham nesnesinin, sürüklenme ve diğer akış özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için ribletler kullanılmıştır. Kesme katmanına yerleştirilen yapı, art izindeki ve model çevresindeki akışı değiştirmiştir. Torpido modeli üzerinde PIV ve CTA (Sabit Sıcaklık Anemometrisi) kullanılarak detaylı bir akış alanı incelenmiştir. Deneyler, $Re=1.02-5.08 \times 10^5$ Reynolds sayısı değer aralığı için ses altı bir rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir, böylece çalışma, laminar-türbülans geçiş aralığını kapsamıştır. Çalışma, ribletin momentum akısını arttırdığını, böylece girdap oluşumunu bastırarak ve türbülans yayılımını azaltarak yüzey sürtünmesinin azaltılmasına olanak sağlamıştır. Sonuç olarak, ribletin sürüklenme katsayısını etkili bir şekilde %11,7 oranında azalttığını gösterilmiştir. $Re=3.05 \times 10^5$ değerinde formasyon uzunluğunda %4,76 ile maksimum kısalma gözlemlenmiştir. Bu kısalma, ters basınç gradyan bölgesini de küçülmüş ve bu yolla güç gereksinimini azaltmıştır. Çalışma, hidrodinamik uygulamalar için riblet kullanımının iyi sonuçlar ortaya çıkardığını göstermiştir.

Yapılan kaynak araştırması sonucunda incelenen ogive geometrinin PIV yöntemi ile serbest yüzey etkisi altındaki şartlarda ve yüzey yağ akış görüntüleme yöntemi ile üniform akış şartlarında akış karakteristiklerinin değişimini inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

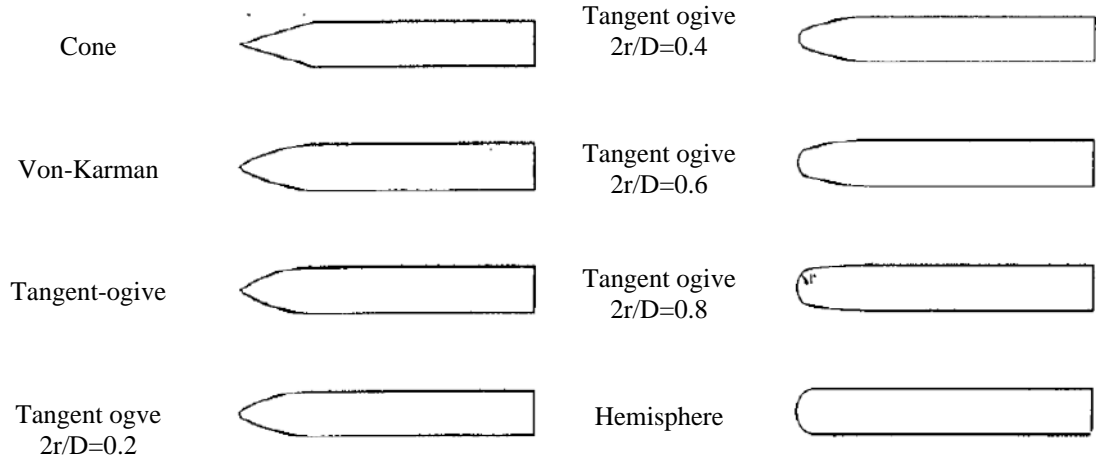
Akışkan içerisindeki hareketli bir cismin optimum performans sağlayabilmesi için pek çok parametrenin optimize edilmesi gerekir. Öncelikle cisim üzerindeki basınç dağılımı aerodinamik sürükleme ve kaldırma kuvvetlerini oluşturur. Bu kuvvetler ve basınç dağılımında oluşan dengesizlikler kontrol altına alınmadığında ciddi oranda titreşim ve enerji kaybına sebebiyet verir. Dolayısıyla akışkan içerisindeki cismin şekli, özellikle de hücum kenarının yapısı aerodinamik kuvvetlerin makul seviyelerde tutulabilmesi açısından çok önemlidir. Ayrıca, cisim üzerindeki pasif veya aktif akış kontrol mekanizmaları, pürüzlülük ve cismin inceliği gibi faktörler de akış karakteristiğini oldukça etkilemektedir.

3.1. Akışı Etkileyen Parametreler

Bu bölümde, akışı ve akış şartlarını tanımlamamıza ve sınıflandırmamıza yarayan akış parametrelerinden, özellikle de bu çalışmada içerisinde değiştirilmek suretiyle akış karakteristiğine olan etkisi gözlemlenen parametrelerden, optimum düzeyde bahsedilecektir.

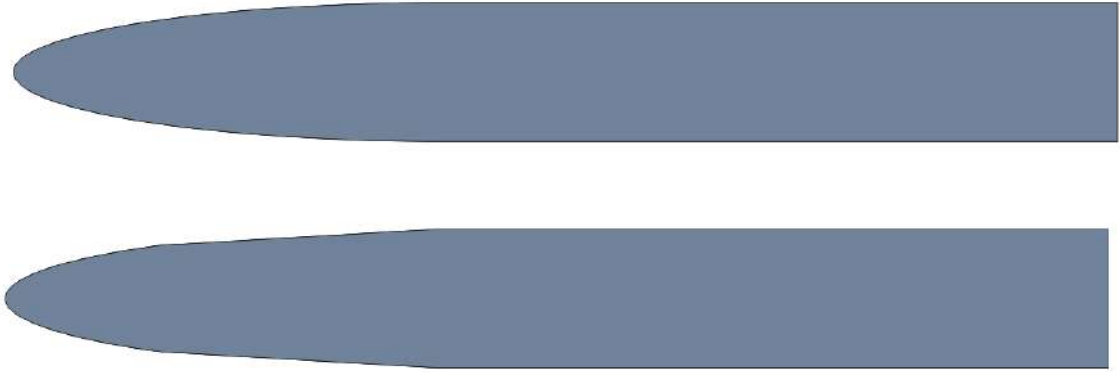
3.1.1. Burun Yapısı

Bu çalışma içerisinde de özellikle etkisi ölçülen bir parametre olan modelin burun kısmının şekli, model çevresindeki ve art izindeki akış yapısını en çok etkileyen ve aynı şekilde modelin bulunduğu akış rejimine karşı göstereceği tepkiyi belirleyen önemli etmenlerdendir. Akış, modelde ilk olarak burun kısmında karşılandığından optimize edilmemiş bir burun yapısı ile daha burada bozulmaya başlayan akış yapısı ve akış ayrılmaları sonucunda kayıplar çok fazla artacaktır. Örneğin burun kısmı daha az yuvarlatılmış veya küt bir model için oluşan sürükleme kuvveti çok yüksek değerlere ulaşacaktır. Bu yüzden savunma sanayisinde ve balistikte roket, füze, mermi gibi cisimler daha yuvarlatılmış bir hücum kenarına, ojiv denilen bir burun yapısına sahip olma eğilimindedir.



Şekil 3.1 Bazı ogive silindir örnekleri (Koren ve ark., 1992)

Genel itibariyle silindirik bir model için yuvarlatılmış olma durumunu belirten ojiv yapıların eliptik, tanjant, sekant, von Karman gibi birçok konfigürasyonu bulunmaktadır. Bu ojiv silindir yapıları sürüklenme kuvvetini düşürerek enerji kayıplarını azaltır. Cisim ne kadar hızlı hareket edecekse burun yapısının da o kadar sivri bir şekle bürünmesi işten bile değildir.

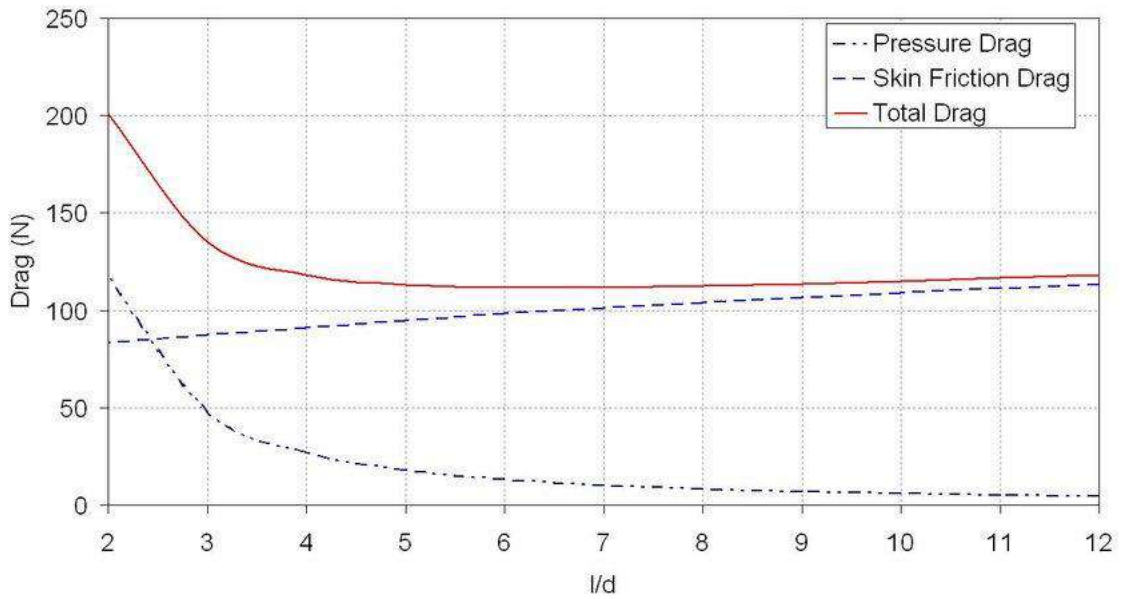


Şekil 3.2 Çalışmada kullanılan eliptik (üst imaj) ve yarı- eliptik (alt imaj) ogive silindir şekilleri

Bu çalışmada da akış karakteristiğinin değişimini analiz edebilmek için eliptik ve yarı eliptik burun yapıları kullanılmıştır. Modellerimizin küt bir arka uca sahip olması dahilinde bu iki burun yapısı ile birleşmesi tercihlerinin belirlenmesinde; aynı veya çok yakın geometrilerin havacılık, su altı, savunma ve balistik sistemlerinde tercih ediliyor olmasına rağmen, akademik anlamda araştırma açısından sürekli yüksek Mach sayılarında proses edilmesi ve düşük hızlardaki performansları konusunda yeterince çalışma yapılmaması etkin olmuştur.

Mach Sayısı: Bu kısımda, Mach sayısı, akışkanlar mekaniğinde bir nesnenin hızının, hareket halinde bulunduğu koşullardaki ses hızı cinsinden belirtilmesinde kullanılan boyutsuz bir sayıdır. Kabaca, hızın Mach sayısı cinsinden değerinin 1'den küçük olduğu durumlarda ses altı, yüksek olduğu durumlarda ise ses üstü akış şeklinde ifade edilir. Bunun yanında, 1 değeri için transonik ve akış bölgesinin kimyasal durumunu değiştirecek kadar yüksek hızlı (yaklaşık $Ma > 4$) değerler için hipersonik tanımlamaları da mevcuttur. İşte burada, bu tip geometrilerle alakalı çalışmaların yoğunlaştığı yüksek Mach sayılı hızlar, nispeten yüksek Mach sayılı akış altı rejimi ve akış üstü rejimi kastetmek amaçlı kullanılmıştır. Bu proje için çalışmalar $0.01 < Ma < 0.1$ aralığında yapılmıştır. Mühendislik uygulamalarında $Ma < 0.3$ için hava sıkıştırılmaz bir akışkan olarak kabul edilir ve prosesler ona göre analiz edilir.

3.1.2. İncelik Oranı



Şekil 3.3 Uzunluk/Çap oranının model üzerine etkileyen sürüklenme kuvvetine etkisi (Phillips, 2010)

Modelin çapının sabit kaldığı durumda, model uzunluğunun değişmesi, direkt olarak modelin incelik parametresini belirleyecektir. İncelik parametresi genel bir ifadeyle L/D şeklinde belirtilir. Özellikle yüksek hızlarda daha belirleyici olan incelik faktörü için, optimum bir noktaya kadar artmasının sürüklenme miktarını azaltacağı kolayca söylenebilir. Bu optimum noktaya kadarki baskın sürüklenme faktörü dalga sürüklenmesiyken bu noktadan sonra yüzey alanının fazla artmasından dolayı yüzey sürüklenmesi baskın hale gelecek ve dalga sürüklenmesinden kazanılan miktar, yüzey

sürüklenmesinden kaybedilen miktardan daha düşük olacağından ve incelik oranı arttıkça bu farkın da artacağından dolayı kayıplar yeniden artacak ve verimlilik düşecektir. Yani kısaca, optimum bir değere kadar artan incelik faktörü model üzerine etkileyen sürüklenme kuvvetini azaltırken, bu optimum değerden daha yüksek değerlere çıktıkça sürüklenme tekrar artmaktadır.

Şekil 3.3'te Phillips'in (2010), kendinden tahrikli otonom bir su altı aracı üzerinde yaptığı simülasyonlar sonucunda 2 ila 12 değerleri arasındaki incelik oranlarının bu araç üzerindeki sürüklenme kuvvetine etkisi gösterilmiştir. L/D oranı arttıkça, basınçtan kaynaklı sürüklenme (pressure drag) azalırken, yüzey alanından kaynaklı sürüklenme (skin friction drag) diğerine oranla eser ölçüde artmaktadır. Dolayısıyla toplam sürüklenme (total drag), L/D'nin arttığı yönde, azalmakta ve belirlenen aralık için L/D~6 değerinden sonra yaklaşık olarak sabitlenmektedir.

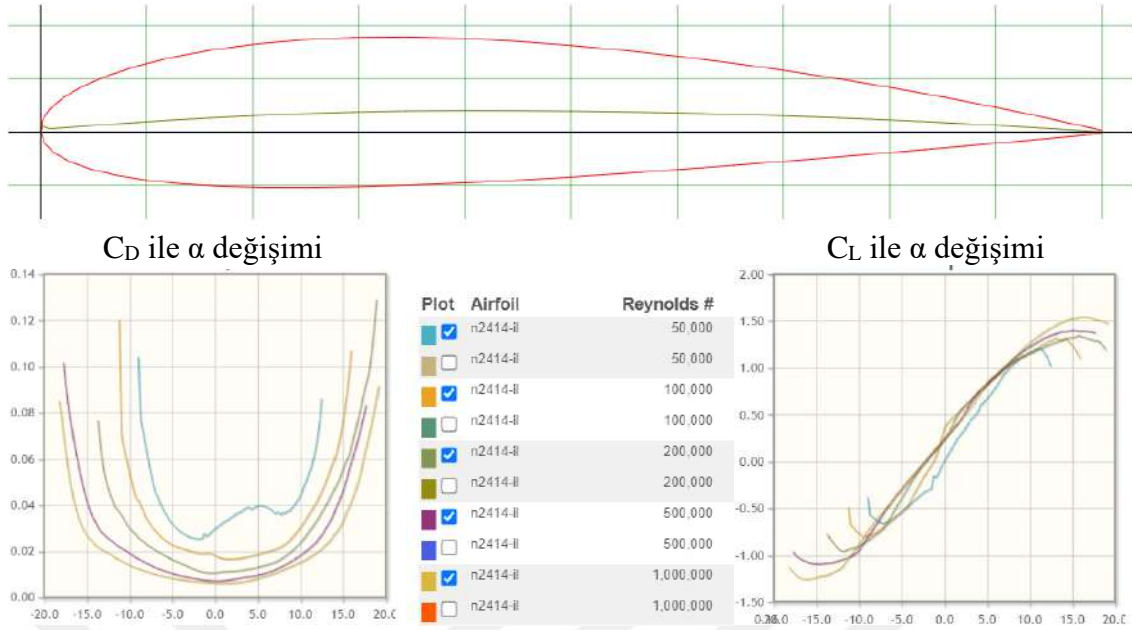
Bu çalışmada da değişen model uzunlukları ile L/D=5.5 ve 8 incelik değerlerinde akışın ne şekilde değiştiği incelenmiştir. Geometri boyu ve çapı su kanalının boyutları ve PIV yöntemindeki sınır akış alanının görüntülenebildiği için bu şekilde geometri yapının formuna odaklanılmıştır.

3.1.3. Reynolds Sayısı

Akışkanlar mekaniğinde, Reynolds sayısı için akış ataleti ile viskozite arasındaki oran açıklaması kullanılır. Yani kabaca akışın çalkantılılık oranını veya sınıfını belirten boyutsuz bir ölçüdür. Burada türbülans, akış içerisindeki fazla enerjinin bir tür ifadesidir. Reynolds sayısını belirlerken kullanılan oran ifadesinin paydasını temsil eden viskozite, türbülansın ne ölçüde dağılabileceğini de belirleyen etkidir.

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} L}{\mu} = \frac{U_{\infty} L}{\nu}$$

Formülde, viskozitenin büyüklüğü, akışkan içerisindeki momentum aktarımının büyüklüğünü belirler. Akış ne kadar enerji yüklüyse, türbülansın dağılması veyahut kontrolü o kadar zordur. Akışın gerçekleştiği yüzeye ilişkisine bağlı olarak (levha üzeri akış ya da boru içi akış), Reynolds sayısının değerine göre, belirli sınırların altı ve üstü için laminar ve türbülanslı akış sınıflandırması yapılabilir. Söz konusu belirli sınırların arasında kalan Reynolds sayısı değerleri içinse geçiş bölgesi akışı tanımlaması yapılır.



Şekil 3.4 NACA2414 kanat profili (üst) için farklı Reynolds sayılarında, değişen hücum açısına göre C_D (sol alt) ve C_L (sağ alt) değişim grafikleri (Anonim, 2022h)

Reynolds sayısı aynı zamanda önemli akış karakteristiği belirleyicisidir. Basitçe, Reynolds sayısındaki değişimin NACA2414 kanatçık yapısı üzerinde C_D (sürüklenme katsayısı) ve C_L (kaldırma katsayısı) değerlerini nasıl değiştirdiği Şekil 3.4'te görülebilir. Airfoiller (kanat profilleri), çoğunlukla havacılıkta kullanılan ve genel itibariyle kaldırma kuvveti üretmesi, sürüklenmeyi azaltması, akış ayrımını geciktirmesi ya da bunlar gibi belirli amaçlar doğrultusunda özellikle tasarlanmış iki boyutlu aerodinamik kanatçık yapılarıdır. Airfoillerin sınıflandırılmasında kamburluk oranı, airfoilin kalınlığı, hücum dairesi yarıçapı vs. gibi parametreler kullanılır. Özellikle su içerisinde kullanılan airfoillere hidrofoil de denir. Bu kanatçık tiplerinde çoğunlukla, şekilde de görüldüğü üzere, Reynolds sayısının artışı ile pozitif hücum açılarında C_D artarken, C_L için azalma biraz görülür.

3.1.4. Hücum Açısı

Akışkanlar dinamiğinde, hücum açısı (angle of attack, AOA veya α), bir akışkan içerisinde belli bir doğrultuda hareket eden geometrinin, üzerindeki bir referans çizgisi (genelde doğrusal yatay bir simetri eksenini) ile akışkanın hareketinin doğrultusu arasındaki açıyı belirtir.



Şekil 3.5 Kanat yapısı (airfoil) üzerinde hücum açısı gösterimi (McLean, 2014)

Şekil 3.5'te akış yönü (flow direction) ile kanatçığın doğrultusunu tanımlayabilecek bir referans çizgisi arasında kalan açı, hücum açısı (angle of attack) olarak gösterilmiştir.

Şekil 3.4'te görüldüğü üzere, hücum açısının artışı ile standart airfoil yapıları için genellikle C_D değerinde net bir artış görülürken, C_L değeri stall (perdövites) açısına kadar artar ve bu açıdan sonra keskin bir şekilde düşüş gösterir. Bu da hareket halindeki bir hava aracı için irtifa kaybı anlamına gelmektedir. Bu yönden, stall açısı çok önemli bir tasarım parametresidir.

3.1.5. Daldırma Oranı

Daldırma oranı (h/D) hidrodinamikte, su altı aracın serbest yüzeye olan uzaklığını belirtmek için kullanılan boyutsuz bir parametredir. Burada h modelin su yüzeyine uzaklığının ölçüsü iken, D modelin çapının ölçüsüdür. Dolayısıyla daldırma oranı, modelin kendi çapı cinsinden serbest yüzeye uzaklığının ölçüsüdür. Serbest yüzey etkisi, akış karakteristiğini önemli ölçüde etkileyebildiği için daldırma oranı da bu konuda önemli bir ölçüttür. Daldırma oranının akışkana ve modele bağlı parametreler neticesinde edinilen belli bir değerinden sonraki daldırma oranı değerleri için, model etrafındaki akış üniform kabul edilir.

3.1.6. Diğer Parametreler

Çalışmanın deney setlerinde değiştirerek kullandığımız ve model çevresindeki akış üzerindeki etkisini kontrol ettiğimiz bütün bu parametrelerin haricinde, model üzerinde bulunabilecek kanard, kanat veya kuyruk gibi pasif akış kontrol yapıları, aktif kontrol yöntemleri, model yüzeyinin pürüzlülüğü veya daha yüksek hızlarda (süpersonik, hipersonik rejimlerde) şok dalgası etkisi ve değişebilen kimyevi koşullar akış yapısını önemli oranda değiştirebilir. Bu çalışmada temel ana gövde yapısının akış karakteristiklerine etkisi üzerine yoğunlaşmıştır.

3.2. Deney Düzenekleri

Çalışmada, boya ve PIV deneylerinde, arkası küt ve çapı $D=40$ mm olan su altı modelleri için eliptik ve yarı eliptik geometrili iki farklı ojiv burun yapısı ve $L=220$ mm ve 320 mm uzunluğunda iki farklı model boyu kullanılmıştır. Bu yolla L/D oranları 5.5 ve 8 olan eliptik ve yarı-eliptik uçlu modeller elde edilmiştir. Yine PIV ve boya deneylerinde, model etrafındaki akışın Reynolds sayısı $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde, daldırma oranı $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değerleri arasında ve hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ ve 12° değerlerinde değiştirilmiş ve her bir durum için art izindeki akış karakteristiğinin nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Bunun için, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı su tüneline ve kısmen Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı su tüneline PIV ve boya deneyleri gerçekleştirilmiş ve proses edilen sonuçlar bu çalışmada detaylı olarak sunulmuştur.

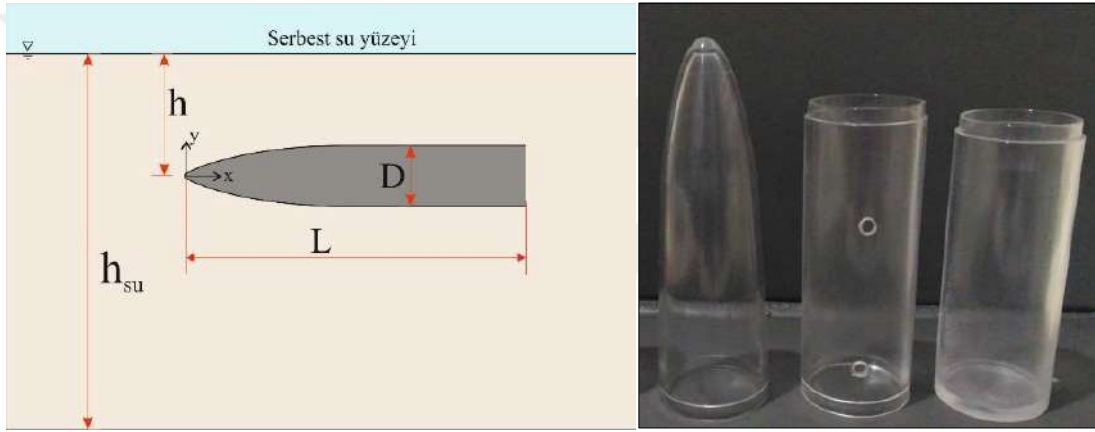
Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Aerodinamik Laboratuvarı rüzgâr tüneline ise kuvvet ölçümü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde ise yine L/D oranları 5.5 ve 8 olacak şekilde çapı 40 mm olan model için 220 mm ve 320 mm uzunluk değerleri, çapı 60 mm olan model için 330 mm ve 480 mm uzunluk değerleri seçilmiştir. Modeller yine eliptik ve yarı-eliptik iki burun yapısına sahiptir. Ek olarak hücum açısı için çoğunlukla $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığı 2° aralıklarla kullanılmış ve aerodinamik kuvvetlerin yüksekliğinden kaynaklı titreme ve kuvvet ölçüm problemleri göstermeyen modeller için 10° aralıklarla 90° 'ye kadar yüksek açılarda da ölçüm alınabilmiştir. Bunlarla birlikte, 220 mm model ($L/D=5.5$) için $Re=1.2 \times 10^5$, $Re=2.4 \times 10^5$ ve $Re=3.6 \times 10^5$ değerleri; 320 mm model ($L/D=8$) için $Re=2.4 \times 10^5$, $Re=3.6 \times 10^5$ ve $Re=4.8 \times 10^5$ değerleri; 330 mm model ($L/D=5.5$) için yine $Re=2.4 \times 10^5$, $Re=3.6 \times 10^5$ ve $Re=4.8 \times 10^5$ değerleri ve son olarak 480 mm model ($L/D=8$) için $Re=3.6 \times 10^5$, $Re=4.8 \times 10^5$, $Re=6.0 \times 10^5$ ve $Re=7.2 \times 10^5$ değerleri rüzgâr türbininin ve kuvvet ölçüm sisteminin çalışma sınırları içerisinde belirlenerek, bu değerlerde kuvvet ölçüm verileri sağlanmıştır.

Boya deneylerinde kullanılan model parçaları, Konya Gıda ve Tarım Üniversitesinde 3B yazıcıda üretilmiştir. PIV deney modelleri ise CNC ile akrilik cam malzemeden üretilmiştir. Bu malzeme, modelin, içerisinde PIV yönteminde kullanılan lazer ışınlarının geçebilecek kadar saydam olmasını ve bu sayede sistemdeki akışın görüntülenebilmesini ve ışık yansımaları da olabildiğince azaltabilmeyi sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Kuvvet ölçümü deneylerinde üretilen modeller de yine boya deneyleri modellerinin üretiminde kullanılan aynı malzeme ve teknik ile Karadeniz Teknik Üniversitesinde 3B yazıcı ve CNC ile üretilmiştir.

Deney modellerinin üretiminden sisteme entegre edilmesi kısmına kadarki süreç tüm deney sistemlerinde hemen hemen aynıdır. Model üretildikten sonra bir dizi pürüzsüzleştirme işlemi ile deney sisteminin veri oluşturma şekline en uygun olacak şekilde boyama, parlatma vb. aşamalardan geçirilir. Sisteme monte edilebilmesi için gereken delikler açılır ve kılavuz çekilir. Daha sonra sisteme bağlanır ve cıvata yardımıyla da sıkıştırılarak istenmeyen devinimlerin önüne geçmeye çalışılır.

3.2.1. PIV Deneyleri

Şekil 3.6’da incelenen modelin iki boyutlu şekli ve fotoğrafının genel görünümü verilmiştir:



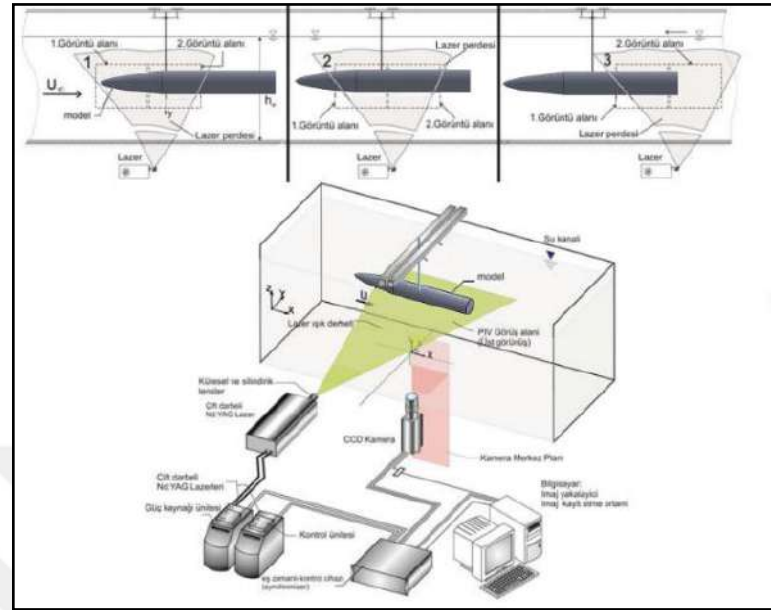
Şekil 3.6 PIV deneylerinde kullanılan modellerin görselleri



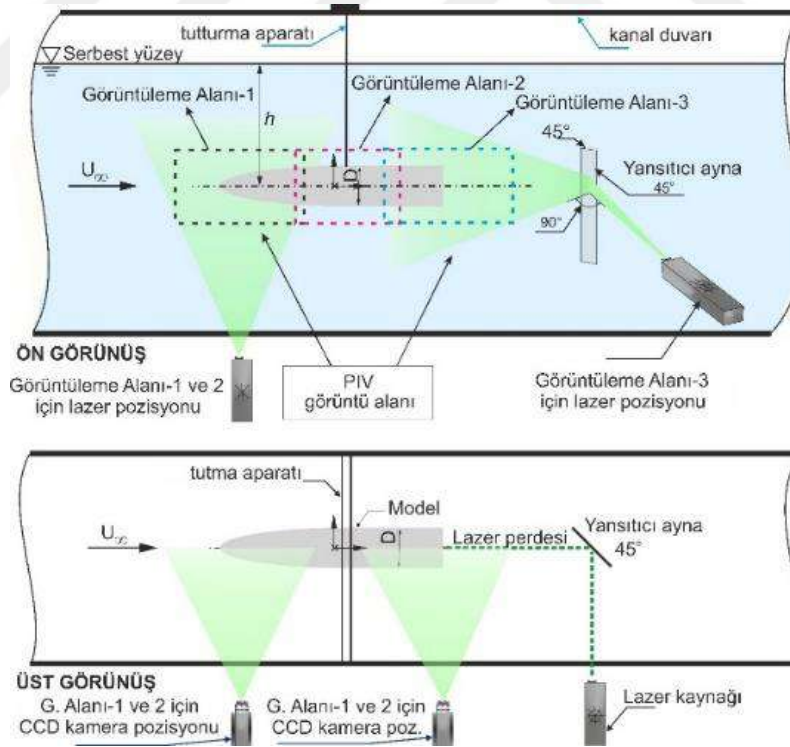
Şekil 3.7 Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi su tüneli ve deneysel sistem

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi İleri Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarının ve deneylerde kullanılan sistemin fotoğrafları Şekil 3.7’de verilmiştir. Boya deneylerinde

yine benzer bir sistem olan Çukurova Üniversitesi Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı da kısmen kullanılmıştır.



(a) 3B görünüm

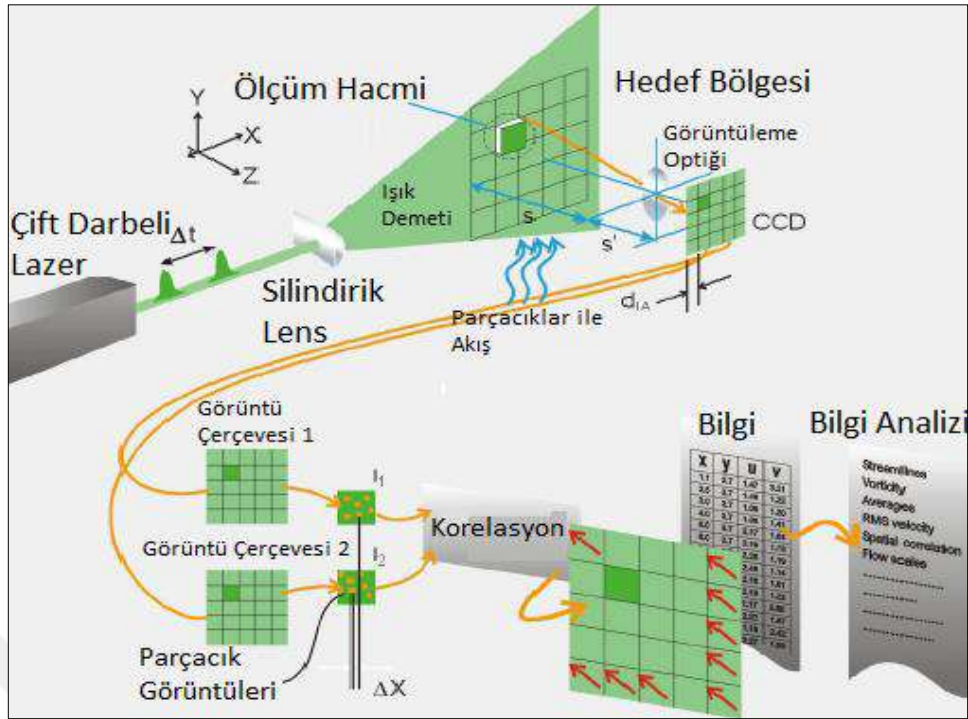


(b) 2B görünüm

Şekil 3.8 PIV sistem düzeni ve çalışma şematik görünümü (Ozgoren ve ark., 2022)

PIV tekniğinde akış karakteristiğini inceleyebilmek için tünelin içerisindeki çevrim suyuna, su ile yaklaşık aynı yoğunlukta 10-20 μm çapında gümüş kaplı metal veya plastik partiküller ilave edilmektedir. Bu partiküller, durgun suda çökmesine rağmen akış sırasında su ile aynı hızda hareket edebilmektedirler. 145 mJ'lik çift darbeli lazer kaynağı, diğer optik elemanların da yardımıyla 1-2 mm kalınlığındaki lazer perdelerini farklı genişliklerde akış görüntü alanına gönderebilmektedir. Lazer kaynağının potansiyeli gereği saniyede maksimum 15 lazer huzmesi ile aydınlatılan akış, lazer ile kombine şekilde çalışan dijital bir kamera tarafından milisaniyelik periyotlarla çekilen iki fotoğraf bilgisayar sistemine aktarılmaktadır. Bu fotoğraflar arasındaki süre (Δt) tamamen akış hızına ve türbülans seviyesine bağlıdır. Lazer kaynağı ve dijital kamera, aralarındaki senkronizer denilen ve bilgisayar vasıtasıyla kontrol edilen bir eş zamanlayıcı ile koordine edilmektedir. Bilgisayar ortamına aktarılan fotoğraflar daha küçük alt bölgelere ayrılarak, Hızlı Fourier dönüşümü yardımıyla partiküllerin her iki fotoğraf arasındaki yer değiştirmeleri hesaplanır. Dolayısıyla iki fotoğraf arasındaki zaman farkı ve de alt bölgelerdeki partiküllerin aldıkları yol ele alınarak akışın hızı hesaplanabilmektedir. Akış bölgesi içerisindeki hız vektörlerinin maksimum %3'ü genel akış karakteristiğine uymayan bozuk vektörlerden oluşmaktadır. Bozuk olan bu vektörler çeşitli yazılımlar sayesinde bulunarak akış bölgesinden kaldırılabilir. Silinen bu vektörlerin yerine de bilinear interpolasyon (en küçük kareler metodu) ile komşu ağlardaki vektörlerden yeni vektörler hesaplanır. Ek olarak Gaussian düzeltme metodu da kullanılarak herhangi bir ağ noktasındaki vektörün komşu vektörlerle daha örtüşür durumda olması sağlanır (Şekeroğlu, 2019).

PIV Sisteminin Teknik Özellikleri ve Bileşenleri: Çift darbeli ve 532 nm dalga boylu, 145 mJ'lük darbe enerjisine sahip, saniyede maksimum 15 lazer huzmesi çifti gönderebilen PIV lazer (Nd: YAG lazer), CCD kamera tabanlı sistemler için çalışmaktadır. Litron LPU550-PIV ikiz güç kaynağı da her lazerden 15 Hz, 532 nm dalga boyu ve 200 mJ'lik çıkış potansiyeli ile sisteme uyumlu şekilde çalışmaktadır. Sisteme 1608x1208 çözünürlüklü, 299 fps (kare/saniye) çekim kapasiteli CCD dijital kamera eklenmiştir. Kameraya entegre şekilde 500 mm f/1,4'lük bir lens ve x-y yönlü hareket kabiliyeti olan bir travers sistemi de bulunmaktadır. Yine lazerin darbeli tipte olmasından kaynaklı, lazer ve kameranın senkronize çalışabilmesi için bilgisayar kontrolündeki bir senkronizer da sisteme eklidir (Şekeroğlu, 2019).



Şekil 3.9 PIV akış diyagramı (Anonim, 2020a)

3.2.2. Boya Deneyleri



Şekil 3.10 Boya deneyi sürecinden bir görüntü

PIV tekniğinde kullanılan su tüneli ve travers sistemi aynen burada da kullanılmaktadır. Yalnız burada, tünel içerisine gümüş partiküller salmak yerine modeli tutan mekanizma yardımıyla modelin içerisine belli miktarda boya basılır. Boya deneyi uygulaması bu anlamda, Rodamine 6G boya ile akış görüntüleme tekniğine dayanır. Lazer ve aynalar yardımıyla, modele gelen akışa müdahale edilmeksizin, söz konusu modelin dikey eksenini aydınlatılarak, öncesinde modelin dikey ekseninde olacak şekilde açılmış deliklerden, modelin etrafından geçen akışın oluşturduğu basınç farkı yardımıyla

modelden tüneldeki su içerisine boya salınması ve yine mevcut akışın bu sızan boyayı şekillendirmesinin gözlenerek video kamera yardımıyla kayıt altına alınması boya ile akış görüntüleme tekniğini oluşturur.

3.2.3. Kuvvet Ölçüm Deneyleri ve Yüzey Yağ, İplikçik ve Duman Tel Akış Görselleştirme Deneyleri

Kuvvet ölçüm deneyleri ile akış görselleştirme deneyleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Aerodinamik ve Rüzgâr Enerjisi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan emmeli tip rüzgâr tüneli ve kuvvet ölçüm sisteminin fotoğrafları Şekil 3.11’de verilmiştir.

Aerodinamik ve Rüzgâr Enerjisi Araştırma Laboratuvarı Test Sistemleri ve Ölçüm Kabiliyetleri: Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Aerodinamik Laboratuvarında açık çevrim emmeli tipte bir adet rüzgâr tüneli bulunmaktadır. Rüzgâr tünelinin altyapısı kanat yüzey basınç ölçümü, kuvvet ölçümü, yüzey yağ akış görüntüleme, iplikçik ve duman tel akış görüntüleme deneyleri için uygundur.

Emmeli tip rüzgâr tüneli: Rüzgâr tüneli sırasıyla aksel fan, körük, daire-daire konnektör, kare-daire konnektör (diffuser), test bölgesi, daralma hunisi (contraction cone), elekler (settling chamber) ve giriş ağzından oluşmaktadır. Ayrıca test bölgesinin ve daralma hunisinin genel özelliklerini de Çizelge 3.1’de bulmak mümkündür.



Şekil 3.11 Emmeli tip rüzgâr tüneli test bölgesi ve kuvvet ölçüm sistemi

Çizelge 3.1 Rüzgâr tüneli genel özellikleri (Seyhan vd., 2021b)

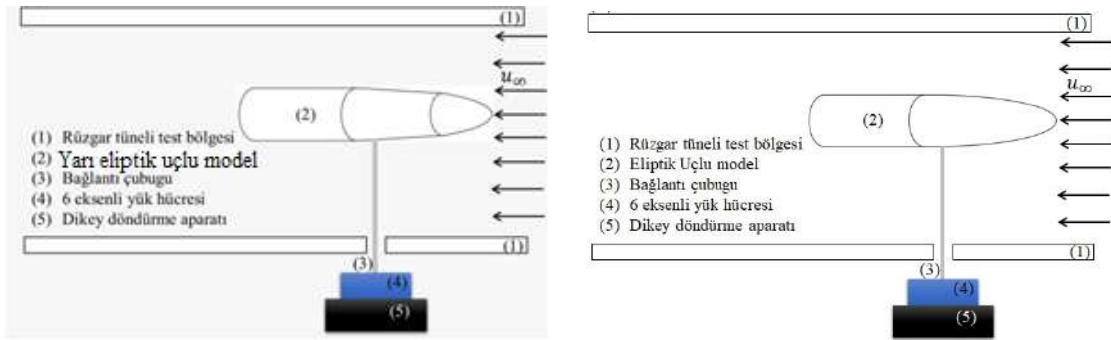
Açıklama	Boyutlar
Test bölgesi kesiti	$57 \times 57 \times 120$ cm
Türbülans şiddeti	0.5%
Genişleme açısı	0.3°
Toplam uzunluk	10.6 m
Maximum hız	50 m/s
Daralma oranı	6.1

90 cm çaplı ve 1500 rpm (devir/dakika) kapasiteli eksenel fanın, frekans invertör yardımıyla devir sayısını ayarlamak suretiyle, test bölgesindeki serbest akım hızı 0-50 m/s aralığında değiştirilebilmektedir. Model boyutu da göz önüne alınarak minimum 10 farklı hız değeri için deney yapılır.

Kuvvet ölçüm sistemi: Şekil 3.11’de görülen 6 eksenli yük hücre sine mil yardımıyla bağlanan modelin kaldırma ve sürüklenme gibi aerodinamik karakteristikleri ölçülebilmektedir. Bu ATI Gamma SI-32-2.5 model yük hücre sine, $F_{x,y}=32$ N, $F_z=100$ N ve $T_{x,y}$ ve $z=2.5$ Nm ölçüm aralıklarına sahiptir.

Kuvvet ölçümleri için her model uzunluğu ve o uzunluk için belirlenen Reynolds değeri için akım hızı hesaplanmış ve bu hız için rüzgâr tünelinin hangi frekansta çalışması gerektiği pitotüp yardımıyla belirlenmiştir. Daha sonra sisteme monte edilen modellerin her biri için gereken Reynolds sayılarında ölçüm değerleri alınmış ve her seri sonunda model sökülerek modelin sisteme bağlandığı milin de aynı Reynolds değerlerinde ölçümleri alınmış ve C_L , C_D değerleri belirlenirken milin üzerine etkiyen kuvvetler total kuvvetlerden çıkarılarak modele etkiyen net kuvvet hesaplanmıştır.

Bu çalışmada, kuvvet deneyleri kapsamında 40 mm ve 60 mm çaplı, küt firar kenarlı torpido benzeri modellerin iki farklı burun yapısı (eliptik ve yarı-eliptik) ve iki farklı boy/en oranının ($L/D=5.5$ ve 8) kuvvet ölçümündeki etkileri araştırılmıştır. $Re=1.2 \times 10^5$, $Re=2.4 \times 10^5$, $Re=3.6 \times 10^5$, $Re=4.8 \times 10^5$, $Re=6.0 \times 10^5$ ve $Re=7.2 \times 10^5$ olacak şekilde rüzgâr türbininin ve kuvvet ölçüm sisteminin çalışma sınırları göz önüne alınarak her model için en az üç tanesi belirlenmiş ve bu değerlerde kuvvet ölçüm verileri sağlanmıştır. Hücüm açısı $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığında 2° ve bazı durumlar için 30° ’den sonra 10° aralıklarla 90° ’ye kadar değiştirilerek ölçüm alınmıştır.



Şekil 3.12 Yarı-eliptik ve eliptik uçlu modeller için kuvvet ölçümü taslak görüntüleri



Şekil 3.13 Kuvvet ölçümü için yarı-eliptik ve eliptik uçlu modeller

Akış görüntüleme yöntemleri: Şekil 3.14, 3.15 ve 3.16'da örnekleri verilen iplikçik, duman tel ve yüzey yağ akış görüntüleme yöntemleri, basit ama etkin yöntemlerdir.



Şekil 3.14 Yüzey yağ akış görüntüleme örneği

Reynolds sayısının yüksek ($Re > 100000$) olduğu akışlarda etkili olan yüzey yağ akış görüntüleme yönteminde oleik asit, titanyum dioksit ve SAE20 motor yağı 1:5:7 oranında karıştırılarak ve model üzerine sürülerek kullanılmaktadır. Bu araştırma kapsamında, yüzey yağ akış görüntüleme yöntemi $Re = 4.8 \times 10^5$ değerinde, $\alpha = 0^\circ - 20^\circ$ hücum açısı aralığında, eliptik ve yarı-eliptik burun yapıları modellerde ve $L/D = 5.5$ ve 8 değerleri için uygulanmıştır.



Şekil 3.15 Eliptik model üzerinde iplikçik akış görüntülemesi

İplikçik yönteminde iplikler, model yüzeyine yapıştırıcı yardımıyla düzenli bir şekilde yapıştırılarak akış yapıları görüntülenebilmektedir. Çalışmada, $Re = 4.8 \times 10^5$ değerinde, $\alpha = 0^\circ$ ve $26^\circ - 50^\circ$ hücum açılarında, $L/D = 5.5$ oranındaki eliptik ve yarı-eliptik burun yapıları modellerde uygulanmıştır. Model çapının küçük olması sebebiyle düşük atak açılarında iplikçik akış görüntülemesinde belirgin bir görüntü elde edilemediği için yüksek atak açılarında iplikçik akış görüntülemesi yapılmıştır.



Şekil 3.16 Yarı-eliptik model üzerinde duman tel akış görüntülemesi ($\alpha=20^\circ$, $Re=64000$)

Reynolds sayısının düşük ($Re < 100000$) olduğu akışlarda etkili bir yöntem olan duman tel akış görüntüleme yönteminde, direnç teli üzerine tutunan sıvı parafin taneciklerinin DC güç kaynağı ile uygulanan gerilim neticesinde ısınarak buharlaşması sayesinde cisim etrafındaki akış yapıları elde edilebilmektedir. Bu bölümde, $Re=6.4 \times 10^4$ değerinde, $\alpha=0^\circ-50^\circ$ arasında hücum açılarında, $L/D=5.5$ oranındaki yarı-eliptik burunlu model üzerinde deney alınmıştır.

3.2.4. Akış Karakteristiğini İfade Eden Değerler

Aşağıda, bu çalışmada kullanılacak akış karakteristiğini ifade eden değerlerin matematiksel tanımlamaları verilmiştir:

Fiziksel anlamda atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanan Reynolds sayısı,

$$Re = \frac{\rho U_\infty L}{\mu} \quad (3.1)$$

formülüyle ifade edilir. Formüldeki ρ akışkanın yoğunluğunu, U_∞ akış hızını, L modelin karakteristik uzunluğunu, μ dinamik viskoziteyi verir.

g yerçekimi ivmesi, U_∞ üniform akış hızı ve h su derinliği olmak üzere; atalet kuvvetlerinin gravite kuvvetlerine oranını olan Froude sayısı,

$$Fr = \frac{U_\infty}{\sqrt{g h}} \quad (3.2)$$

şeklinde formüle edilir ve kritik altı ($Fr < 1$), kritik ($Fr = 1$) ve kritik üstü ($Fr > 1$) olarak sınıflandırılır. Daldırma oranının $h/D=0.5$ ve 0.75 olduğu değerlerde, yüzeye yakın

konumda olan model için serbest yüzey deformasyonu ve dalgalanması oluşmaktadır ancak Froude sayısı birden küçük olduğu için oluşan deformasyonun etkisi ihmal edebilir mertebedir. Ancak açılı durumlarda modelin burun kısmının yüzeyi geçmesinden dolayı oluşan serbest deformasyon, Froude sayısı değeri birden küçük olsa da akış özelliklerini etkilemektedir.

Etkin girdap kopma frekansı f , üniform akış hızı U_∞ ve modelinin karakteristik uzunluğu L olmak üzere; boyutsuz girdap kopma frekansı olarak tanımlanan Strouhal sayısı şöyle formüle edilir:

$$St = \frac{fL}{U_\infty} \quad (3.3)$$

PIV ölçümlerinde elde edilen dataların imaj prosesinden sonra, akış düzlemindeki iki boyutlu anlık hız bileşenleri şu şekilde hesaplanır:

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad ve \quad v = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.4)$$

Akım çizgileri, ortalama hızlar, çalkantı hızları, girdaplar, TKE ve Reynolds gerilmelerinin kontur değerleri ve şematik görselleri elde edilirken de bu anlık hız alanları kullanılarak aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmaktadır:

Akım yönündeki (x yönünde) hız bileşenlerinin ortalaması:

$$\langle u(i, j) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n(i, j) \quad (3.5)$$

Akım yönüne dik (y yönünde) hız bileşenlerinin ortalaması:

$$\langle v(i, j) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n(i, j) \quad (3.6)$$

Zaman ortalamalı girdap değeri:

$$\langle \omega(i, j) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \omega_n(i, j) \quad (3.7)$$

Akım yönündeki hızların çalkantı hız değerlerinin geometrik ortalaması:

$$u(i, j)_{rms} = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [u_n(i, j) - \langle u(i, j) \rangle]^2 \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

Akım yönüne dik hızların çalkantı hız değerlerinin geometrik ortalaması:

$$v(i, j)_{rms} = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [v_n(i, j) - \langle v(i, j) \rangle]^2 \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

Ortalama Reynolds gerilmesi:

$$\langle u'v'(i,j) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [u_n(i,j) - \langle u(i,j) \rangle] [v_n(i,j) - \langle v(i,j) \rangle] \quad (3.10)$$

Türbülans kinetik enerji (TKE) seviyesi:

$$TKE = \frac{1}{2} (\langle u'u'(i,j) \rangle + \langle v'v'(i,j) \rangle) \quad (3.11)$$

Açık kanal akışı içerisinde, daldırılarak yapılacak torpido benzeri modelin üzerine gelen akış türbülanslıdır. Model çevresinde oluşan akış ayrılması da türbülanslıdır. Burada 3.10 eşitliğinde hesaplanacak ortalama Reynolds gerilmeleri türbülanslı akışta oluşan kayma gerilmeleridir. Akıştaki türbülans dolay eddy (küçük) girdapların birim alana uyguladığı kuvvet aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır (Cengel ve Cimbala, 2014).

$$\tau_{türbülans} = \delta F / dA = -\rho \overline{u'v'} \quad (3.12)$$

Ortalama Reynolds gerilmesi değerlerinin akış fiziği açısından yorumlanması, model geometri üzerindeki kuvvetler hakkında bilgi sunması açısından değerlendirilir. Ayrıca elde edilen türbülans çalkantıları hesaplamalı akışkanlar dinamiğindeki (Computational Fluid Dynamics: CFD) ticari programların türbülans modelleme yöntemlerinin geliştirilmesi ve bunların doğrulanması amacıyla da kullanılmaktadır.

Eşitliklerde geçen N, toplam anlık görüntü sayısını; n, anlık görüntüyü; (i,j), akış alanındaki ağların koordinatlarını belirtmek için kullanılmıştır. < > sembolü, söz konusu akış özelliğinin zaman ortalamalı değerini belirtir.

Ayrıca kuvvet ölçüm deneyleri yardımıyla ölçülen sürüklenme (D) ve kaldırma kuvvetleri (L) yardımıyla modellerin bu kuvvetlere ait katsayılarının (C_D ve C_L) bulunması şu formüllerle gerçekleştirilmiştir:

$$C_D = \frac{2D}{\rho V^2 A} \quad (3.13)$$

$$C_L = \frac{2L}{\rho V^2 A} \quad (3.14)$$

C_D ve C_L denklemlerindeki D ve L, aerodinamik kuvvetleri; ρ akışkanın mevcut çevre koşullarındaki yoğunluğunu; V, üniform akış hızını ve A, referans alanı belirtmek için kullanılır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. PIV ve Boya Deney Sonuçları

Bu tez çalışmasında, 40 mm çaplı, küt firar kenarlı otonom bir su altı modelinin iki farklı burun yapısı (eliptik ve yarı eliptik) ve $L=220$ mm ve 320 mm uzunluğunda iki farklı model boyu için PIV ve boya deneyleri yapılmıştır. Akışın Reynolds sayısı $Re=32000$ ve 64000 değerleri, modelin daldırılma oranı $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değerleri ve hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ ve 12° değerleri için ayrı ayrı çekimler alınmış ve her bir durum için art izindeki akış karakteristiğinin nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda detaylı değerlendirilerek verilmiştir.

4.1.1. Reynolds Sayısı ve Daldırma Oranı Değişiminin İncelenmesi

Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında eliptik burun (uç) ve küt kuyruk model tasarım çevresindeki akış yapısı etkileri boy/en oranı $L/D=5.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, Reynolds sayısının $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde Rodamine 6G boya ile akış görüntüleme sonuçları Şekil 4.1'de sunulmuştur.

Şekilde ele alınan anlık durumların tamamında, akışın geometrinin bittiği uçta daha düşük basınca sahip art izi bölgesine doğru uzanım yaparak, bu bölgede ters akış oluşturduğu belirgin şekilde görülmektedir. Bu durum, art izi bölgesinde Von Karman girdap caddelerinin de gözlemlenebilmesini olanaklı kılmıştır. Reynolds sayısının her iki değeri için de $h/D=0.50$ ve 0.75 daldırma oranı değerlerinde serbest yüzeyin üst kayma tabakası ve art izindeki akış yapısına etkisi belirgin şekilde görülebilmektedir. Daldırma oranının $h/D=0.50$ olduğu durumda modelin üst yüzeyi serbest yüzeye direkt temas halinde olduğundan dolayı üst kayma tabakası hiç oluşmadığı için art izindeki akış tamamen alt kayma gerilmesi etkisinde kalmıştır. Daldırma oranı $h/D=0.75$ olduğunda ise üst kayma tabakasındaki akış, serbest yüzeye yöneldiği için art izine tam uzanım yapamayarak art izindeki akış yapısının yine asimetrik bir şekil almasına sebep olmuştur. Bu daldırma oranlarından sonraki değerler için ise serbest yüzeyin etkisi azalmış ve art izi akış profilleri birbirine benzer şekillerde ve geometrinin yatay merkez çizgisine göre simetrik olarak oluşmuştur. Reynolds sayısının $Re=32000$ değerinden $Re=64000$ değerine yükselmesiyle akış hızlanmış ve modelden çıkan boyayı daha kolay süpürerek boyanın daha zayıf görseller oluşturmasına ve dolayısıyla gözlemin zorlaşmasına sebep olmuştur. Ek olarak, boya görsellerinde art izi bölgesi ile serbest akım hızı arasındaki hız farkı ve dönümlü akış bölgesinin serbest kayma tabası boyunca çok sayıda Kelvin

Helmholtz girdapları oluşmaktadır. Bu girdapların serbest yüzeye yakın $h/D=0.5$ ve $h/D=0.75$ daldırma oranları alt yüzeyden oluşan serbest kayma tabakası çevresinde oluşurken, yüksek daldırma oranlarında ise art izi çevresinin tamamında serbest kayma tabakası çevresinde olduğu gözlenmiştir.

Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı hız vektör alanı $\langle V \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Şekildeki modelde, daldırma oranının $h/D=0.5$ olduğu değerde modelin üst yüzeyi akışkanın serbest yüzeyine teğettir, dolayısıyla üst kayma tabakası oluşmamıştır. Modelin alt kayma tabakasından ayrılan akış, art izinde yukarıya doğru hareketlenmiş ve art izi bölgesindeki ters akış yapısının serbest yüzeyeyle direkt etkileşim halinde olmasını sağlamıştır. Serbest yüzey ile olan bu direkt etkileşim $Re=64000$ değerinde $h/D=0.75$ daldırma oranında da üst kayma tabakası oluşmasına rağmen devam etmiştir. Daldırma oranı $h/D=0.75$ için, $Re=32000$ değerinde ise bu bölgenin direkt etkileşimi kesilmiş, lakin yoğun etkisini sürdüren serbest yüzeyden dolayı kolayca fark edilebilir asimetric bir akış yapısı oluşturmuştur. Daldırma oranının artmasıyla birlikte serbest yüzeyin etkisinin azaldığı ve Reynolds sayısının artmasıyla birlikte art izindeki ters akış bölgesinin modele doğru yaklaştığı gözlemlenmiştir.

Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım çizgileri topolojisi $\langle \Psi \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması Şekil 4.3'te görülmektedir.

Şekildeki geometrinin art izi bölgesinde gözlemlenebilen odak noktaları F, durma noktaları ise S ile belirtilmiştir. Genel olarak incelenen durumlarda, dönümlü akışı gösteren belirgin ikişer odak noktası (F_1 ve F_2) ile birer durma noktası (S) gözlemlenmiştir. Modelin üst yüzeyinin serbest yüzeye temas ettiği ve dolayısıyla üst kayma tabakasının oluşmadığı $h/D=0.5$ daldırma oranı için, Reynolds sayısı $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde akım çizgileri belirgin şekilde farklıdır. Reynolds sayısının görece düşük olduğu $Re=32000$ değerinde, art bölgesinde iki odak noktası ve bunun sonucunda bir de durma noktası oluşmuşken; $Re=64000$ değerinde akışın hızının katlanması ve serbest yüzeyde daha yoğun dalga oluşumunun da etkisiyle tek bir odak

noktası oluşabilmiş ve alt kayma tabakasının art izinde serbest yüzeyle buluşması daha kısa mesafede gerçekleşmiştir. Daldırma oranı $h/D=0.75$ durumu için, her iki Reynolds değerinde de geometrinin üst yüzeyi ile serbest yüzey arasında kalan akış, daha çok serbest yüzey etkisindedir. Yine $h/D=0.75$ daldırma oranında her iki Reynolds değeri için de serbest yüzeyin etkisinden dolayı art izinde asimetrik akış görülmekte ve akışın serbest yüzeye doğru yol izlemesi durumu devam etmektedir. Bu daldırma oranından sonraki daldırma oranları için genel itibarıyla akışın modelin yataydaki merkez çizgisine göre daha simetrik bir şekil aldığı ve yüzeye yönelmeyi bıraktığı görülmektedir. $Re=64000$ değeri için art izindeki ters akış bölgelerinin, izlenen bütün daldırma oranları için $Re=32000$ değerinde aynı daldırma oranındaki ters akış bölgesine göre daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Bu ters akış bölgelerinin büyüklüğünün $Re=32000$ için farklı daldırma oranlarında çok değişken olmamasıyla birlikte, $Re=64000$ için daldırma oranı arttıkça bu bölgenin de büyüyerek $Re=32000$ durumundaki büyüklüğe yaklaştığı ve $h/D=3.5$ değerinde neredeyse eşitlendiği görülmektedir. Bu durum da yine $Re=64000$ değerinde akışın fazla hızlı olması ile birlikte serbest yüzeyin yoğun deformasyona maruz kalması ve bu şekilde serbest yüzey etkisinin alt tabakalara daha yoğun iletilmesi dolayısıyla oluşmuştur. Benzer şekilde, daldırma oranı arttıkça, odak noktalarının $Re=32000$ 'de $h/D=0.50$ değeri haricinde çok değişmezken, $Re=64000$ 'de modelden daha uzakta oluştuğu görülmektedir.

Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni kontur $\langle u/U_\infty \rangle$ (Şekil 4.4) ve akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni kontur $\langle v/U_\infty \rangle$ (Şekil 4.5) dağılımları değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması yapılmıştır.

Şekil 4.4'te negatif değerlere sahip hız konturları art izinde ters akış bölgesinin oluştuğunun kanıtıdır. Şekilde daldırma oranının, modelin uç bölgesindeki akım yönündeki hız kontur dağılımları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Benzer şekilde, serbest yüzey etkisinin özellikle güçlü olduğu $h/D=0.50$ ve 0.75 değerleri haricinde, yani daha derin bölgede, daldırma oranının artmasının modelin art izinde akım yönündeki hız kontur dağılımları için de çok büyük farklılıklar oluşturmadığı görülmektedir. Söz konusu görece derin bölge için, yani $h/D=1.00$ daldırma oranından itibaren art izindeki akış yapısının modelin yatay merkez çizgisine göre daha simetrik bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Yine $\langle u/U_\infty \rangle$ zaman ortalamalı akım yönündeki boyutsuz

hız bileşeni kontur yapıları göstermektedir ki, Reynolds sayısının artması art izindeki ters akış bölgesinin daha küçük bir alan kaplamasına sebep olmaktadır. Öyle ki, $Re=64000$ değerinde model art izleri, $Re=32000$ değerinde aynı daldırma oranındaki durumlara kıyasla modele daha yakın olarak gözlemlenmiştir.

Şekil 4.5'teki $\langle v/U_\infty \rangle$ zaman ortalamalı akım yönüne dik boyutsuz hız kontur dağılımları, $h/D=0.75$ daldırma oranı değerine kadar serbest yüzeyin, akış yapısı üzerinde etkin olduğunu göstermektedir. Modelin art izindeki pozitif değere sahip hız konturları, akışın serbest yüzeye yöneldiğinin göstergesidir. Daldırma oranının $h/D=1.50$ değerinden itibaren ise modelin yatay merkezinin altında ve üstünde kalan hız konturları birbirine yaklaşarak daha simetrik bir yapı göstermiştir. Aynı zamanda art izinde; serbest yüzey etkilerinin daha yoğun hissedildiği $h/D=0.50-1.00$ arasındaki bölgede artan daldırma oranı ile birlikte pozitif değerlerin şiddeti azalmış, negatif değerlerin şiddeti artmıştır. Bu serbest yüzey etkisi yönünden daha yoğun olan bölgeden daha derin kısımlarda ise konturların şiddetleri daha küçük değerlerle değişmiş ve değerler daha stabil bir rejim sergilemiştir. Yine bu $\langle v/U_\infty \rangle$ dağılım şemalarında da artan Reynolds değeri şemaya daha küçük konturlar oluşturmak suretiyle yansımıştır. Nitekim şeklin sağ tarafını oluşturan $Re=64000$ değerindeki konturlar, sol taraftakilere göre modele daha yakın ve daha küçüktür.

Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı girdap konturları $\langle \omega L/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması Şekil 4.6'da sunulmuştur.

Şekilde $h/D=0.5$ daldırma oranında modelin üst yüzeyinin serbest yüzeye aynı seviyede olmasından dolayı üst kayma tabakasının hiç oluşmamış olduğu, $h/D=0.75$ daldırma oranında ise modelin üst kısmında bir kayma tabakası oluştuysa bile oluşan bu kayma tabakasının serbest yüzey ile doğrudan etkileşimde olduğu ve bu etkileşimini kaybetmeksizin serbest yüzeyi takip ederek art izine uzamış olduğu görülmektedir. Serbest yüzey etkisinin belirgin şekilde daha az hissedildiği daha derin daldırma oranlarında ($h/D \geq 1.00$) ise üst kayma tabakası, üst yüzeyi takip ederek modelin sonunda art izine doğru uzayan bir yol izlemiştir. Bu yüzden daha derindeki daldırma oranları için art izindeki girdap dökülmeleri birbirlerine daha çok yaklaşarak daha kapalı bir konfigürasyon oluştururken, daha sık daldırma oranları için ($h/D=0.50$ ve 0.75) modelin arka ucundan daha uzağa doğru ve daha açık bir konfigürasyon oluşturmuştur. Alt kayma

tabakaları her daldırma oranı için modelin alt yüzeyini takip ederek art izine uzamıştır. Dolayısıyla $h/D=1.00$ seviyesinden itibaren bu alt ve üst kayma tabakaları modelin merkez çizgisine göre simetrik bir şekil oluşturmaya başlamıştır. Reynolds sayısının değerinin $Re=32000$ 'den $Re=64000$ 'e yükselmesiyle, girdap oluşum uzunluğunun her daldırma oranı için kısaldığı gözlemlenmiştir.

Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle u_{rms}/U_{\infty} \rangle$ (Şekil 4.7) ve akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle v_{rms}/U_{\infty} \rangle$ (Şekil 4.8) dağılımları değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^{\circ}$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması sunulmuştur.

Serbest yüzey etkisinin görece yüksek olduğu $0.50 \leq h/D \leq 1.00$ aralığındaki daldırma oranlarında alt kayma tabakasının yüzeye yönelmesiyle oluşturduğu etkileşim neticesinde, zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle u_{rms}/U_{\infty} \rangle$ hem daha yüksek maksimum değerlere ulaşmış hem de bu değerlere genel olarak yüzeye daha yakın bölgelerde ulaşmıştır. Serbest yüzey etkisinin azaldığı daha yüksek daldırma oranlarında ($1.50 \leq h/D \leq 3.50$) ise hem maksimum değerler artan daldırma oranıyla düşmüş hem de daha sığ bölgelerde görülen aksine, kontur kümeleri merkez çizgisine doğru kaymış ve daha simetrik bir görüntü elde edilmiştir. $Re=32000$ değeri için kontur kümelerinin maksimum değerleri, genel itibarıyla akışın arka tarafta modelden koptuğu bölgede oluşmuşken; $Re=64.000$ değeri için maksimum değerler art izi bölgelerinde oluşmuştur. Bununla birlikte Reynolds sayısındaki artış ile aynı daldırma oranında daha yüksek değerler ve daha şiddetli konturlar elde edilmiştir.

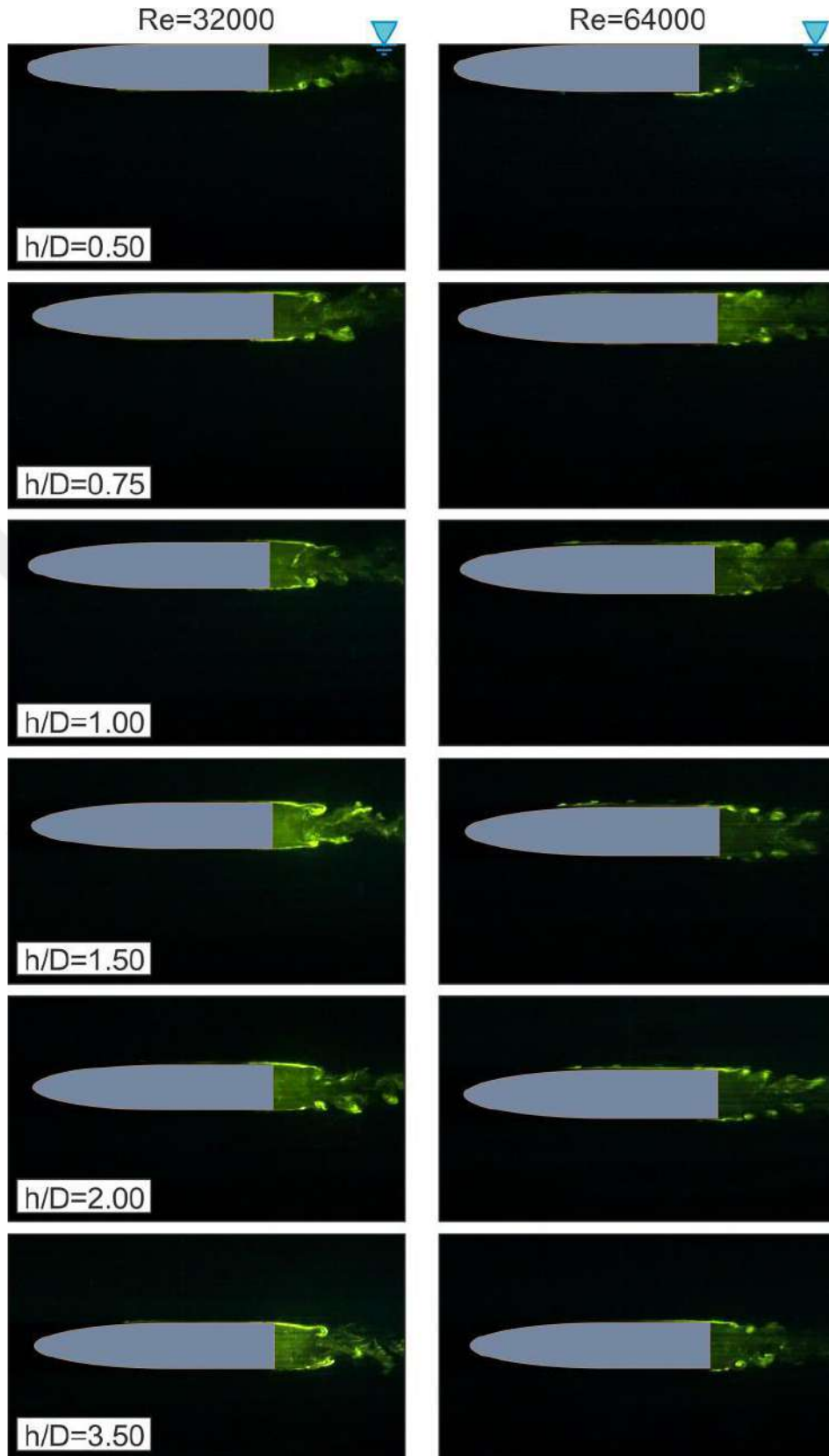
Ortalama akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni $\langle v_{rms}/U_{\infty} \rangle$ türbülans çalkantı konturları (Şekil 4.8) için de yine benzer şeyler söylemek mümkündür. Daldırma oranı $h/D=0.50$ ve $h/D=0.75$ değerlerinde, serbest yüzeyin üst kayma tabakasının gelişimini engellemesinden ve art izindeki akış yapısının alt kayma tabakasının etkisinde olmasından dolayı yüzeye yönelen alt kayma tabakası daha sığ bölgelerdeki kontur şiddetlerinin daha yüksek olmasını sağlamıştır. Dolayısıyla daldırma oranı arttıkça azalan serbest yüzey etkisiyle, daha düşük kontur değerlerine daha simetrik kontur yapıları eşlik etmiştir. Artan Reynolds sayısı ile aynı daldırma oranında konturlar art izinde modele daha yakın oluşmaya başlamış ve daha yüksek Reynolds değerinde momentum aktarımının artmasından dolayı konturlarda daha yüksek maksimum değerler elde edilmiştir.

Şekil 4.9'da serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi kontur dağılımları $\langle u'v'/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılmıştır.

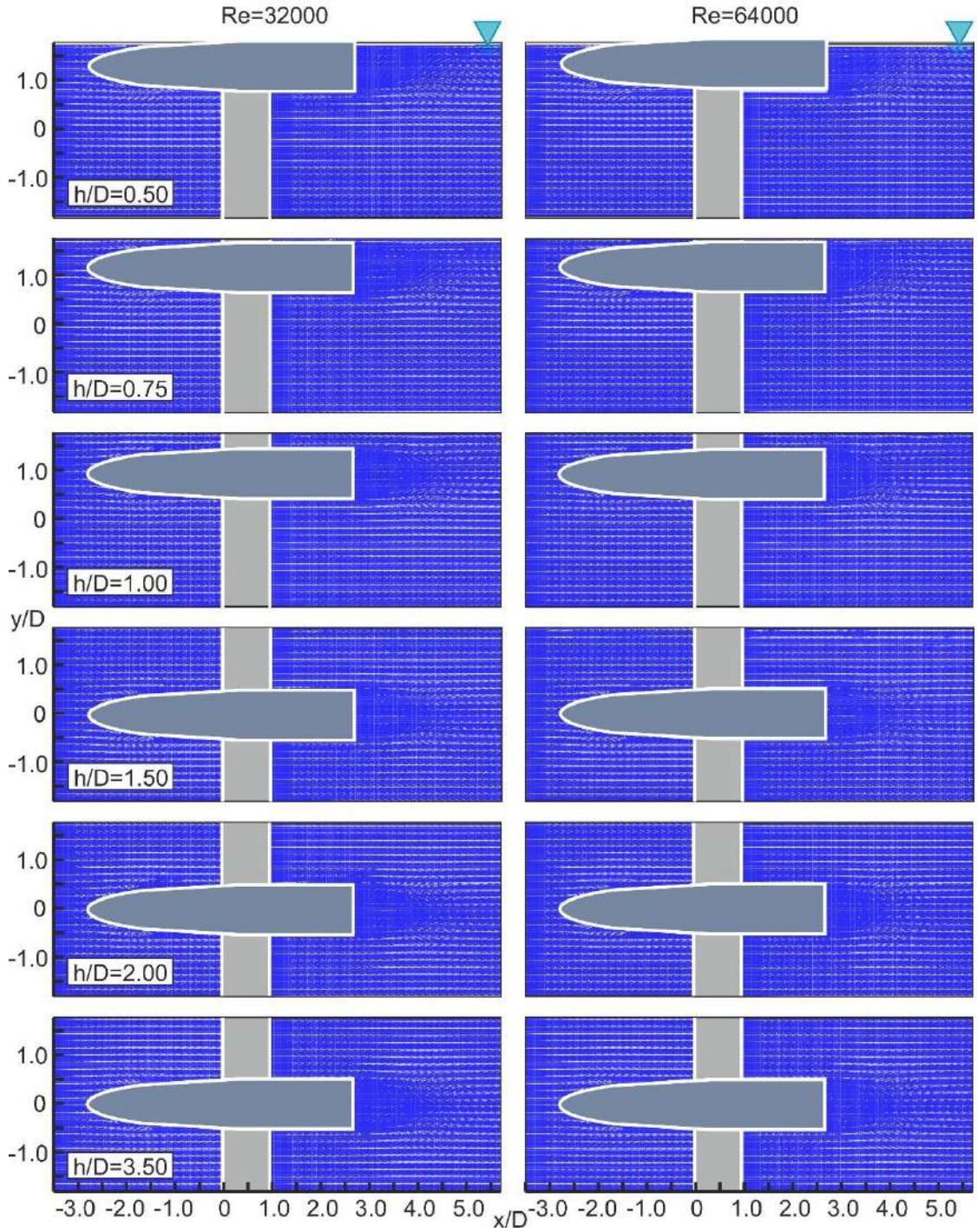
Serbest yüzey etkisi $h/D=0.50$ ve 0.75 değerleri için simetrik bir zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi $\langle u'v'/U_\infty^2 \rangle$ dağılımının oluşmasını engellemiştir. Öyle ki sadece alt kayma tabakasının gelişmesine bağlı olarak $h/D=0.50$ daldırma oranı için, çok düşük şiddetli ve yine çok küçük negatif kontur kümeleri haricinde art izinde tamamen pozitif değerlere sahip Reynolds kayma gerilmeleri kümelenmiştir. Şekilde ancak $h/D=0.50$ ve 0.75 daldırma oranı değerlerinden sonra simetrik bir dağılım görebilmek mümkündür. Aynı serbest yüzey etkisinden dolayı daha üstteki daldırma oranı daha düşük bölgelerde, Reynolds kayma gerilmesi maksimum ve minimum değerlerinin mutlak değer olarak daha yüksek elde edildiği görülmektedir. Reynolds kayma gerilmeleri için, Reynolds değerinin artması da art izinde daha şiddetli konturların görülmesini sağlamıştır. Ayrıca $Re=32000$ değerinde konturlar, $Re=64000$ değerine göre modele daha uzakta oluşmaya başlamış ve daha erken sönümlenmiştir.

Şekil 4.10'da serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji konturları $\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması gösterilmiştir.

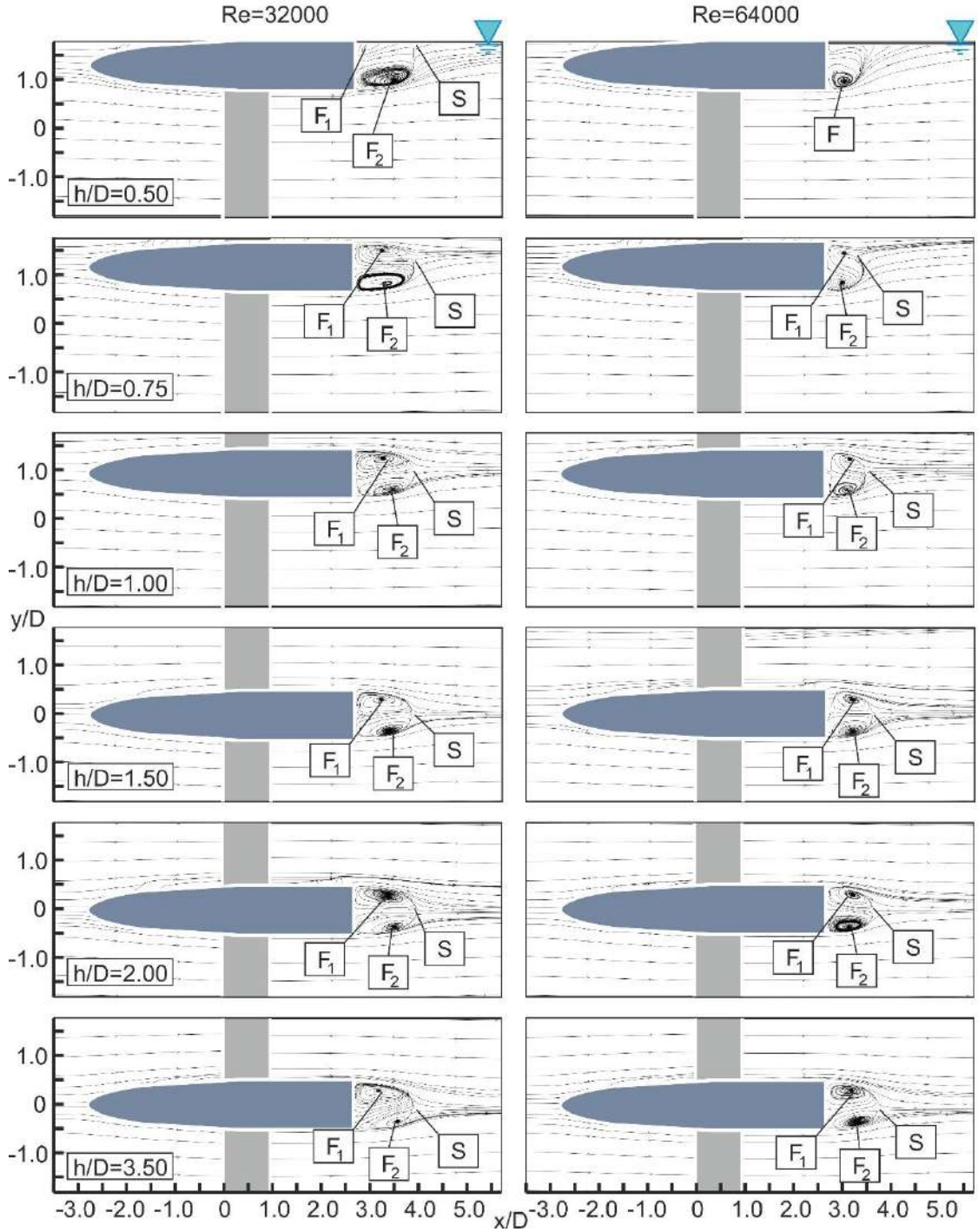
Zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji $\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$ konturları dağılımı için de yine $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ ve $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ çalkantı konturlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. $Re=32000$ için maksimum noktalar serbest yüzeye yakın ya da akışın arka tarafta modelden koptuğu bölgede oluşmuştur. Benzer olarak $Re=64000$ için de maksimum noktaların genel olarak serbest yüzeye yakın bölgelerde olduğu görülmektedir. Simetrik olmayan akış yapısı yine sadece daldırma oranı $h/D=0.50$ ve 0.75 değerlerinde gözlemlenmiş ve daha derin bölgelerde kontur şekilleri simetrik bir şekle kavuşmuştur. Artan Reynolds sayısı ile aynı daldırma oranında konturlar art izinde modele daha yakın oluşmaya başlamış ve daha yüksek maksimum değerlere ulaşılabilmiştir. Kontur şiddetlerinin maksimum değerleri genel itibarıyla daldırma oranının artmasıyla düşmüş ve Reynolds değerinin artmasıyla yükselmiştir. Aynı zamanda bu maksimum değerler her seferinde modele yaklaşık olarak aynı uzaklıktaki bölgede görülmüştür.



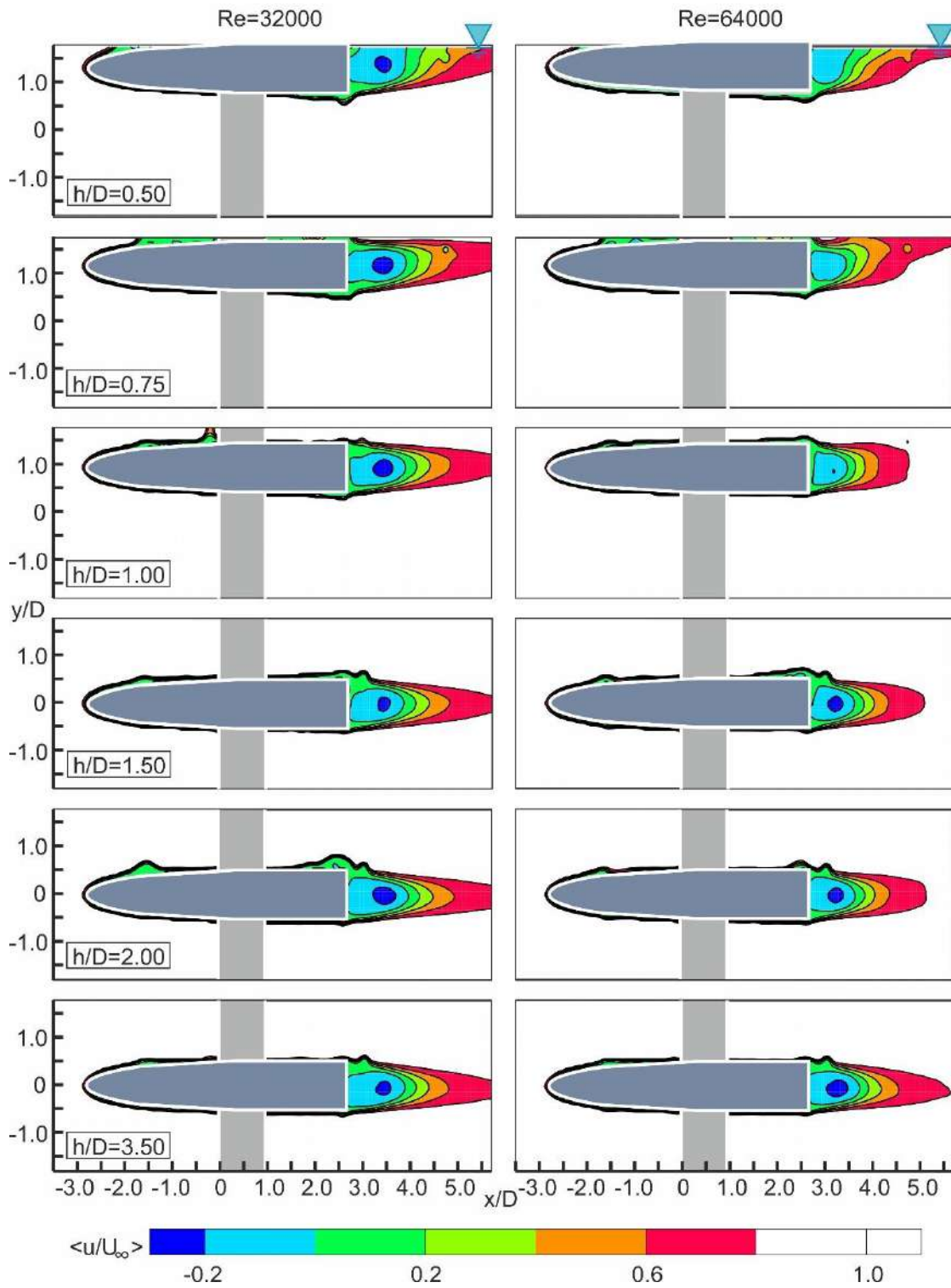
Şekil 4.1 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında eliptik burun (uç) ve küt kuyruk model tasarım çevresindeki akış yapısı etkileri boy/en oranı $L/D=5.5$, hücum açısı ($\alpha=0^\circ$), daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, Reynolds sayısının $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde Rodamine 6G boya ile akış görüntülenme sonuçları



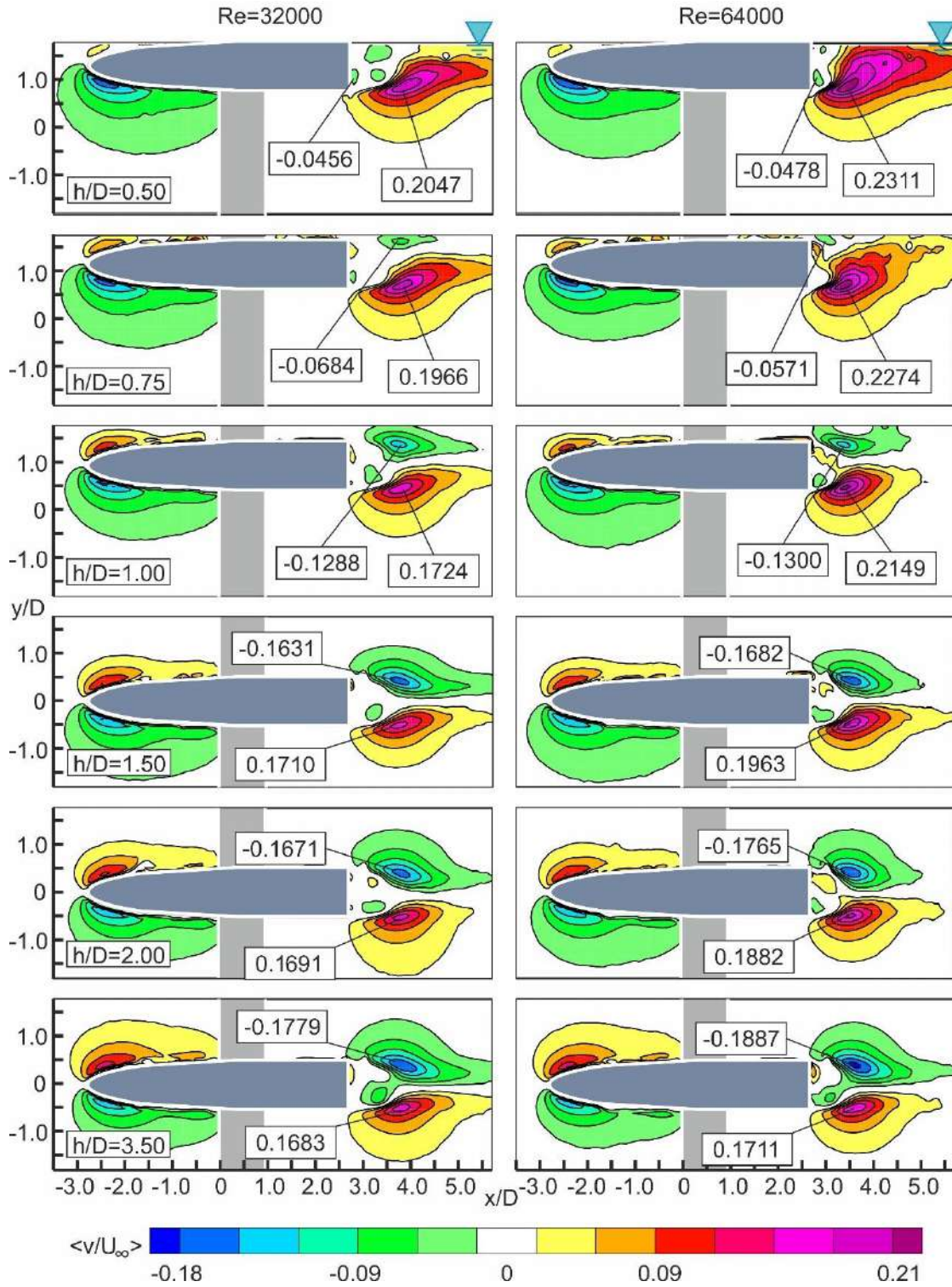
Şekil 4.2 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı hız vektör alanı $\langle V \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



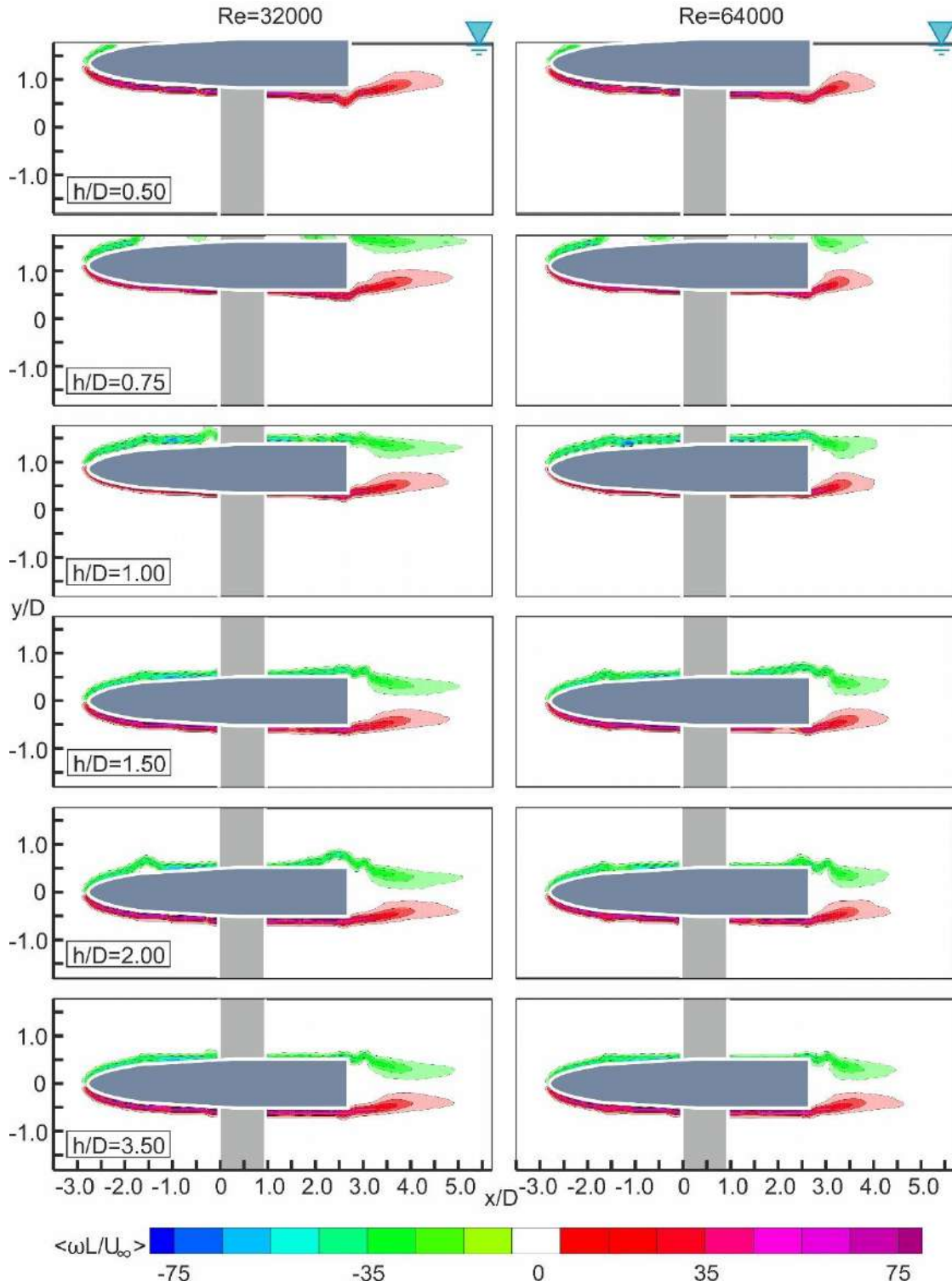
Şekil 4.3 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım çizgileri topolojisi $\langle \Psi \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısının PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



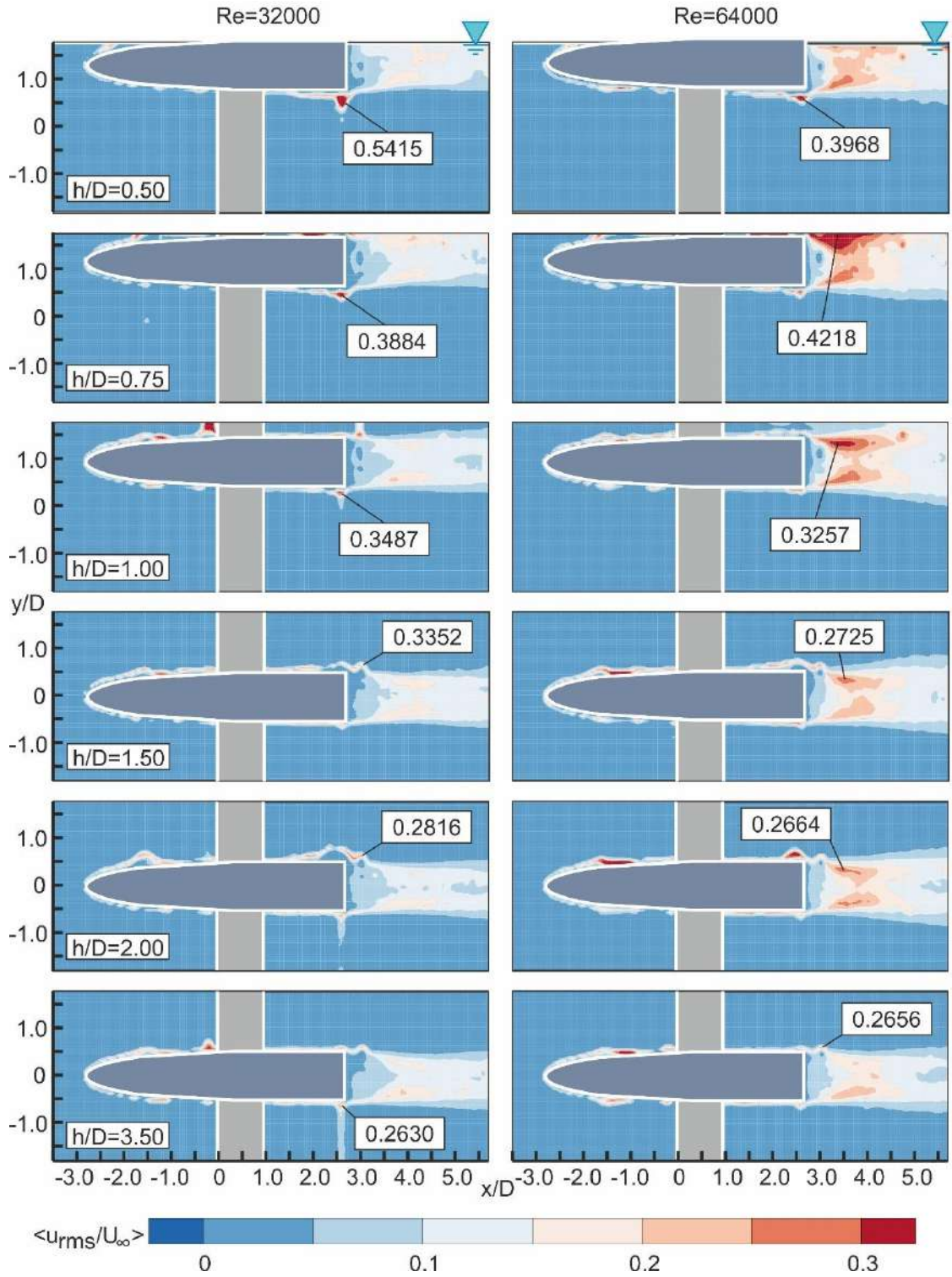
Şekil 4.4 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle u/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısının PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



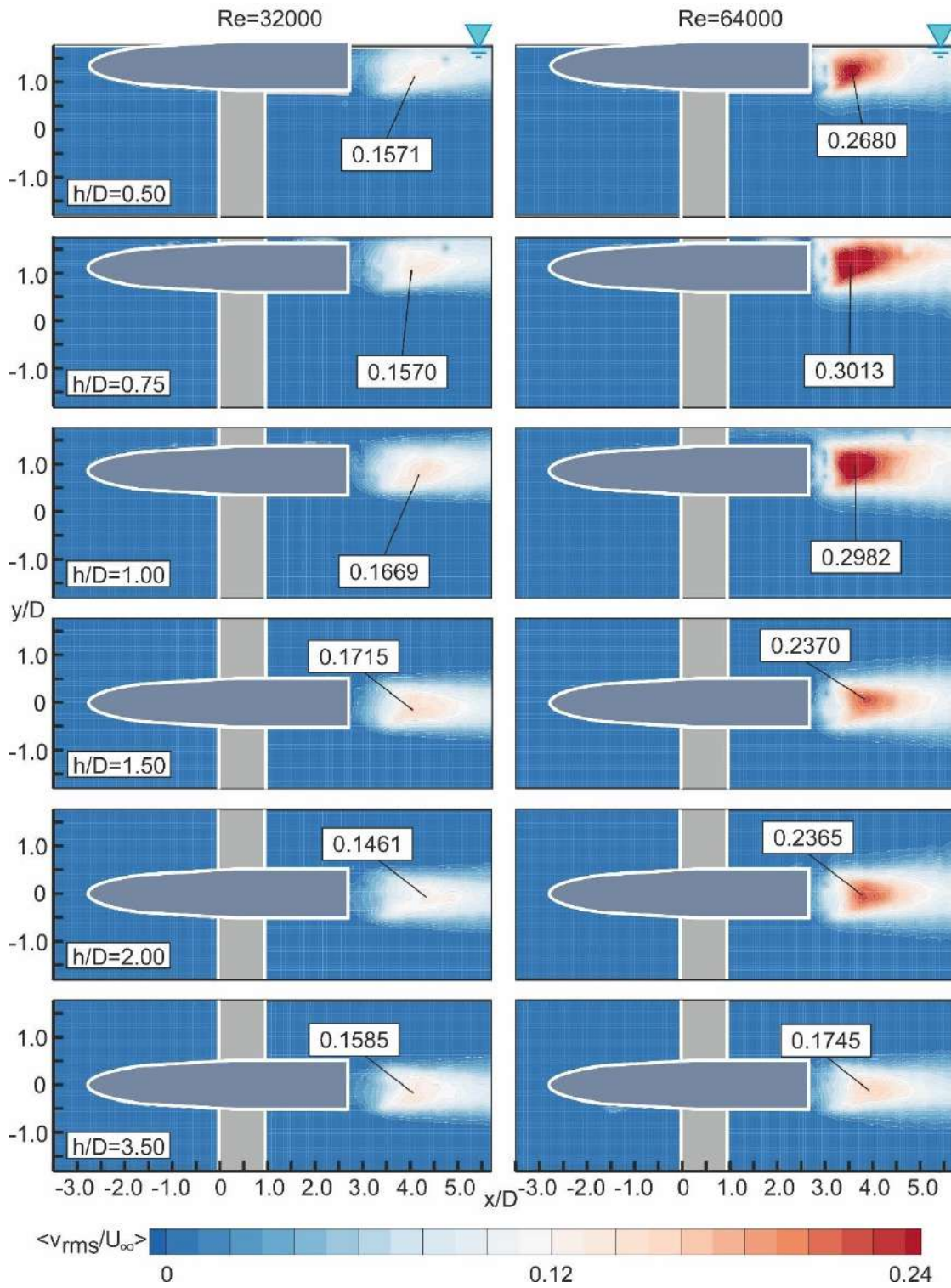
Şekil 4.5 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle v/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



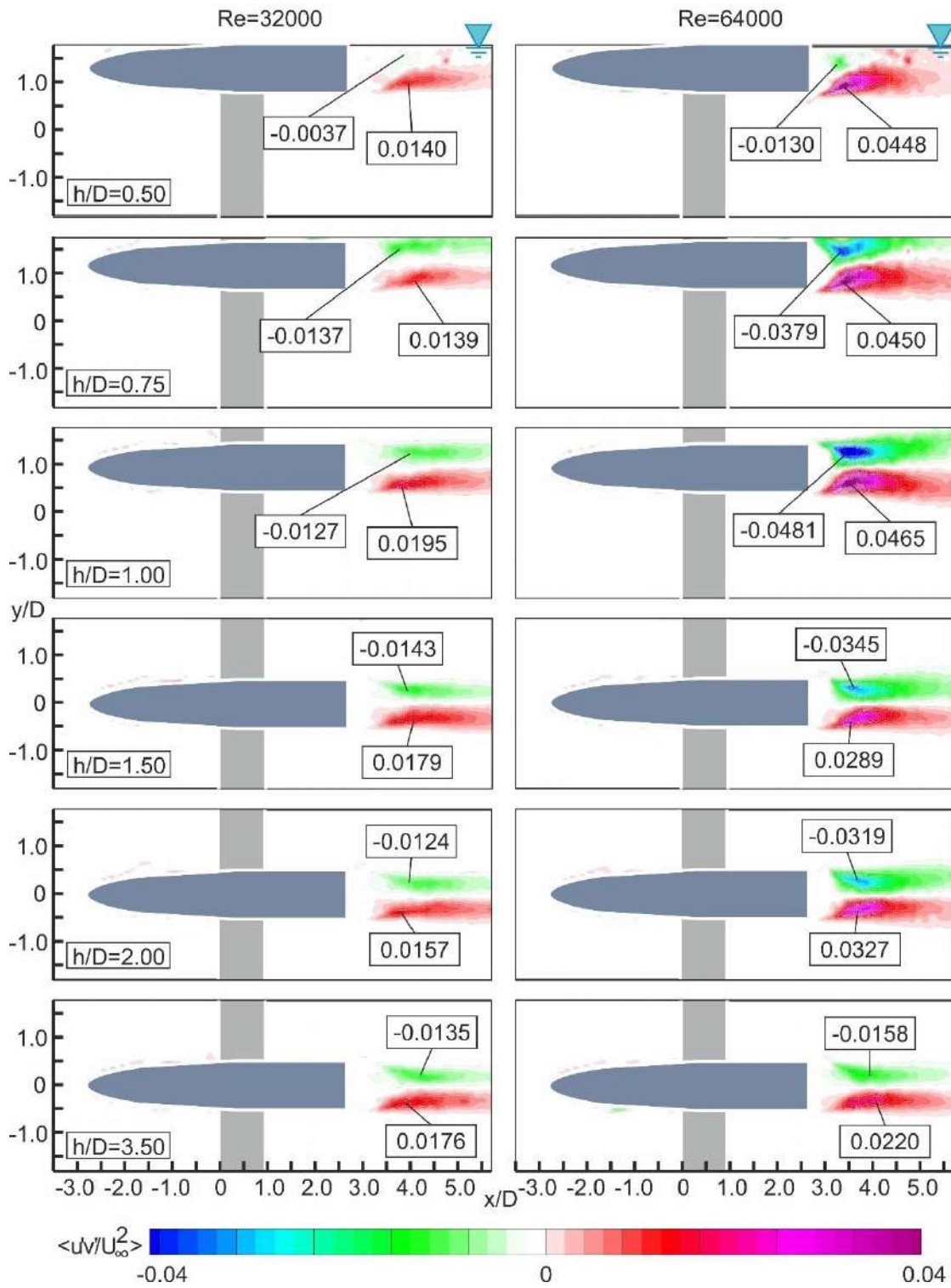
Şekil 4.6 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı girdap konturları $\langle \omega L / U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



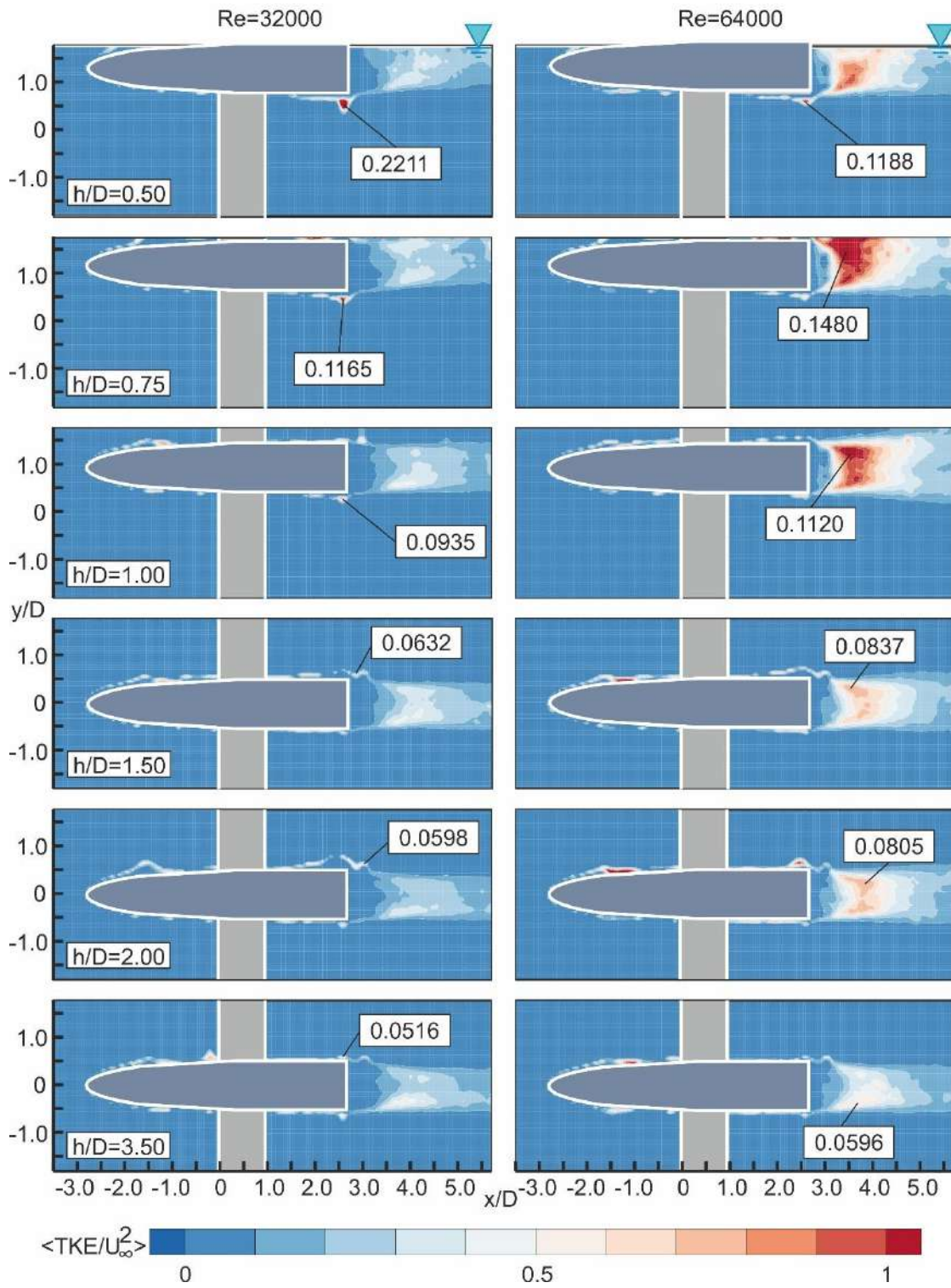
Şekil 4.7 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarımı modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



Şekil 4.8 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



Şekil 4.9 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi kontur dağılımları $\langle u'v'/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



Şekil 4.10 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji konturları $\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması

4.1.2. Hücüm Açısı Değişiminin İncelenmesi

Şekil 4.11 ile Şekil 4.37 arasında, 220 mm uzunluğundaki yarı-eliptik burunlu modelin $Re=32000$ ve 64000 değerleri ve $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ daldırma oranları için $\alpha=4^\circ$, 8° ve 12° hücüm açılarındaki akış karakteristikleri şematize edilmiştir.

Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı hız vektör alanı $\langle V \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması hücüm açısı $\alpha=4^\circ$, 8° ve 12° için sırasıyla Şekil 4.11, Şekil 4.20 ve Şekil 4.29'da gösterilmiştir.

Şekillerde, modelin üst yüzeyinin serbest yüzeye teğet olması durumunun kaybolmasından dolayı art izinin serbest yüzeyeyle direkt etkileşiminin de kaybolduğunu görmek mümkündür. Sonuç olarak art izi, hücüm açısı yönünde kaymıştır. Bu da art izindeki ters vektörlerin, art izinin üst kısmına yakın şekilde odaklanmasına sebep olmuştur.

Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım çizgileri topolojisi $\langle \Psi \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması hücüm açısı $\alpha=4^\circ$, 8° ve 12° için sırasıyla Şekil 4.12, Şekil 4.21 ve Şekil 4.30'te gösterilmiştir.

Elde edilen söz konusu şekillere göre hücüm açısının artması ile art izi, hücüm açısı yönüne kaymaya başlamıştır. Dolayısıyla hücüm açısının sıfır olduğu durumda gözlemlenebilen simetrik art izini gözlemek mümkün değildir. Bu yüzden de genel olarak ikişer tane olan odak noktası (F) sayısı, art izinin yukarı kısmında oluşacak şekilde birer adete düşmüştür. Aynı şekilde, $h/D=0.50$ ve 0.75 daldırma oranlarındaki art izinin serbest yüzeyeyle direkt etkileşimi de yok olmuştur. Hücüm açısının, modelin ön kısmındaki akım çizgileri topolojisi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Yalnızca, 8° ve 12° hücüm açılarında $h/D=1.00$ daldırma oranı için modelin burun kısmının serbest yüzeyeyle etkileşim halinde olduğunu görmek mümkündür. Fakat Reynolds sayısının 32000 'den 64000 'e çıkarılmasıyla bu etkileşimin azaldığı görülmüştür. Serbest yüzey etkisinin de daldırma oranı $h/D \geq 1.50$ değerleri için etkisinin kaybolduğu söylenebilir. Ayrıca modelin üst kayma tabakasında akış ayrılmasının modelin ucuna doğru kaydığı da açıkça görülmektedir. Doğal olarak bu bölgelerde, özellikle $\langle u/U_\infty \rangle$ zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni kontur dağılımları

şemasına (Şekil 4.31) da bakarak, ters akış ve ayrılma baloncukları oluştuğunu söylemek mümkündür. Bunlarla birlikte, hücum açısının 0 olduğu durumdaki ile benzer şekilde, $Re=64000$ değeri için art izindeki ters akış bölgelerinin, yoğun momentum iletiminden kaynaklı olarak şekillerdeki bütün daldırma oranları için $Re=32000$ değerinde aynı daldırma oranındaki ters akış bölgesine göre daha küçük olduğu gözlemlenmiştir.

Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni kontur $\langle u/U_\infty \rangle$ (Şekil 4.13, 4.22 ve 4.31) ve akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni kontur $\langle v/U_\infty \rangle$ (Şekil 4.14, 4.23 ve 4.32) dağılımları değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açıları $\alpha=4^\circ$, 8° ve 12° ve $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması yapılmıştır.

Şekil 4.13, 4.22 ve 4.31'e bakarak, hücum açısının artmasıyla birlikte art izi bölgesindeki ters akış bölgelerinin büyüdüğünü ve şiddetlendiğini söylemek mümkündür. Söz konusu şekillerin sol ve sağ kolonlarına bakınca, benzer etkinin Reynolds sayısının 32000'den 64000'e çıkarılması yoluyla da oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde de $h/D \leq 1.00$ daldırma oranı değerleri için modelin burnunun ve burun etrafındaki akışın serbest yüzeyle direkt etkileşim halinde olduğu açıktır. Ayrıca artan hücum açısıyla birlikte modelin üst kayma tabakasında akış ayrılmasının modelin ucuna doğru kaydığı ve bu bölgelerde ayrılma baloncukları oluştuğu söylenebilir. Yine, daldırma oranının arttığı $h/D \geq 1.50$ bölgesi için serbest yüzey etkisinin ciddi oranda azaldığı görülmektedir.

Şekil 4.14, 4.23 ve 4.32'deki $\langle v/U_\infty \rangle$ zaman ortalamalı akım yönüne dik boyutsuz hız kontur dağılımları, artan hücum açısıyla birlikte modelin burun bölgesindeki ve art izindeki simetrisinin tamamen yok olduğunu göstermektedir. Modelin burun bölgesindeki ve art izindeki pozitif değere sahip hız konturlarının, hücum açısının 12° 'ye ulaşmasıyla neredeyse sıfırlandığı açıkça görülmektedir. Aynı şekilde, akış yönünün hücum açısı yönünde kaymasından kaynaklı olarak negatif kontur değerleri de hücum açısı arttıkça şiddetlenmiştir. Artan Reynolds değeriyle daha şiddetli fakat daha küçük ve modele daha yakın kontur bölgeleri oluşmuştur.

Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı girdap konturları $\langle \omega L/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açıları $\alpha=4^\circ$, 8° ve 12° ve $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması sırasıyla Şekil 4.15, 4.24 ve 4.33'te sunulmuştur.

Şekillerde zaman ortalamalı girdap konturları, artan hücum açısı yönünde yönelme göstermiştir. $h/D=0.50$ ve 0.75 daldırma oranları için modelin burun ucunda serbest yüzeye direkt temas olduğu için o bölgelerde kontur oluşumu engellenmiştir, fakat benzer şekilde $h/D=1.00$ değeri için de burnun serbest yüzeye yaklaşmasından dolayı o bölgedeki akış tamamen serbest yüzey etkisinde oluşmuştur. Daldırma oranı $h/D=1.50$ değerinden itibaren daha derin bölgelerde ise serbest yüzey etkisini yitirmiştir. Reynolds değerinin artması, girdap konturlarının art izine uzanma miktarını azaltmıştır.

Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ (Şekil 4.16, 4.25 ve 4.34) ve akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ (Şekil 4.17, 4.26 ve 4.35) dağılımları değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ, 8^\circ$ ve 12° ve $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması sunulmuştur.

Zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları, artan hücum açısıyla birlikte, daha şiddetli değerlere ulaşarak daha yoğun kontur bölgeleri oluşturmuşlardır. Yine, daha düşük açılarda kontur kümelerinin maksimum değerleri, genel itibarıyla akışın arka tarafta modelden koptuğu bölgede oluşmaya yatkınken; hücum açısı yükseldikçe kopma bölgesindeki yoğun noktalar art izine kayarak, maksimum değerler tamamen art izinde görülmeye başlanmıştır. Reynolds sayısındaki artış da benzer şekilde, aynı daldırma oranında daha yüksek değerler ve daha şiddetli konturlar oluşmasına sebep olmaktadır.

Ortalama akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ türbülans çalkantı konturları (Şekil 4.17, 4.26 ve 4.35) için de yaklaşık aynı şeyler söylenebilir: Hücum açısının artması, aynı daldırma oranında daha yüksek maksimum değerlerin oluşmasına, kontur şiddetlerinin artarak daha büyük kontur bölgelerinin oluşmasına sebep olmuştur.

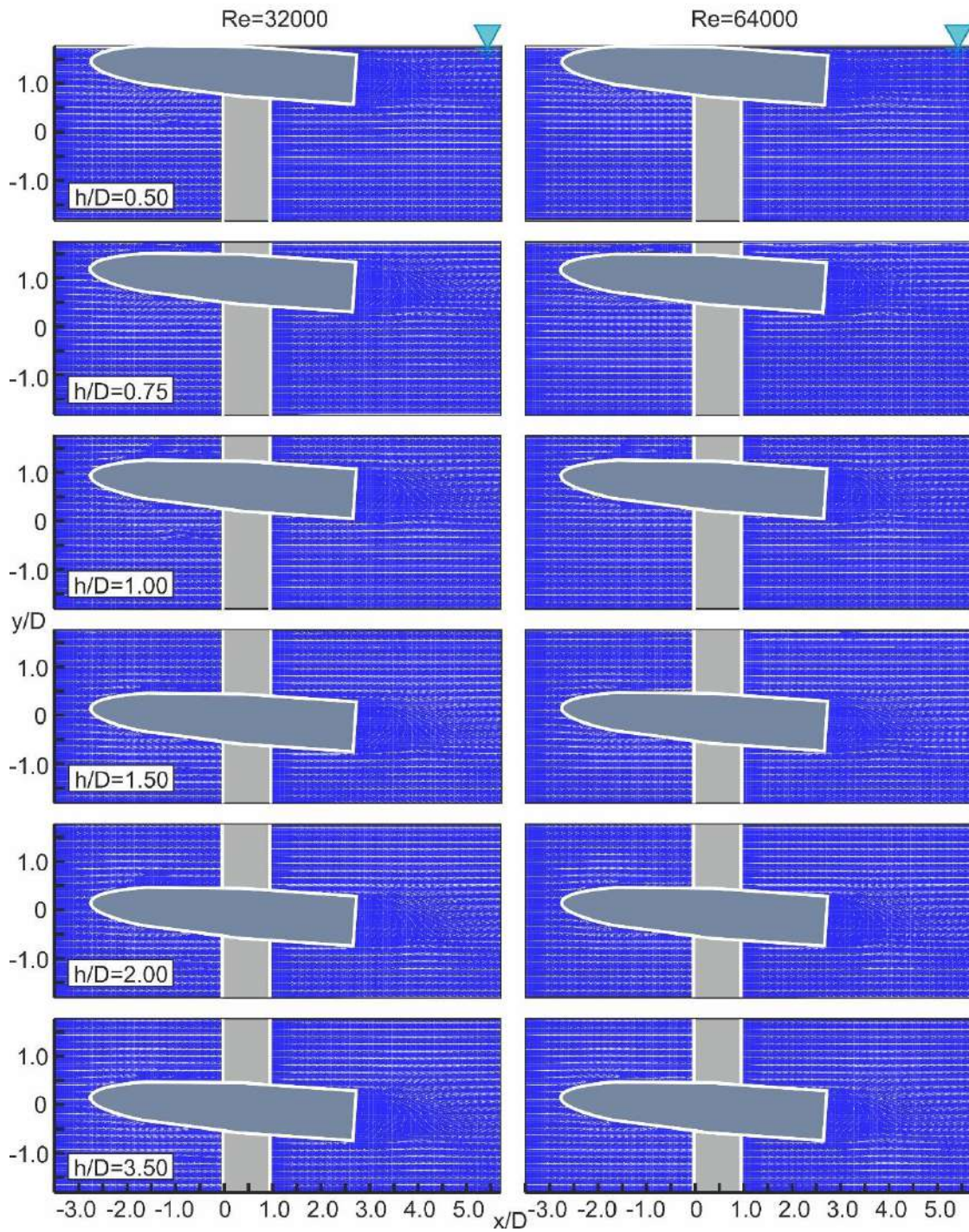
Şekil 4.18, 4.27 ve 4.36'da serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi kontur dağılımları $\langle u'v'/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ, 8^\circ$ ve 12° ve $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılmıştır.

Zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi şemalarına bakıldığında, hücum açısı arttıkça Reynolds kayma gerilmesi maksimum pozitif ve negatif değerlerin de

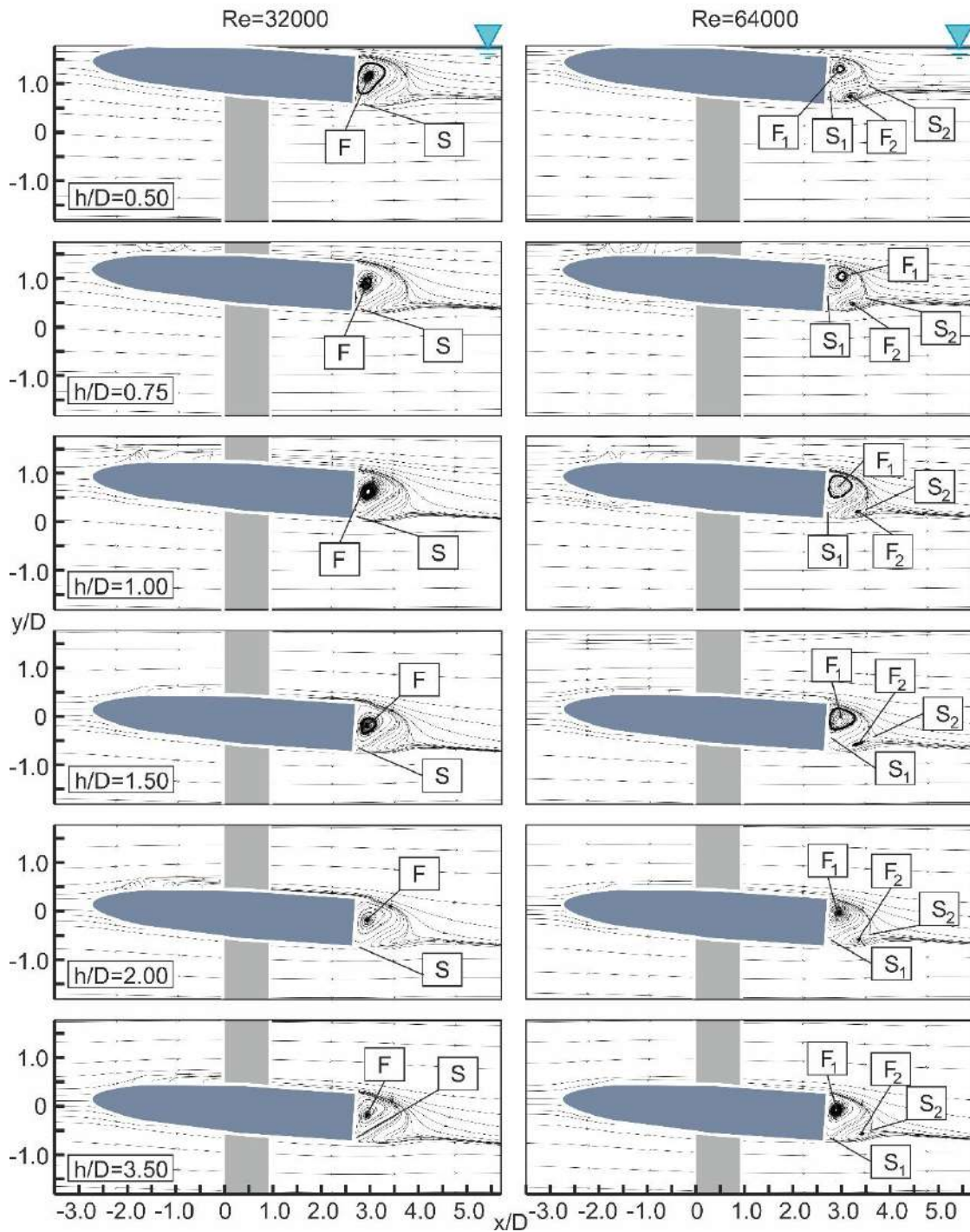
mutlak büyüklüğünün arttığı söylenebilir. Aynı etkiyi Reynolds sayısının artmasıyla da görmek mümkündür.

Şekil 4.19, 4.28 ve 4.37’de serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji konturları $\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ, 8^\circ$ ve 12° ve $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması gösterilmiştir.

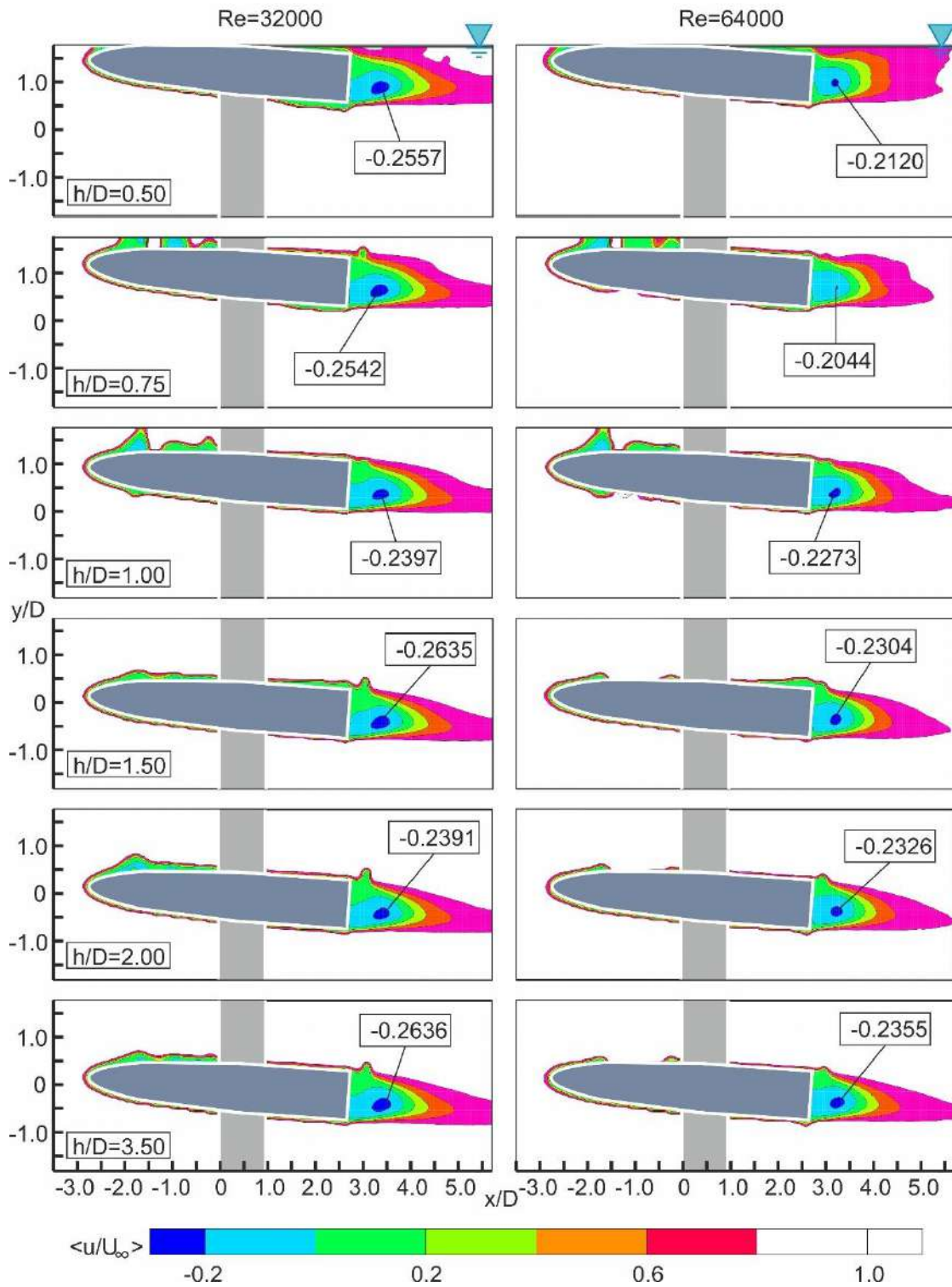
Zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji $\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$ konturları dağılımı için de $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ ve $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ çalkantı konturlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. Artan hücum açısı, art izindeki kontur bölgelerini yoğunlaştırmış ve kontur şiddetlerini artırmıştır, böylece daha yüksek maksimum değerlere ulaşılmıştır. Bunun yanında $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ çalkantı konturlarında da görüldüğü gibi, modelin firar bölgesinde akışın kopmasıyla oluşan maksimum kontur değerleri, daha yüksek açılarda art izindeki maksimum değere oranla daha düşük kalmıştır. Yani TKE kontur dağılımı için hücum açısının artışı, Reynolds sayısının artışına benzer etkiler oluşturmuştur.



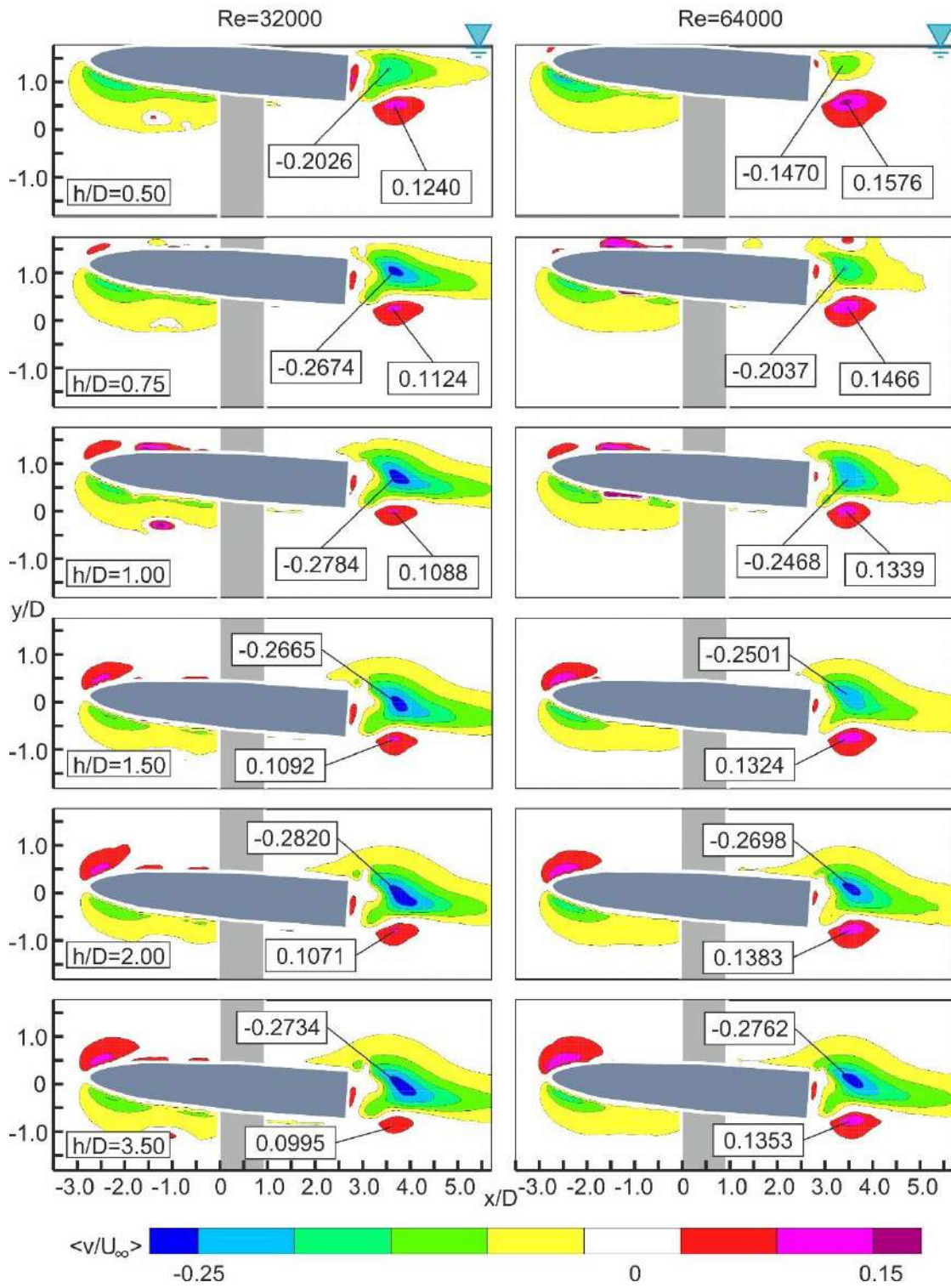
Şekil 4.11 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı hız vektör alanı $\langle V \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



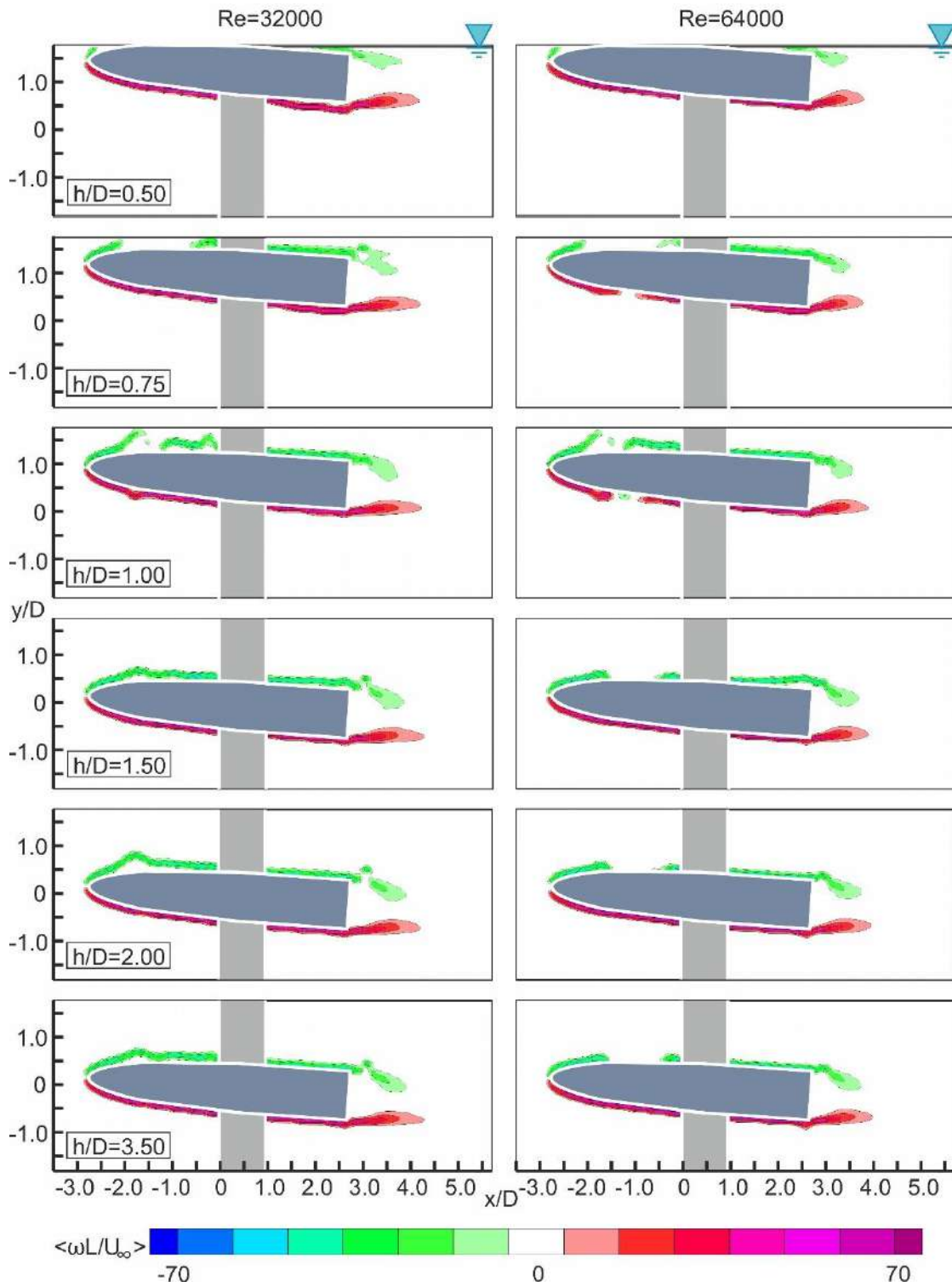
Şekil 4.12 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım çizgileri topolojisi $\langle \Psi \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısının PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



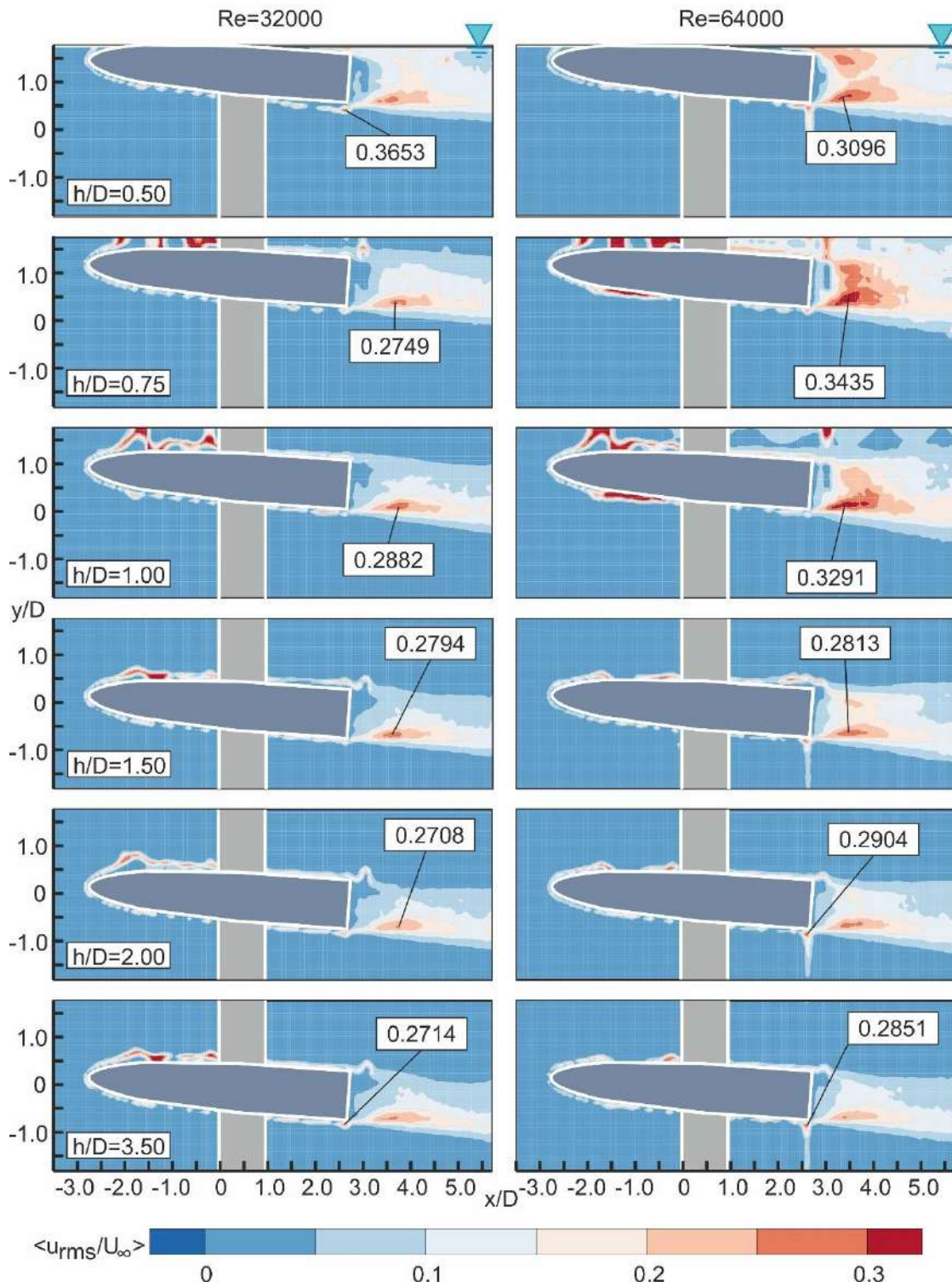
Şekil 4.13 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle u/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



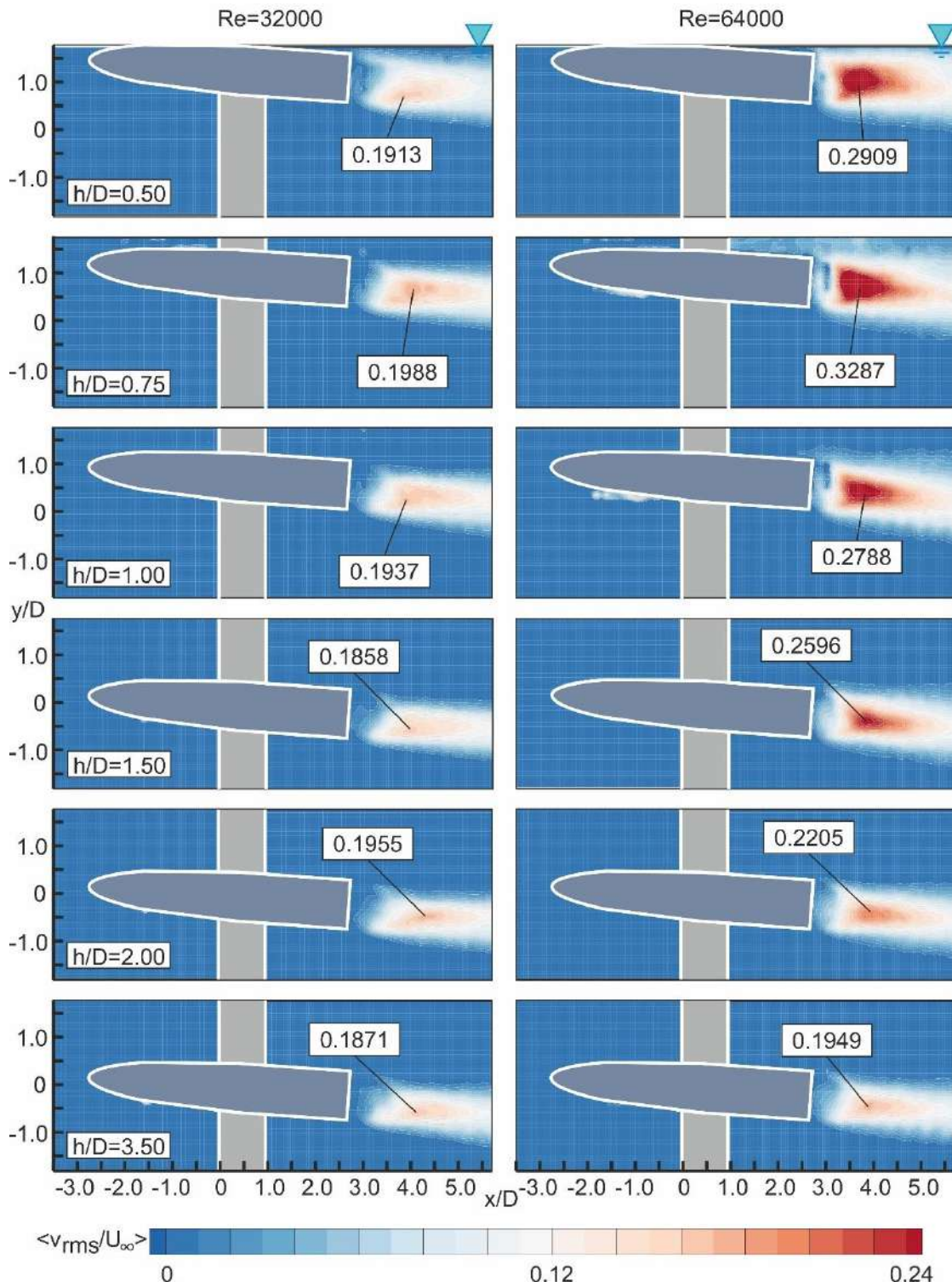
Şekil 4.14 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle v/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısının PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



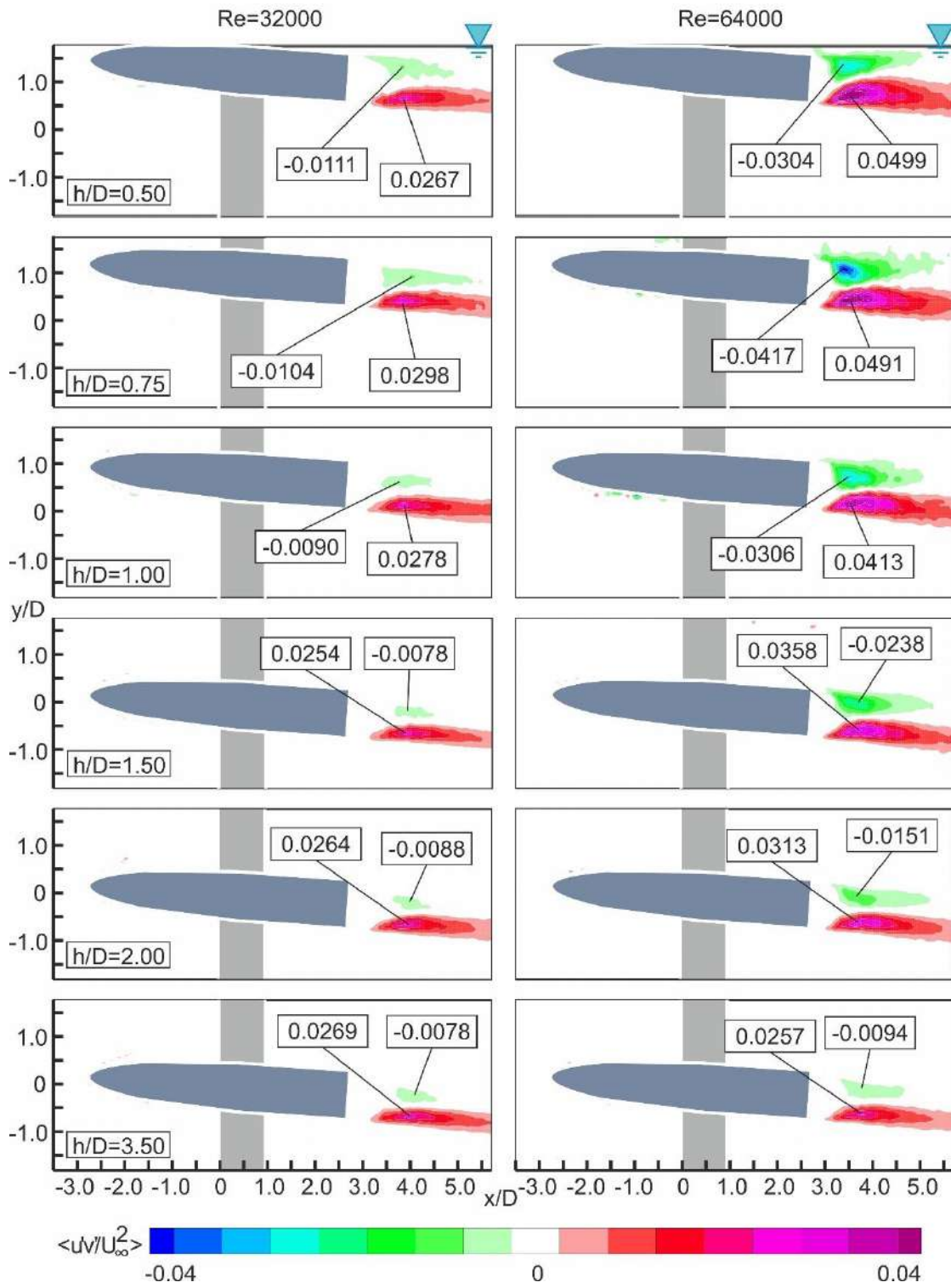
Şekil 4.15 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı girdap konturları $\langle \omega L / U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



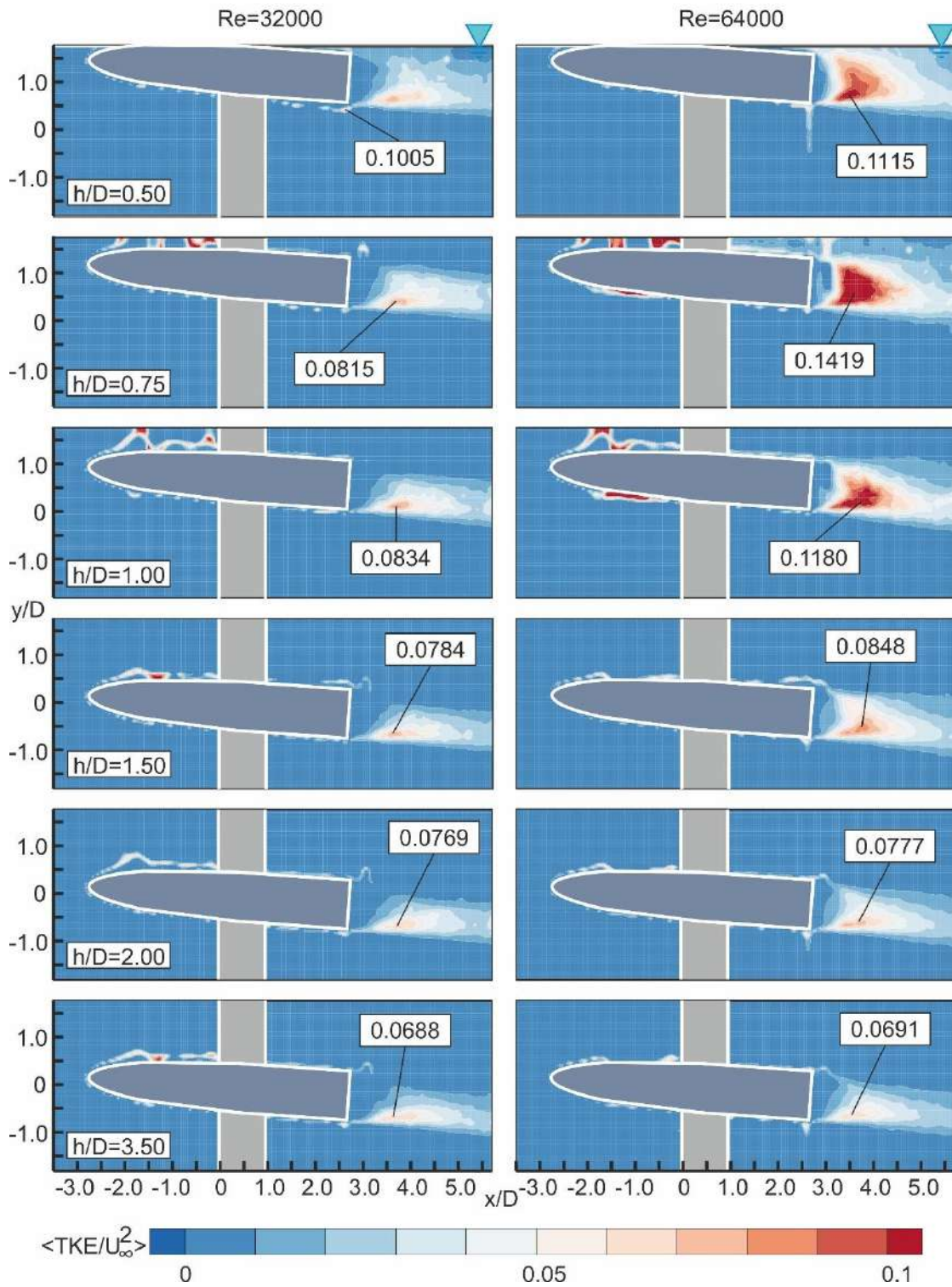
Şekil 4.16 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



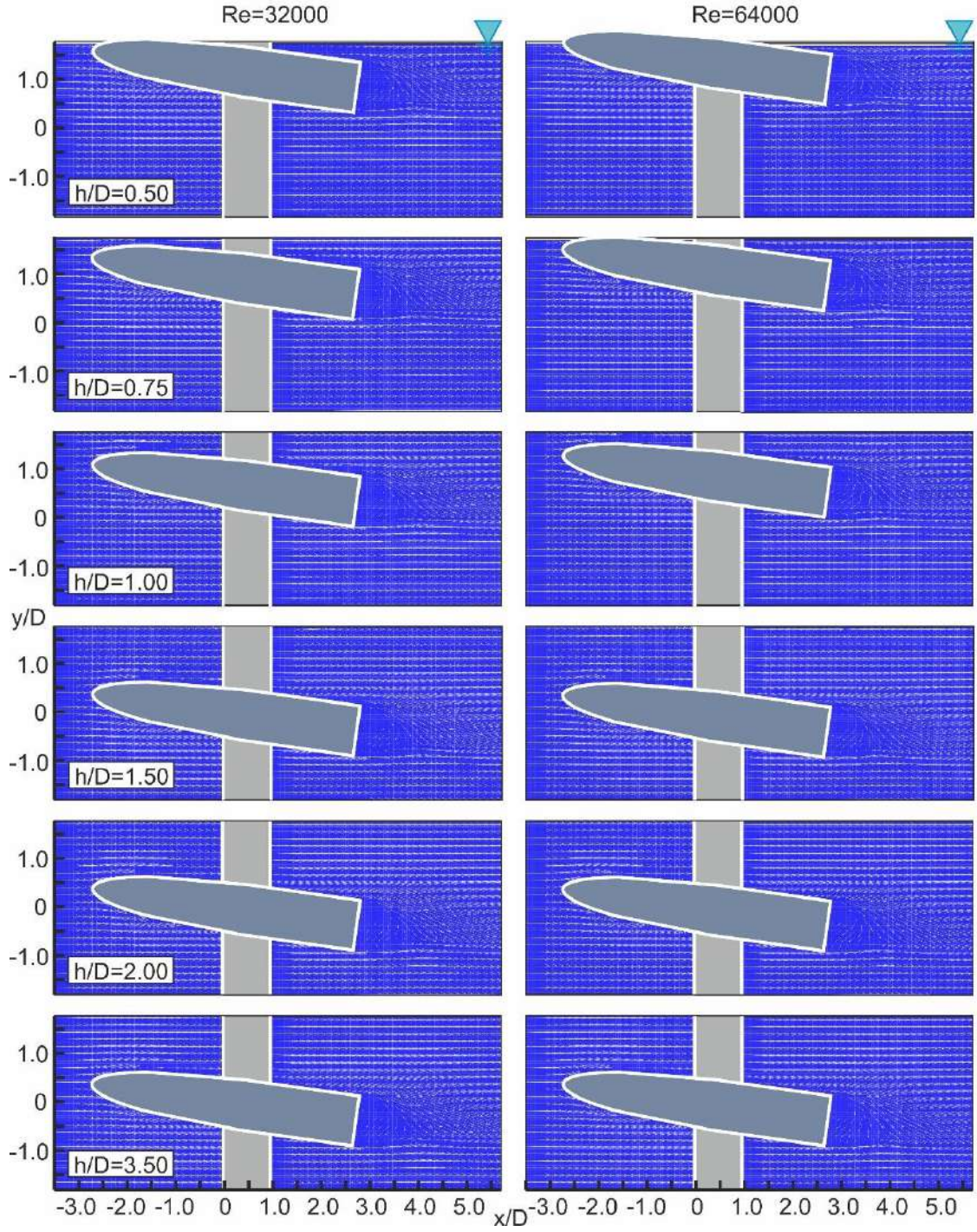
Şekil 4.17 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



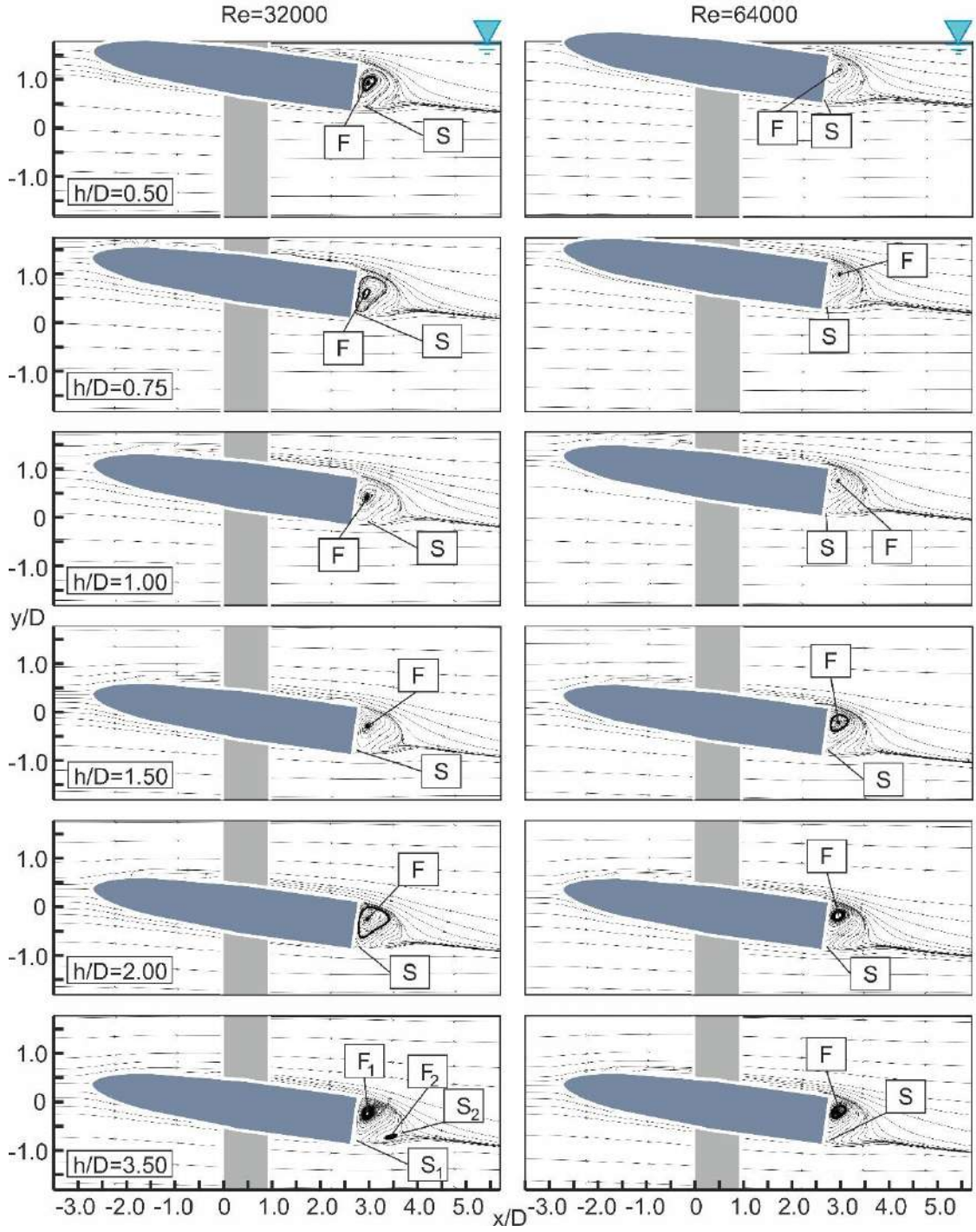
Şekil 4.18 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi kontur dağılımları $\langle u'v' / U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



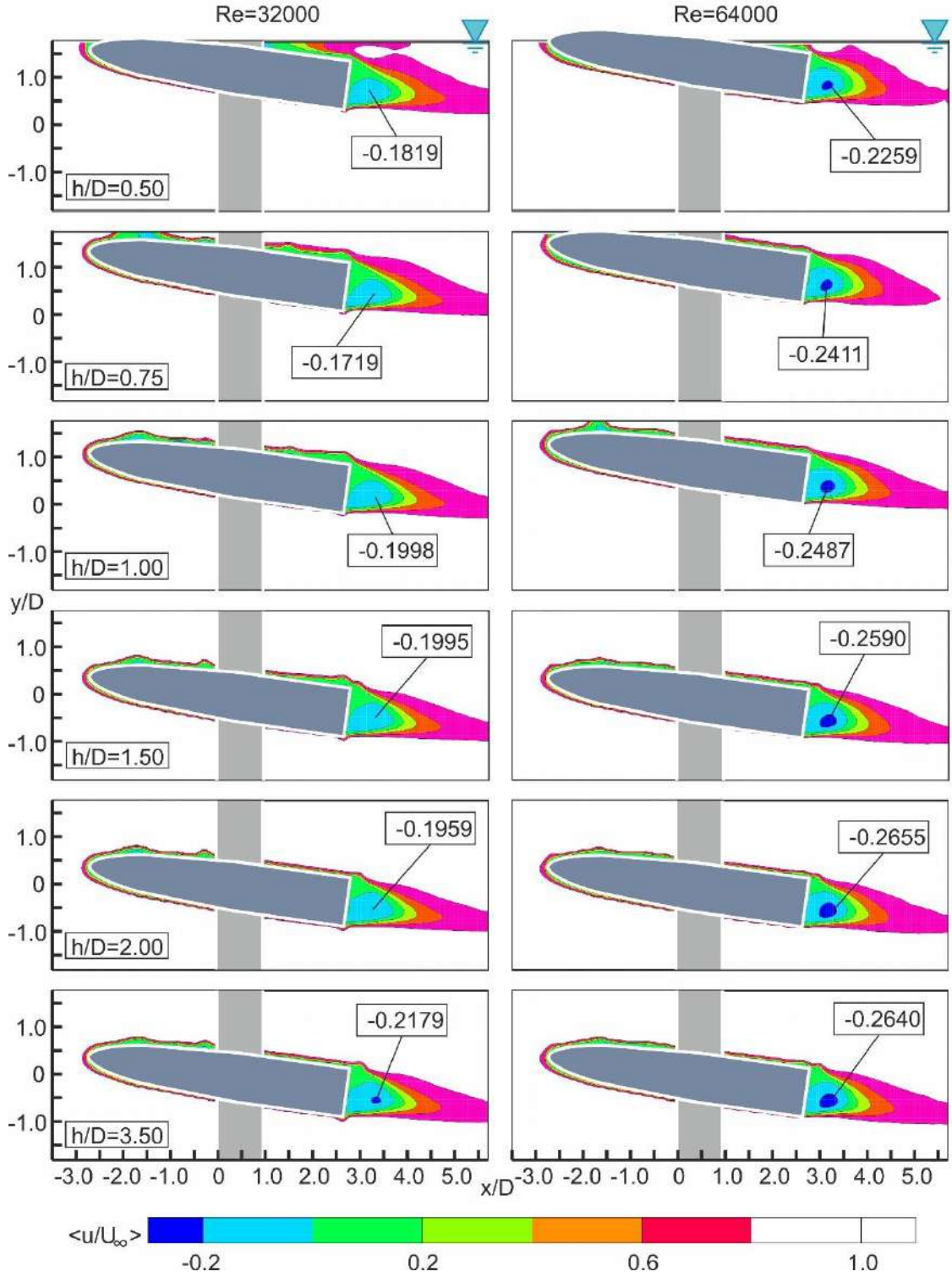
Şekil 4.19 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji konturları $\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=4^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



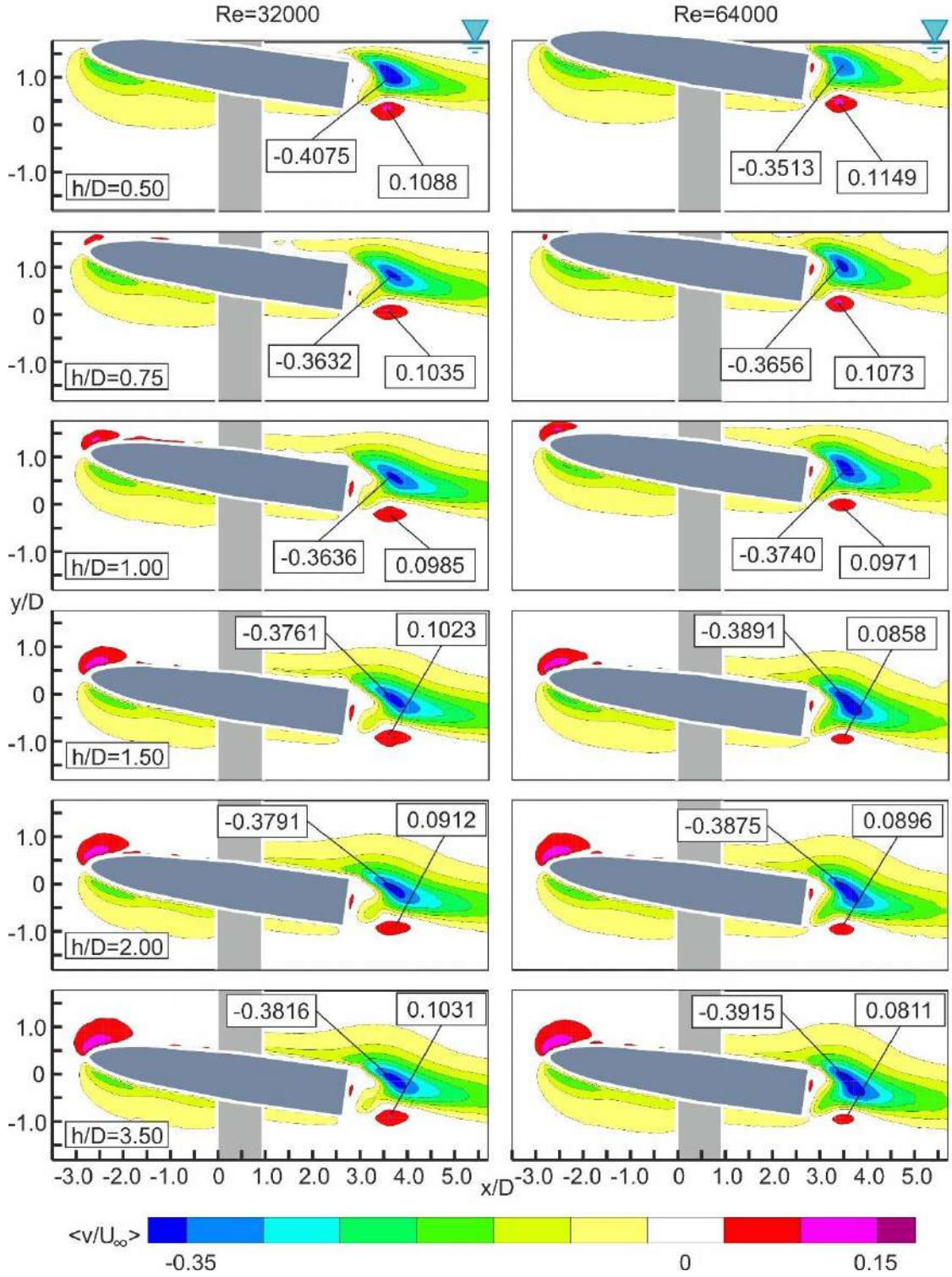
Şekil 4.20 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı hız vektör alanı $\langle V \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



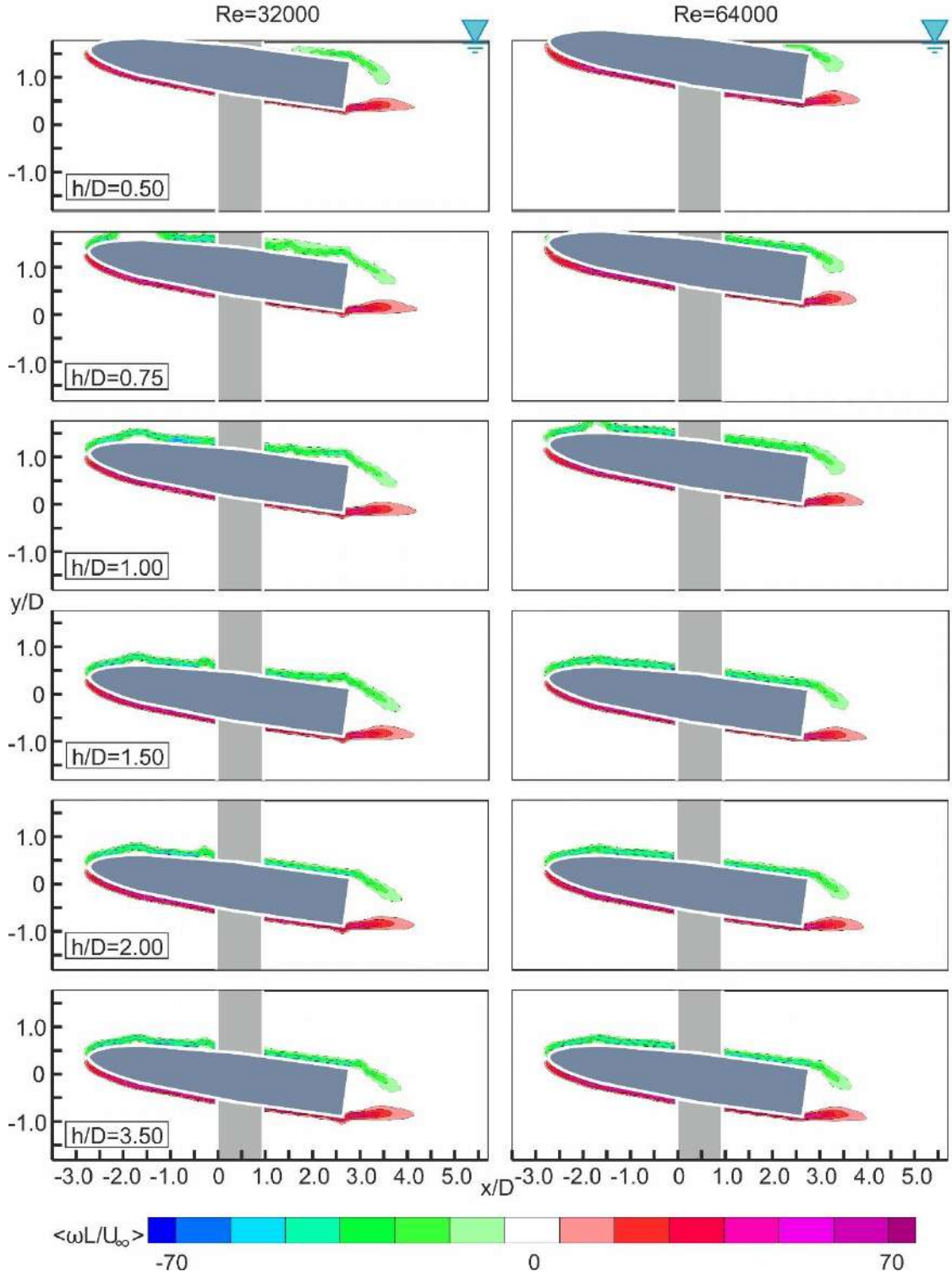
Şekil 4.21 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım çizgileri topolojisi $\langle \Psi \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısının PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



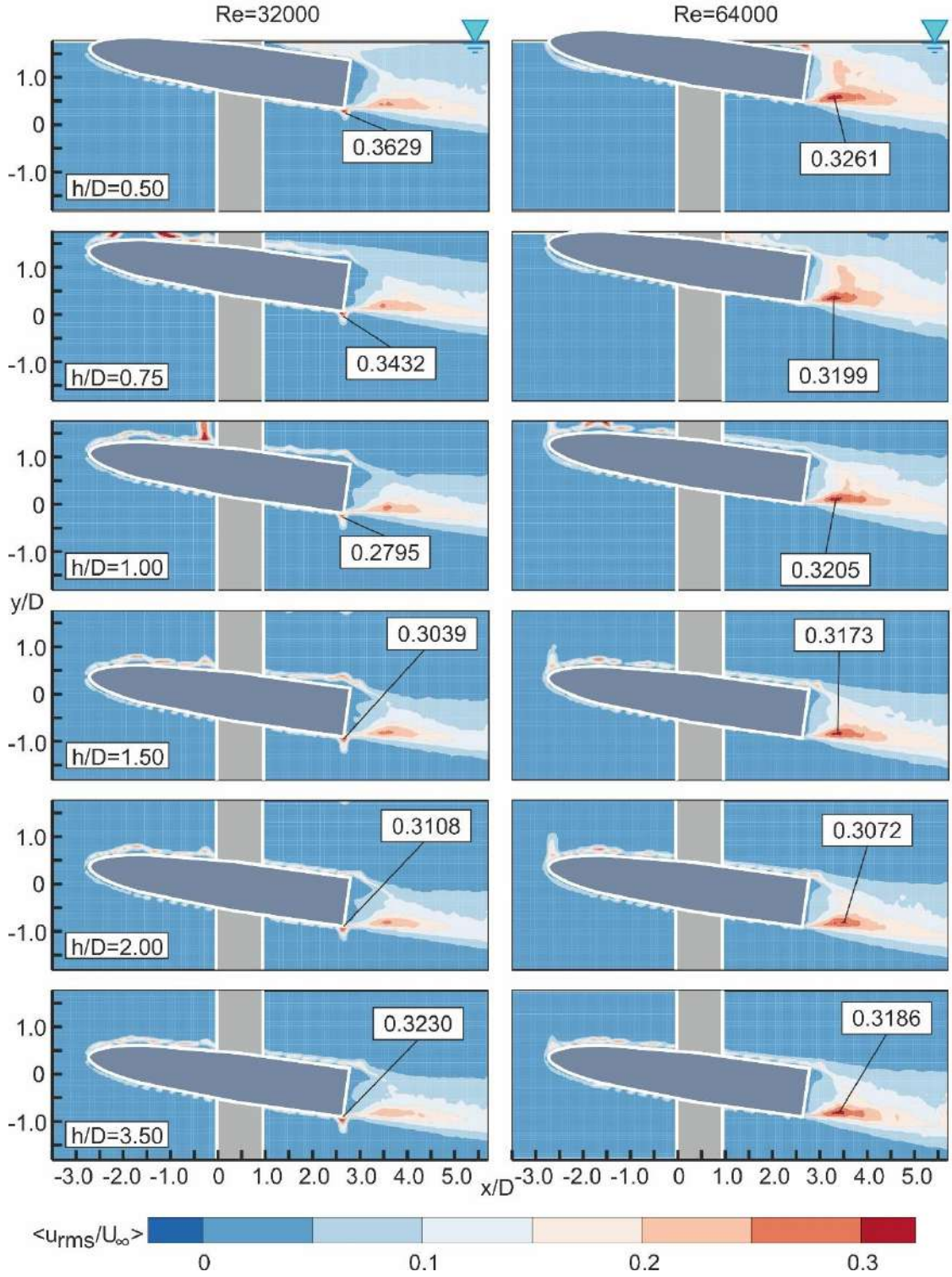
Şekil 4.22 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle u/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısının PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



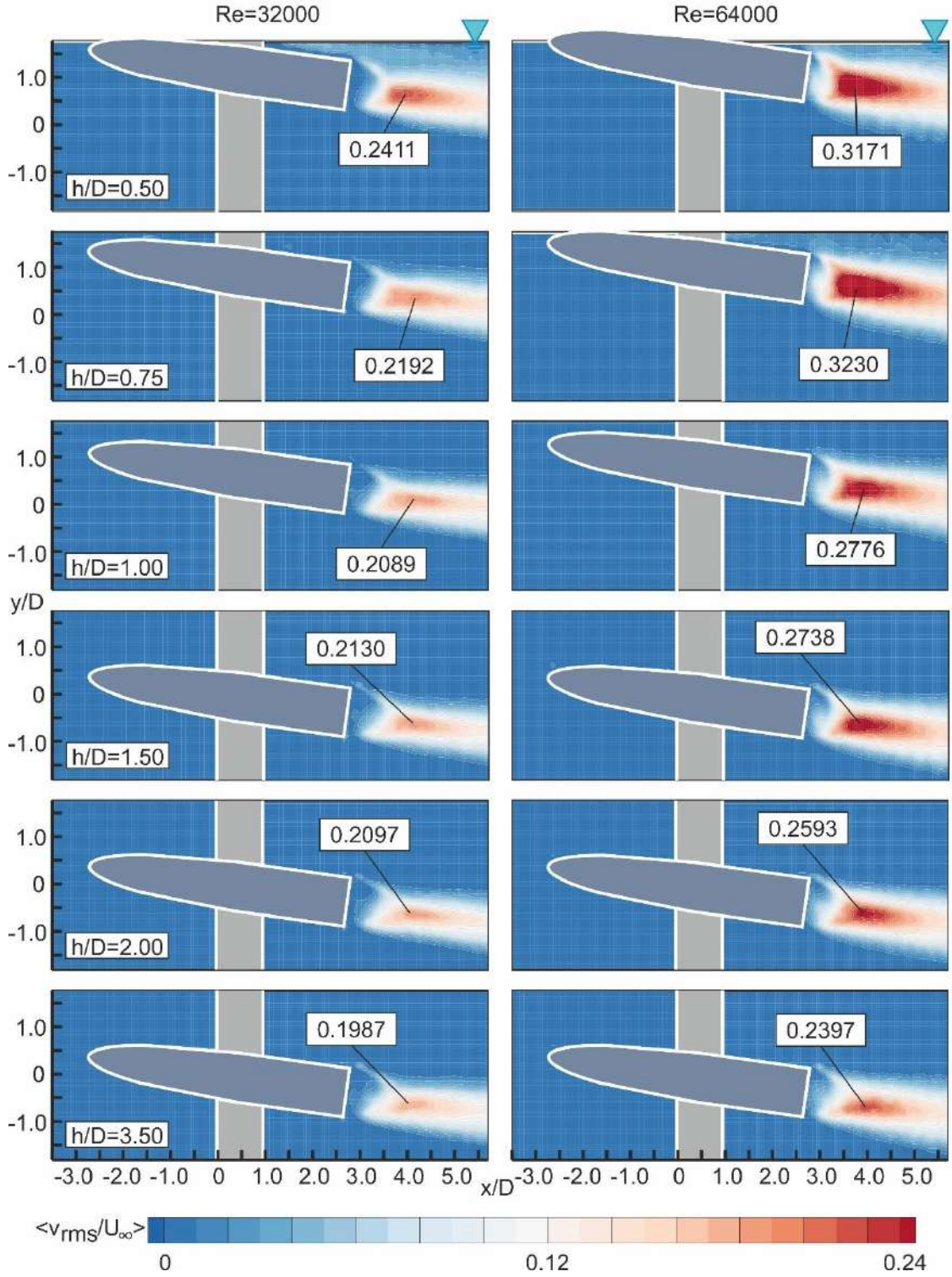
Şekil 4.23 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle v/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısının PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



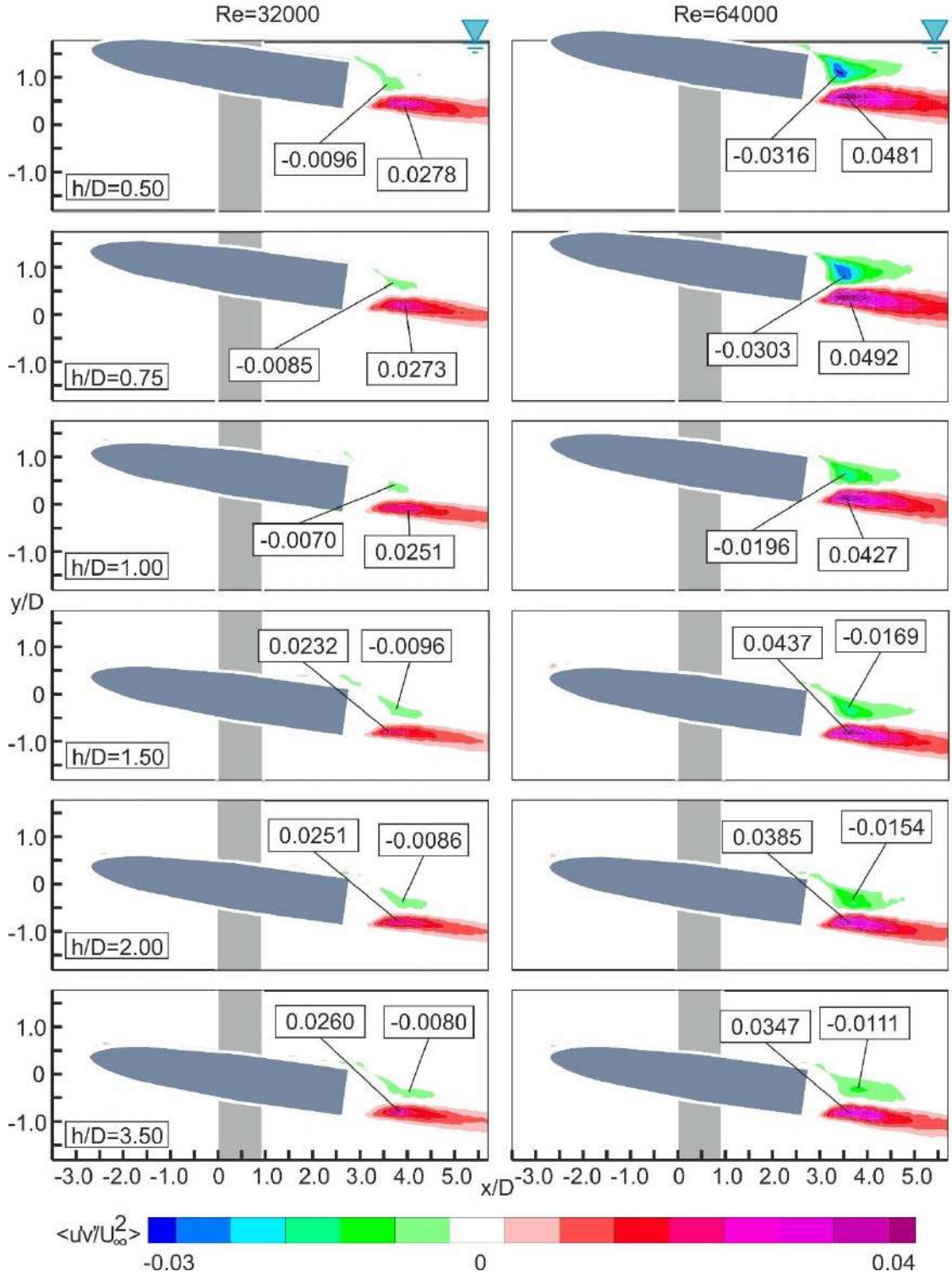
Şekil 4.24 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı girdap konturları $\langle \omega L / U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



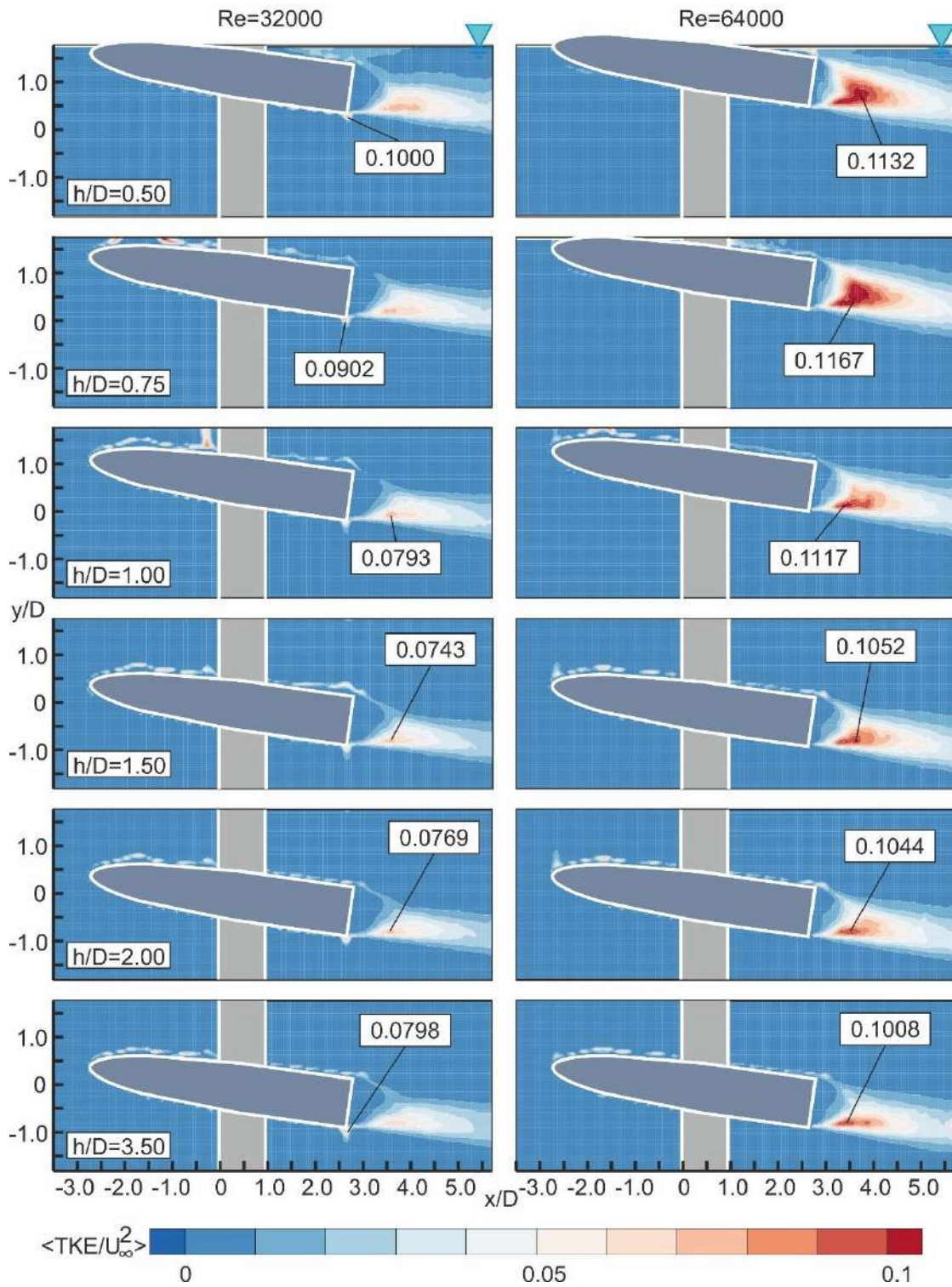
Şekil 4.25 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



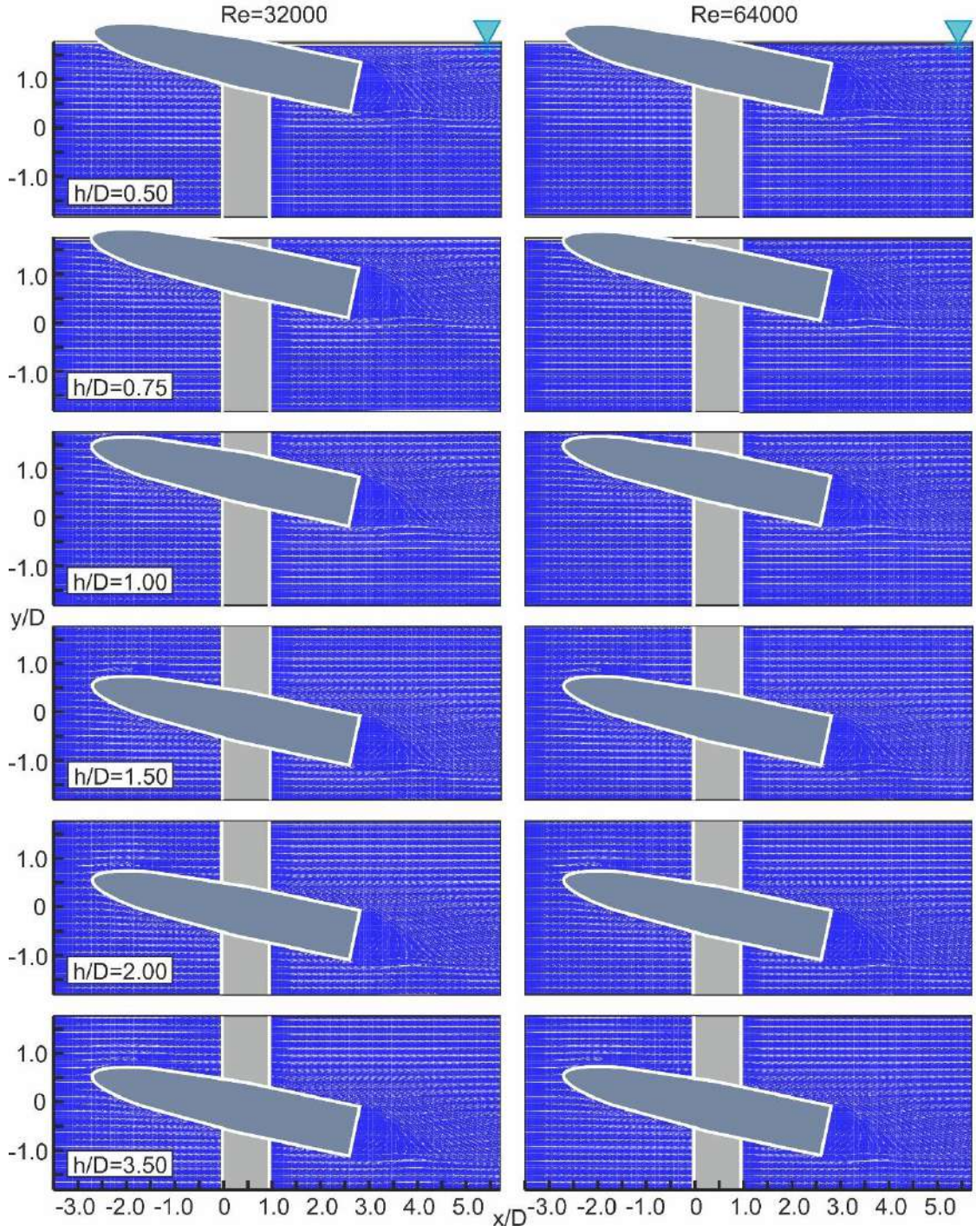
Şekil 4.26 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



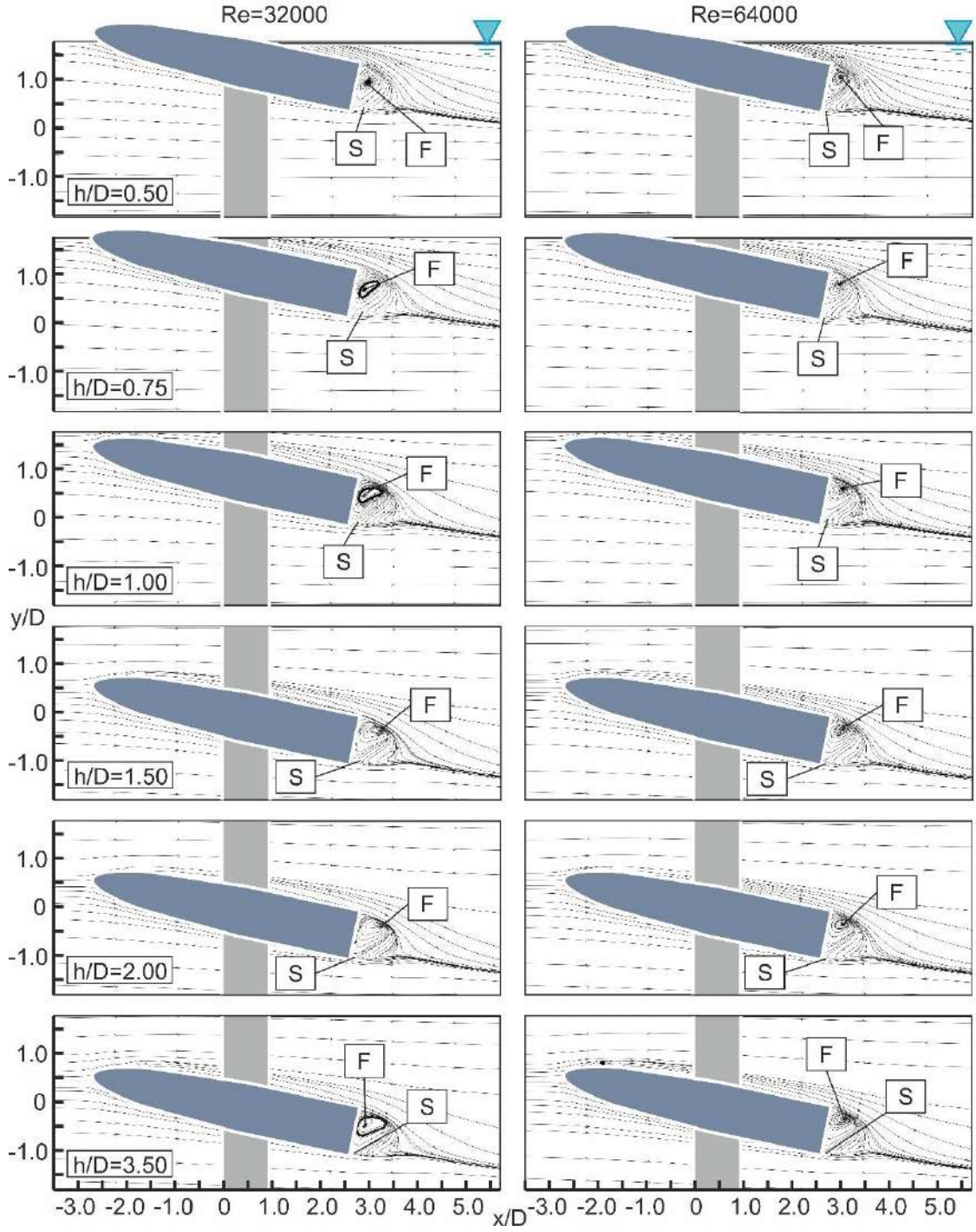
Şekil 4.27 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi kontur dağılımları $\langle u'v'/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



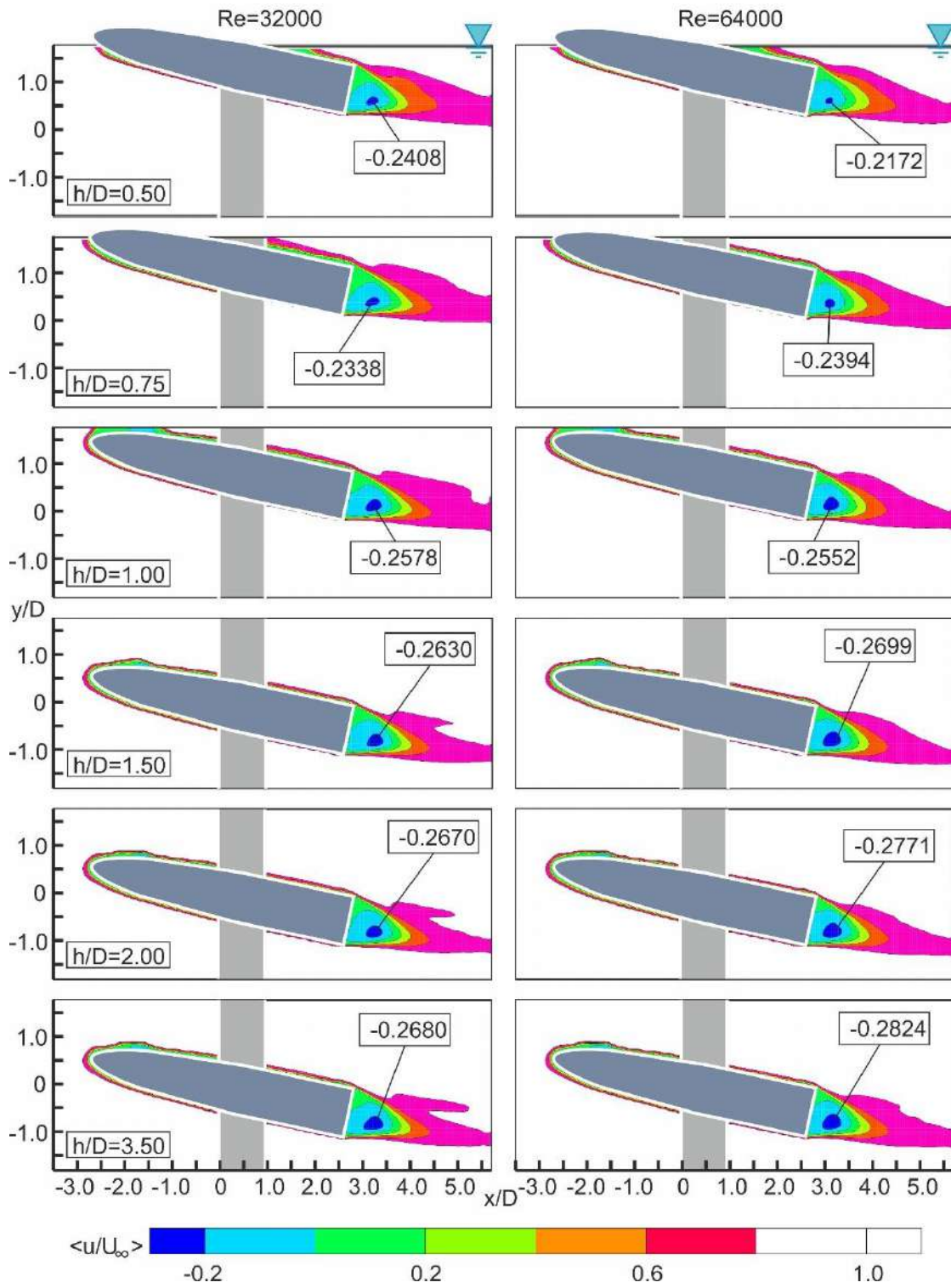
Şekil 4.28 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji konturları $\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=8^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



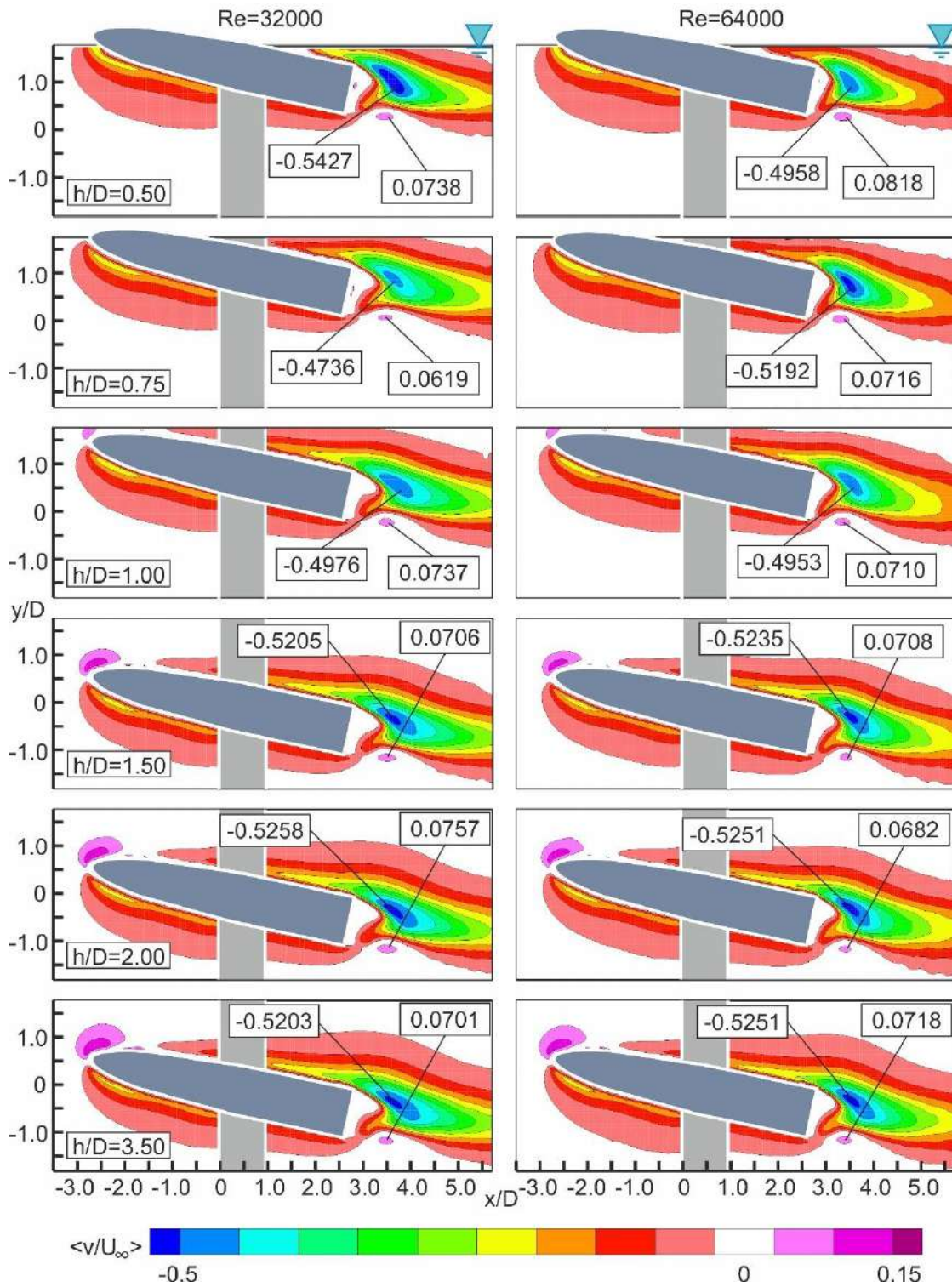
Şekil 4.29 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı hız vektör alanı $\langle V \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



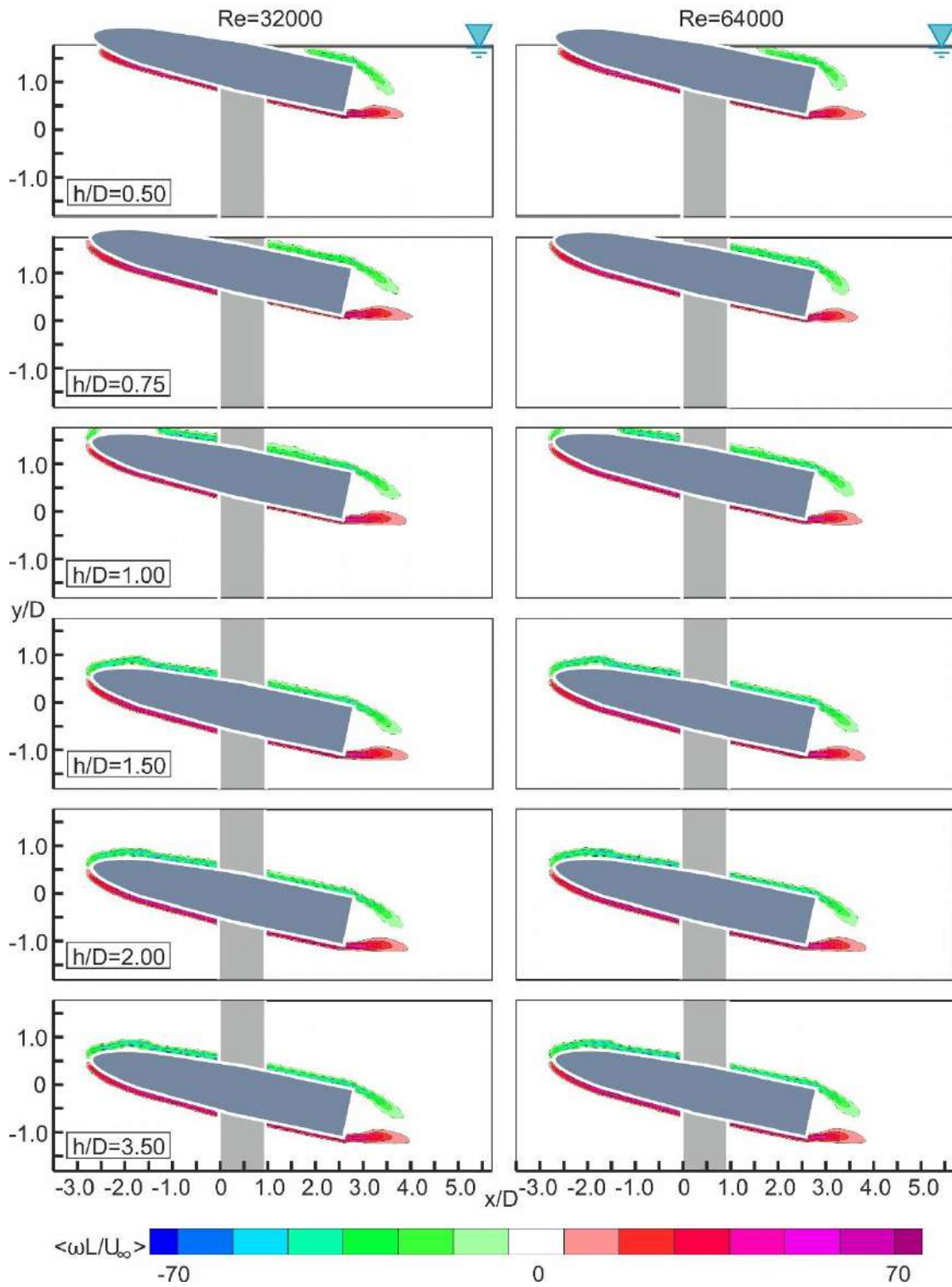
Şekil 4.30 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım çizgileri topolojisi $\langle \Psi \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısının PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



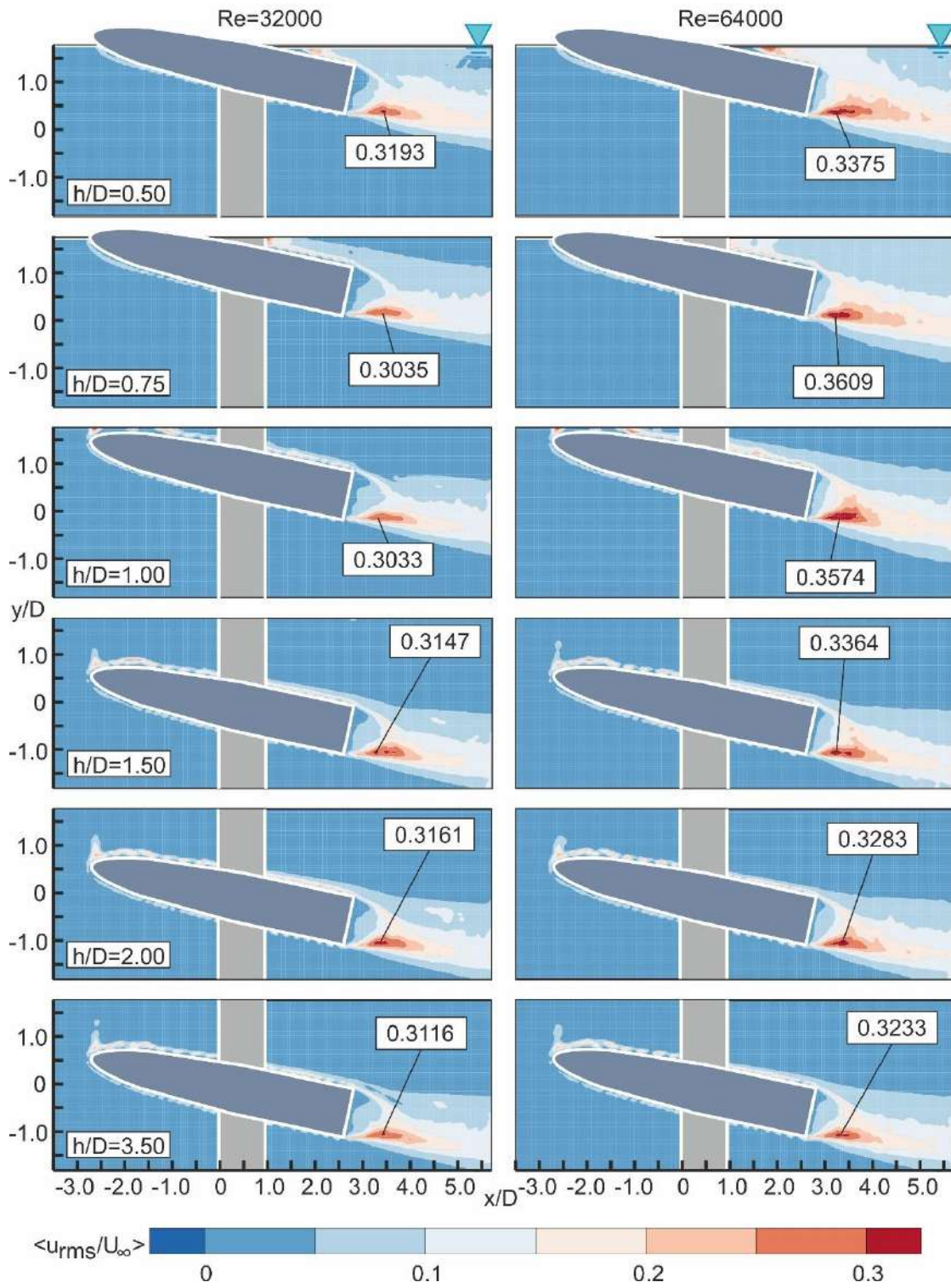
Şekil 4.31 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle u/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısının PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



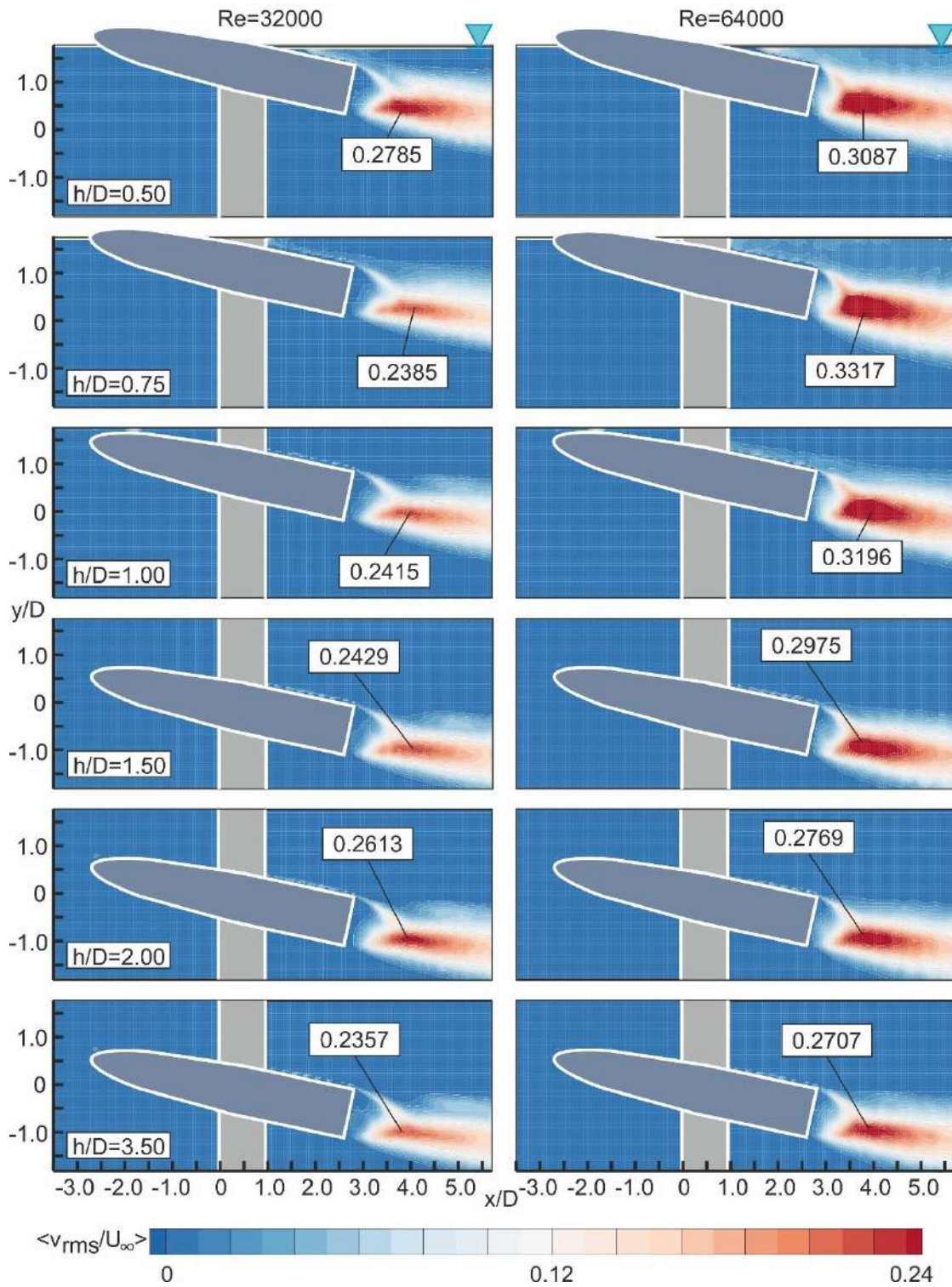
Şekil 4.32 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle v/U_\infty \rangle$ değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısının PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



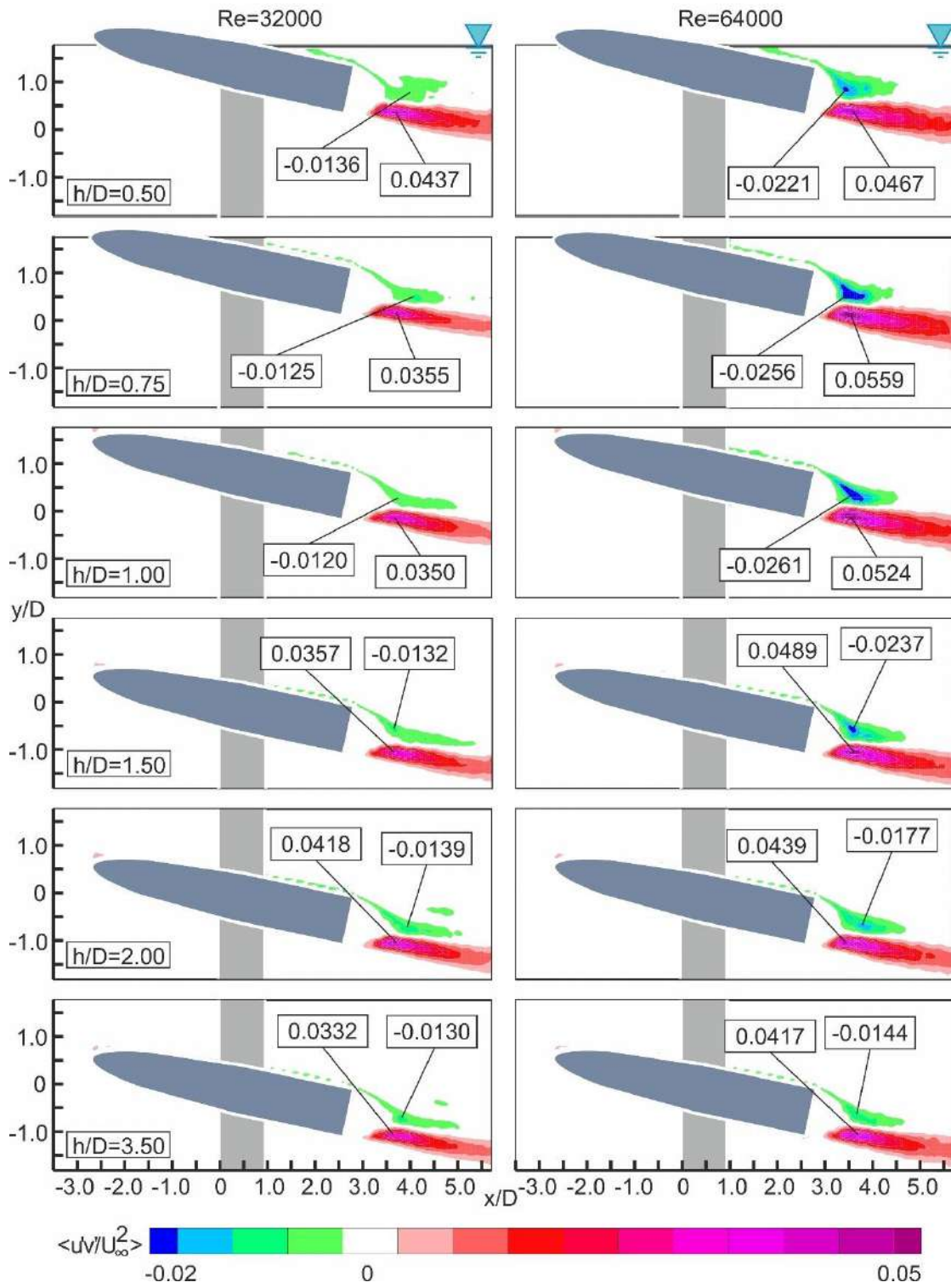
Şekil 4.33 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı girdap konturları $\langle \omega L / U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



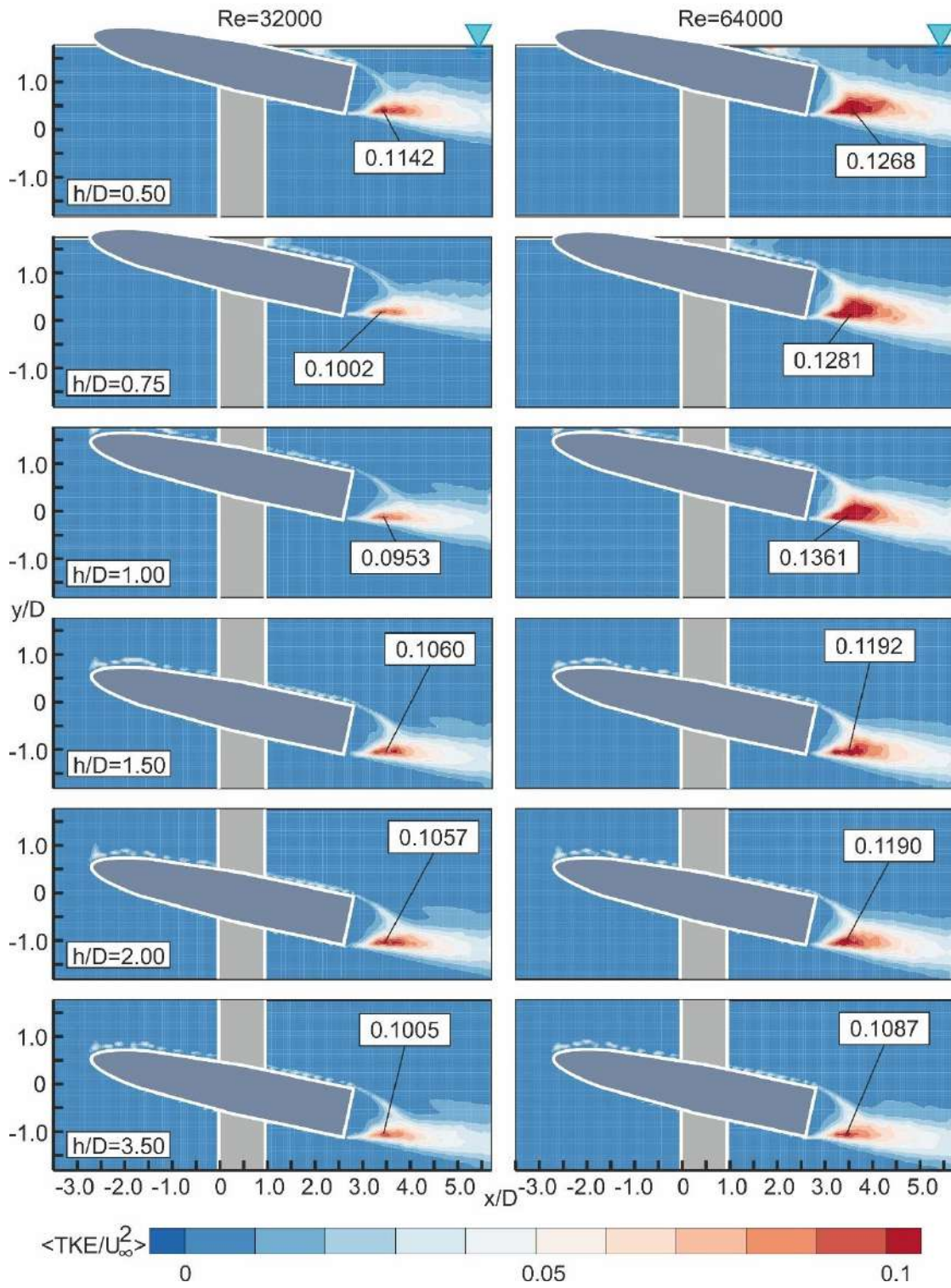
Şekil 4.34 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



Şekil 4.35 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



Şekil 4.36 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi kontur dağılımları $\langle u'v'/U_\infty^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması



Şekil 4.37 Serbest yüzey etkisindeki akış şartlarında zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji konturları $\langle TKE/U_{\infty}^2 \rangle$ dağılımı değişiminin yarı-eliptik uçlu burun ve küt kuyruk tasarım modeli çevresindeki akış yapısı etkisinin PIV ölçüm sonuçlarının boy/en oranı $L/D=5.5$, daldırma oranları $0.5 \leq h/D \leq 3.5$, hücum açısı $\alpha=12^\circ$, $Re=32000$ ve $Re=64000$ değerlerinde karşılaştırılması

4.1.3. PIV Sonuçlarına Genel Bakış: Reynolds Değeri Değişimi, Hücum Açısı Değişimi, Burun Yapısı Değişimi ve Boy/En Oranı Değişiminin İncelenmesi

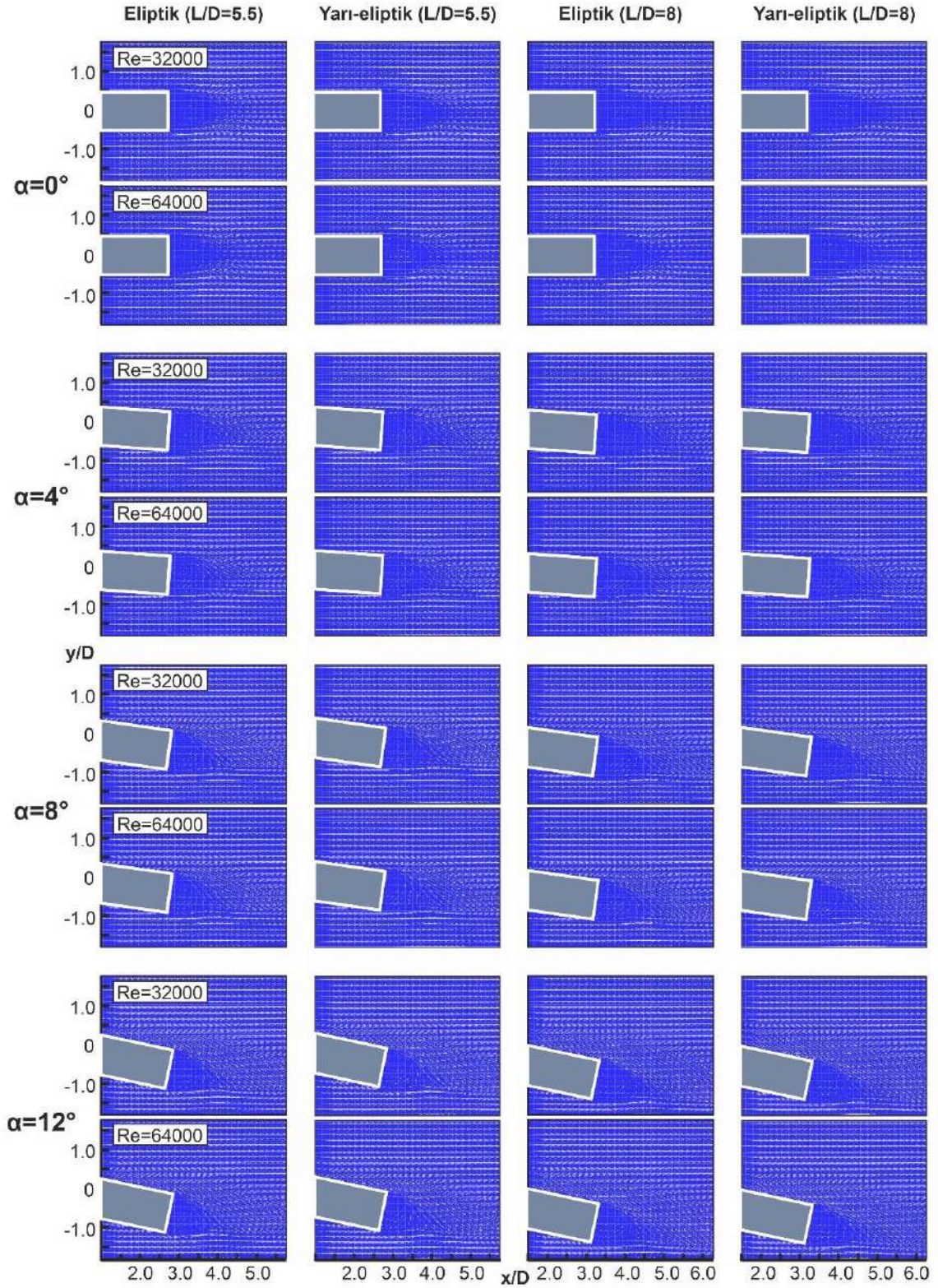
Çalışmanın bu bölümünde, PIV deneyleri proses edilerek elde edilen görsellerden söz konusu parametrelerin değişimiyle alınan sonuçlar daha toplu bir konfigürasyon ile özetlenecektir. Değişen parametrelere göre elde edilen sonuçlar her bir görselin hemen üzerinde maddeler halinde verilecektir.

Deneylerden elde edilen bütün veri toplama ve görselleştirme çalışmaları sonucunda elde edilenler arasında az da olsa genel trendi bozan ve bilinen literatüre uyum sağlamayan sonuçlar bulunmaktadır. Deney sistemindeki anlık değişimler, data yetersizliği, proses hataları ve benzeri doğal veya insani sebeplerden kaynaklanabilecek bu tip sonuçlar göz ardı edilerek deneysel parametrelerdeki bilinçli değişikliklerin, sonuçların geneline yansıyan etkileri ele alınacaktır.

Sonuçlar üniform akışa en yakın daldırma oranı değeri için derlenerek verilmiştir. Sonuçların ayrı ayrı daldırma oranları için elde edilen daha ayrıntılı sonuçları bu bölüme kadar ele alınmıştır.

Aşağıdaki Şekil 4.38’de daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı hız vektör alanı $\langle V \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ ve $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılmıştır. Şekilden çıkarılan sonuçlar literatüre de uygun olarak genel itibariyle şu şekildedir:

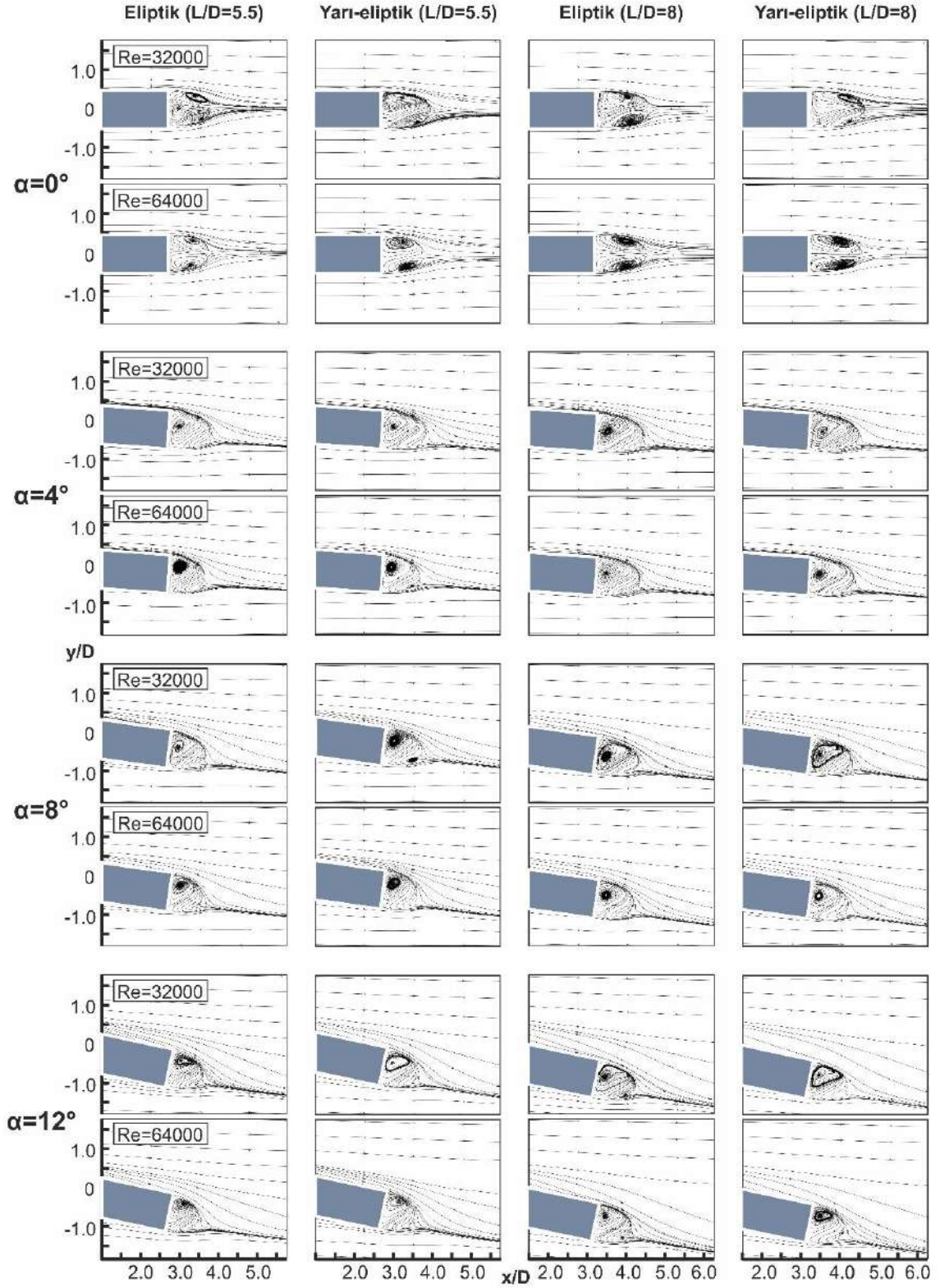
- Reynolds sayısının artmasıyla birlikte art izindeki karışım bölgesi modele doğru yaklaşmıştır.
- Öncesinde simetrik bir yapısı olan art izi, hücum açısının 0° ’dan farklı değerler almasıyla asimetrik hale gelmiştir. Hücum açısı arttıkça, art izi de hücum açısı yönünde kaymıştır. Bu durum, art izindeki ters vektörlerin, art izinin üst kısmına yakın şekilde odaklanmasına sebep olmuştur.
- Model boy/en oranının artışı, art izindeki aktif bölgenin modelin arkasından daha uzağa doğru uzanmasına sebep olmuştur.



Şekil 4.38 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı hız vektör alanı $\langle V \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması

Aşağıdaki Şekil 4.39’da daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım çizgileri topolojisi $\langle \Psi \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8, hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ ve $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılmıştır. Şekilden çıkarılan sonuçlar literatüre de uygun olarak genel itibariyle şu şekildedir:

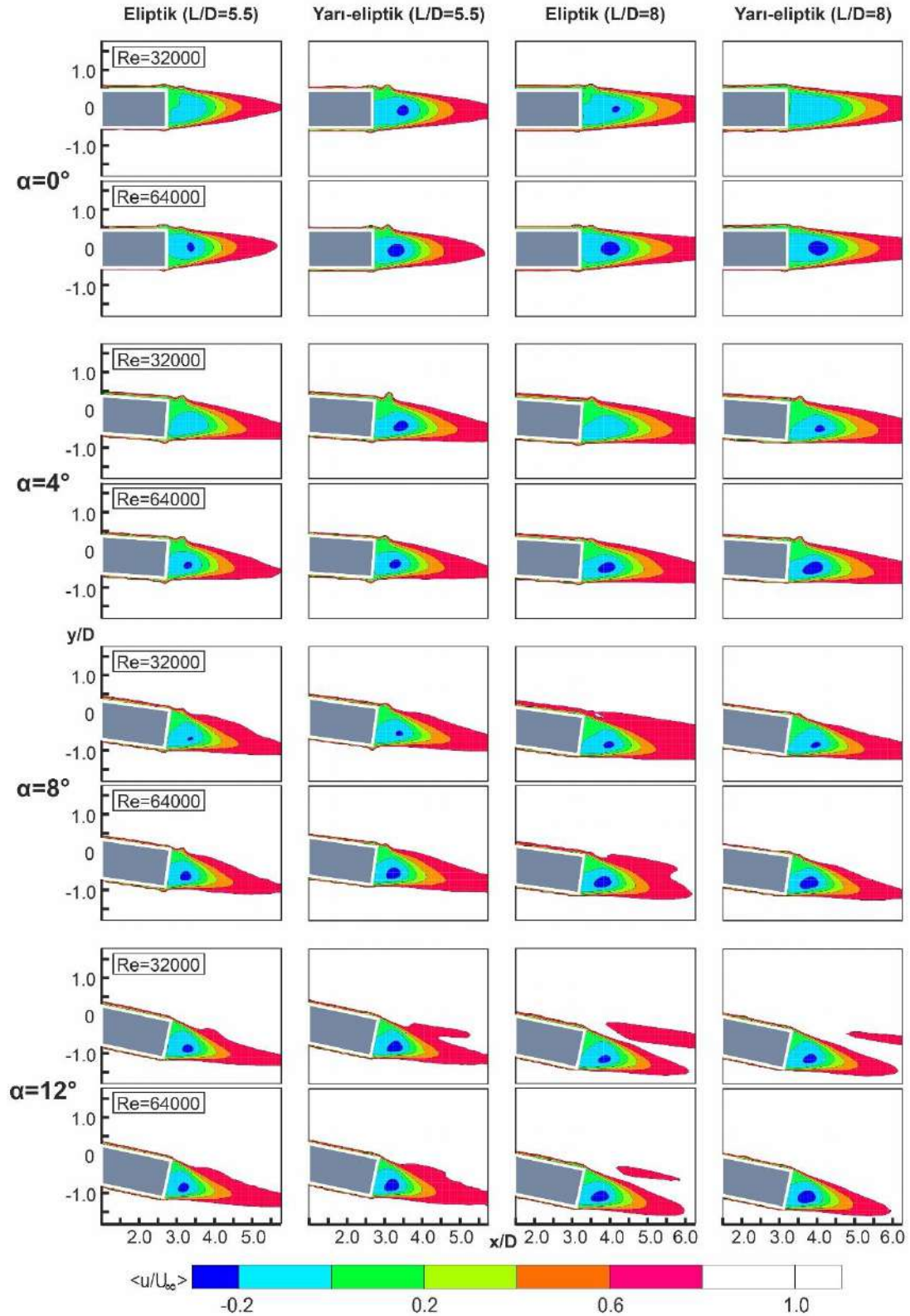
- Reynolds sayısının artması ile art izindeki odak noktalarının modele daha yakın bir mesafede oluşmasına sebep olmuştur.
- Hücum açısının 0 olduğu durumda modelin yatay simetri eksenine göre simetrik bir art izi görülebilirken, açılı durumlarda simetri hücum açısı yönünde bozulmuştur. Dolayısıyla açısız durumlarda genel olarak simetrik iki odak noktası (F) oluşmuşken, açılı durumlarda art izinin üst bölgesinde tek odak noktası oluşma eğilimi göstermiştir.
- Akım çizgileri topografisinden burun yapısı farkının etkisine dair açık bir sonuç çıkarılamamaktadır.
- Boy/en oranındaki artış, art izindeki etkileşim bölgesinin modelin ayrılma kenarından daha uzakta sönümlenmesine sebep olmuştur.



Şekil 4.39 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım çizgileri topolojisi $\langle \Psi \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması

Aşağıdaki Şekil 4.40'ta daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle u/U_\infty \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8, hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ ve $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılmıştır. Şekilden çıkarılan sonuçlar literatüre de uygun olarak genel itibariyle şu şekildedir:

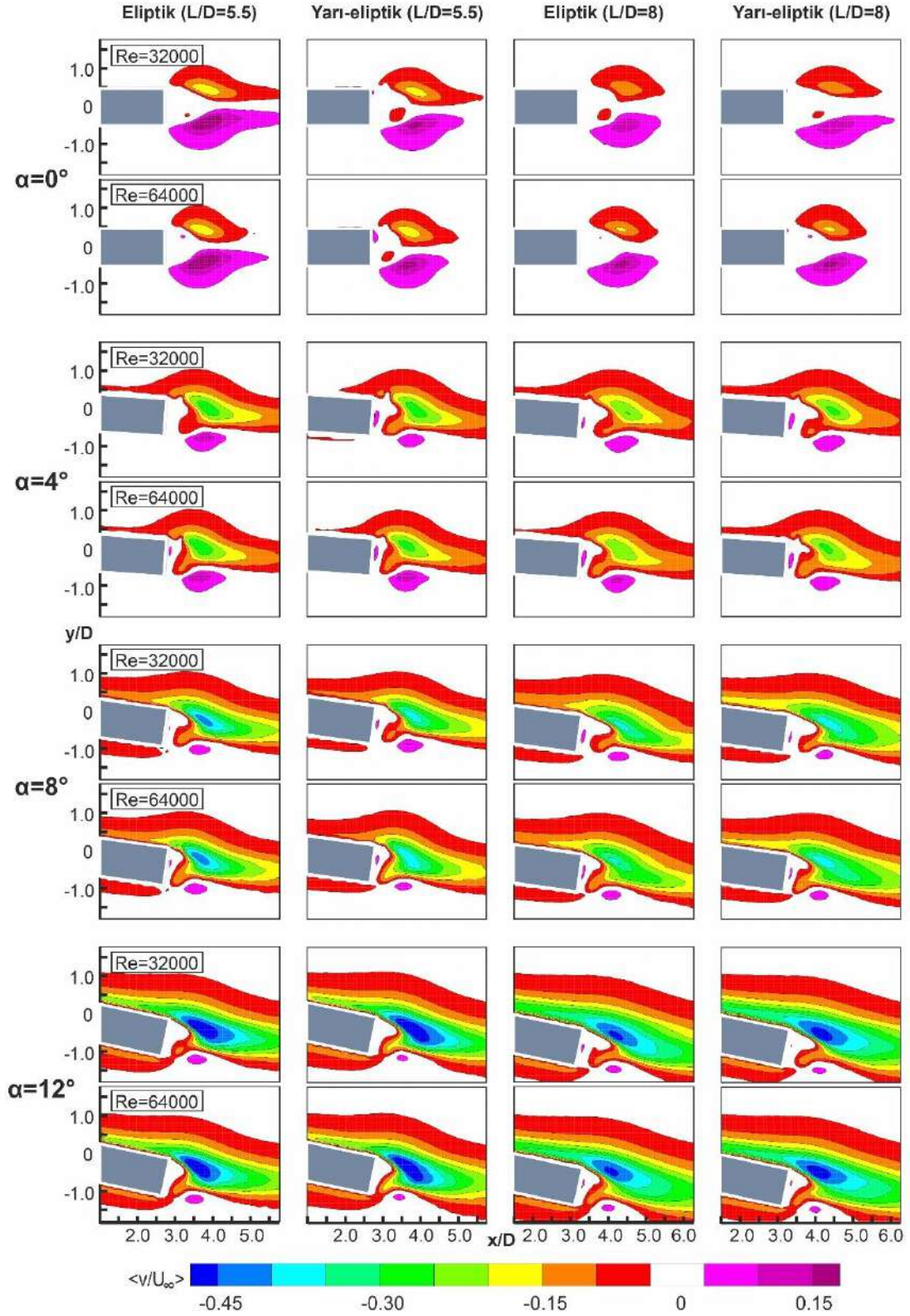
- Reynolds sayısının artması ile art izindeki karışma bölgesinin küçüldüğü söylenebilir. Öyle ki eşdeğer kontur seviyeleri kıyaslandığında, $Re=64000$ için söz konusu seviyelerin ayrılma kenarına daha yakın mesafede olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, ters akış şiddetinin arttığı ve negatif değere sahip kontur bölgelerinin daha yoğun yer kapladığı gözlenmiştir.
- Yine, hücum açısının artmasıyla ters akış bölgelerinin büyüdüğü ve daha şiddetli konturların oluştuğunu söylemek mümkündür.
- Yarı-eliptik burun yapısının da benzer şekilde art izindeki negatif değerlere sahip ters akış bölgesinin büyüklüğünü ve kontur şiddetini arttırdığı sonucu çıkarılabilir.
- Uzun modelde akış yönündeki hız konturları art izi bölgesinde, modelden daha uzağa uzanmış ve kontur şiddetleri artmıştır.



Şekil 4.40 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle u/U_\infty \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması

Aşağıda Şekil 4.41’de daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle v/U_\infty \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ ve $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılmıştır. Şekilden çıkarılan sonuçlar literatüre de uygun olarak genel itibariyle şu şekildedir:

- Artan Reynolds değeri ile alansal açıdan daha küçük ve modelin arkasına daha yakın konturlar oluşmuşken, kontur şiddetleri ve art izinde elde edilen minimum ve maksimum değerler yükselmiştir.
- Hücum açısının 0° ’dan farklı bir değer almasıyla ve artmasıyla, art izindeki simetri belirgin şekilde bozulmuştur. Art izindeki pozitif değere sahip hız konturları, art izinin hücum açısı yönünde kaymasından dolayı 12° ’ye doğru sıfır değerine yaklaşmıştır. Benzer şekilde, negatif kontur değerleri de hücum açısı arttıkça şiddetlenmiştir.
- Eliptik burun yapısına sahip model, yarı-eliptik modele kıyasla daha şiddetli konturlara ve daha yüksek maksimum ve minimum değerlere sahiptir. Dolayısıyla yarı-eliptik modelde kontur alanları eliptik modelinkinden daha küçüktür.
- İncelik oranı yüksek $L/D=8$ olan modelde akış yönüne dik hız konturları art izinde daha hacimsiz konturlar meydana getirmiştir. Sonuç olarak, uzun modelin maksimum değerleri, kısa modelinkilere göre mutlak değer olarak daha düşüktür.



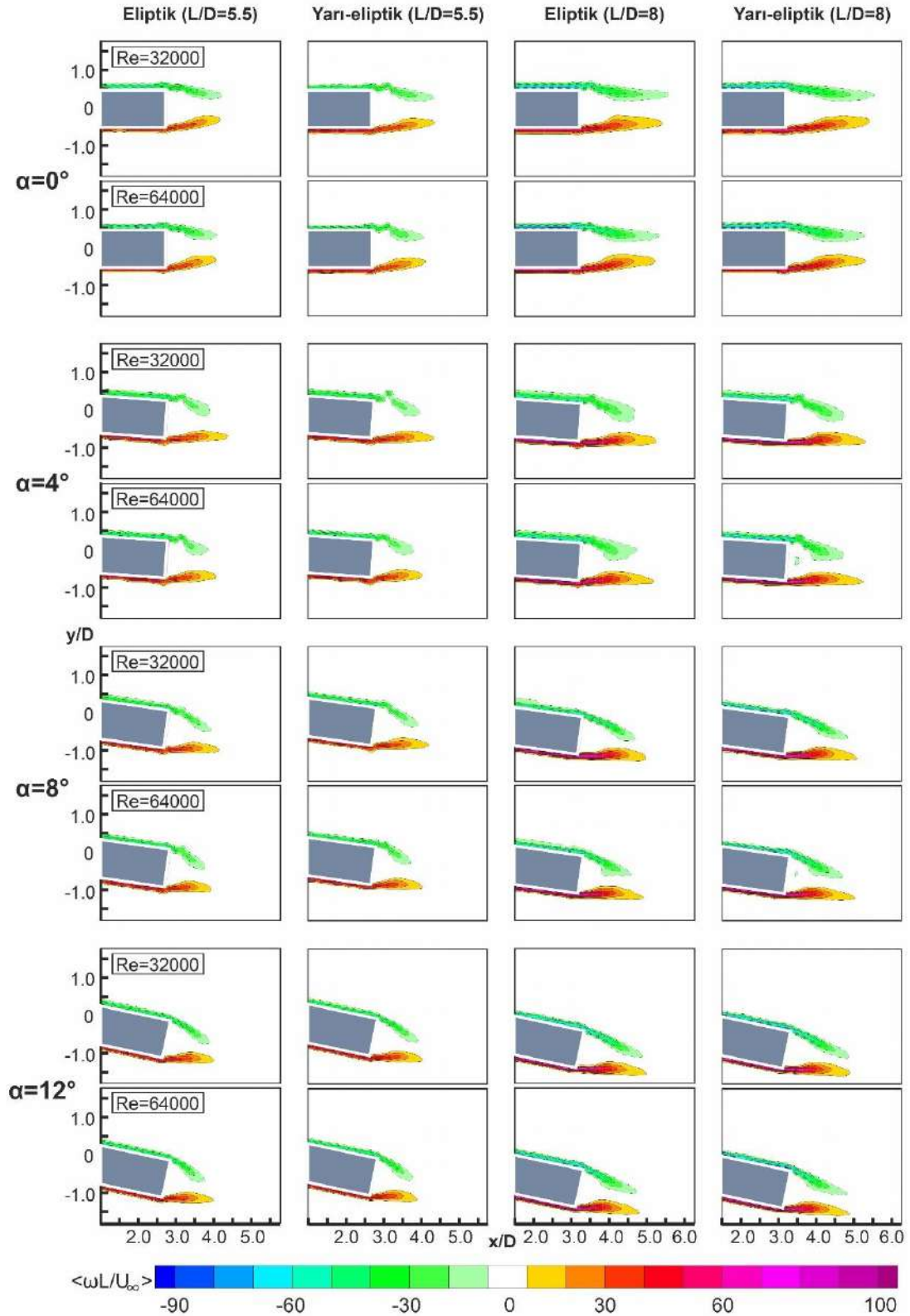
Şekil 4.41 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni kontur dağılımları $\langle v/U_\infty \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması

Aşağıda Şekil 4.42’de daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı girdap konturları $\langle \omega L/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ ve $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılmıştır. Şekilden çıkarılan sonuçlar literatüre de uygun olarak genel itibariyle şu şekildedir:

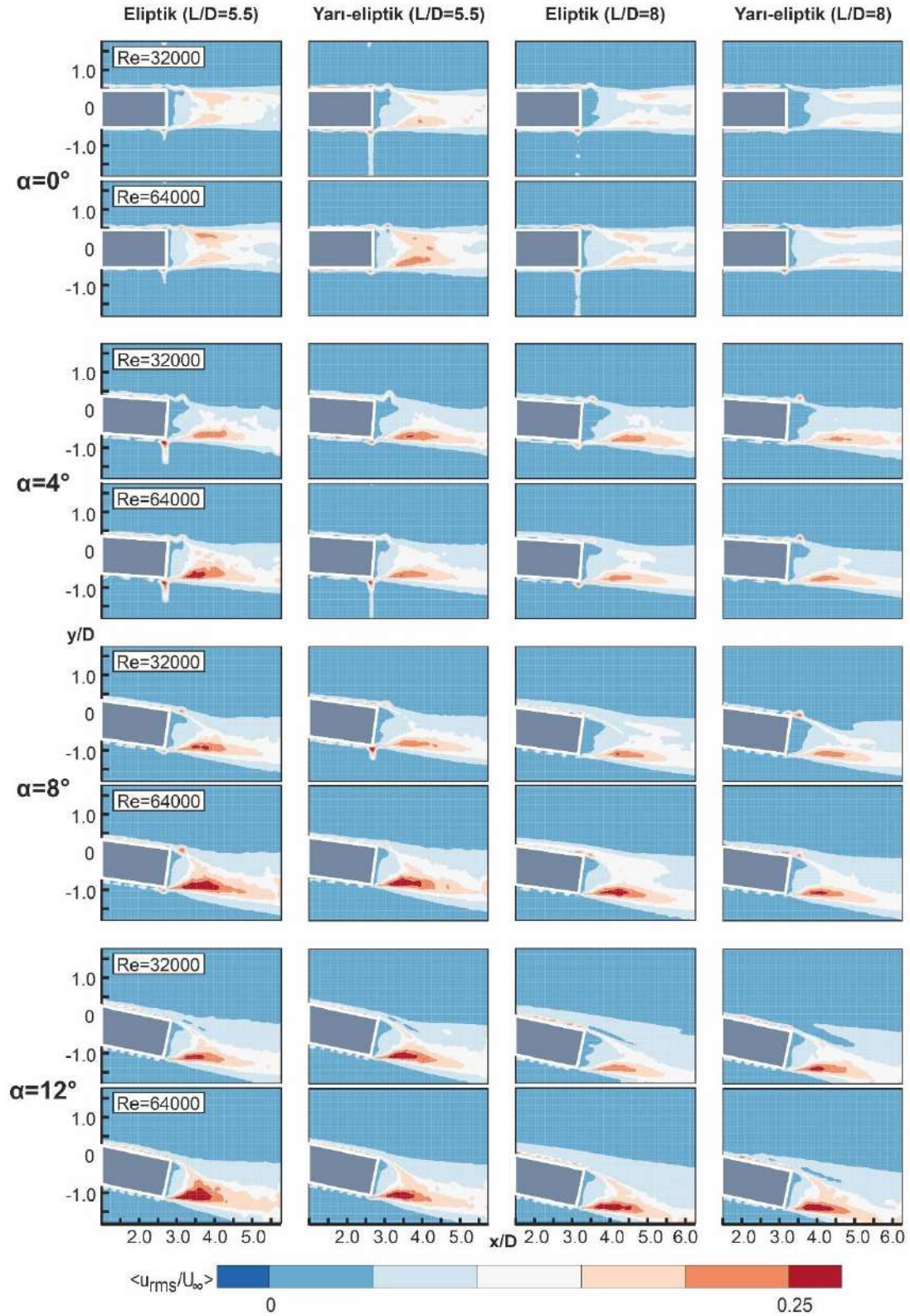
- Reynolds değerinin yükselmesiyle, girdap kontur uzunluklarının kısaldığı fark edilmiştir.
- Zaman ortalamalı girdap konturları, artan hücum açısı yönünde yönelme göstermiştir.
- Uzun modelde kontur alanları modelin arkasından art izine daha fazla uzanmış ve konturların şiddeti görülür şekilde artmıştır.
- Girdap konturlarına dair daha ayrıntılı sonuçlar, girdap salınım frekansı ve Strouhal sayısı grafiklerinden elde edilebilir.

Şekil 4.43’te daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ ve $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılmıştır. Şekilden çıkarılan sonuçlar literatüre de uygun olarak genel itibariyle şu şekildedir:

- Reynolds sayısının artması ile daha şiddetli konturlar oluşmuş ve daha yüksek maksimum kontur değerlerine ulaşılmıştır.
- Hücum açısı artışı da daha yoğun kontur bölgeleri ve daha yüksek maksimum değerler oluşturmuştur.
- Söz konusu daldırma oranı için genel itibarıyla eliptik modelin kontur yoğunluğu, yarı-eliptik modele göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.
- Uzun modelde kontur şiddetleri ve maksimum değerler düşüş göstermiştir.



Şekil 4.42 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı girdap konturları $\langle \omega L / U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması



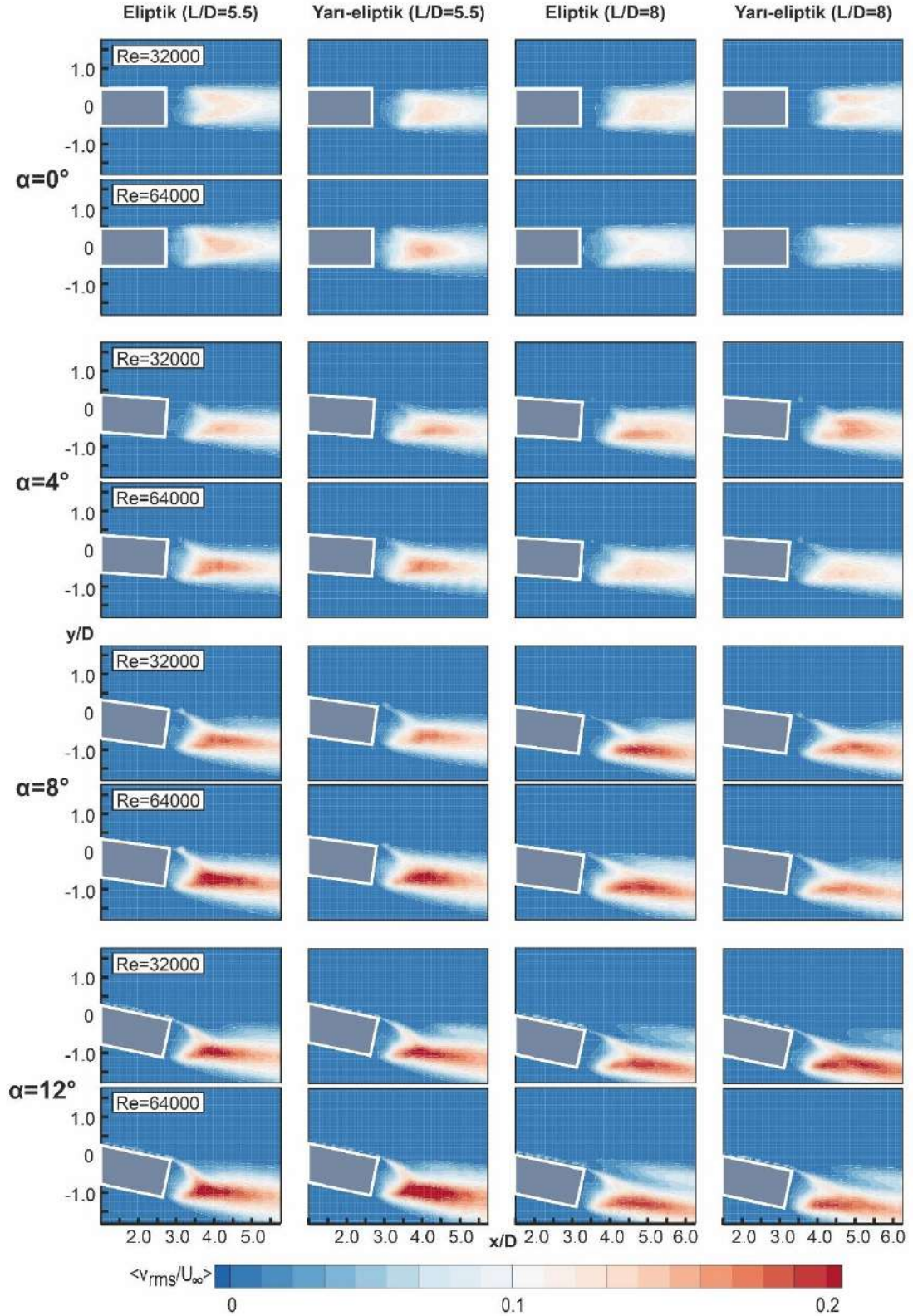
Şekil 4.43 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle u_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması

Aşağıdaki Şekil 4.44'te daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ ve $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılmıştır. Şekilden çıkarılan sonuçlar literatüre de uygun olarak genel itibariyle şu şekildedir:

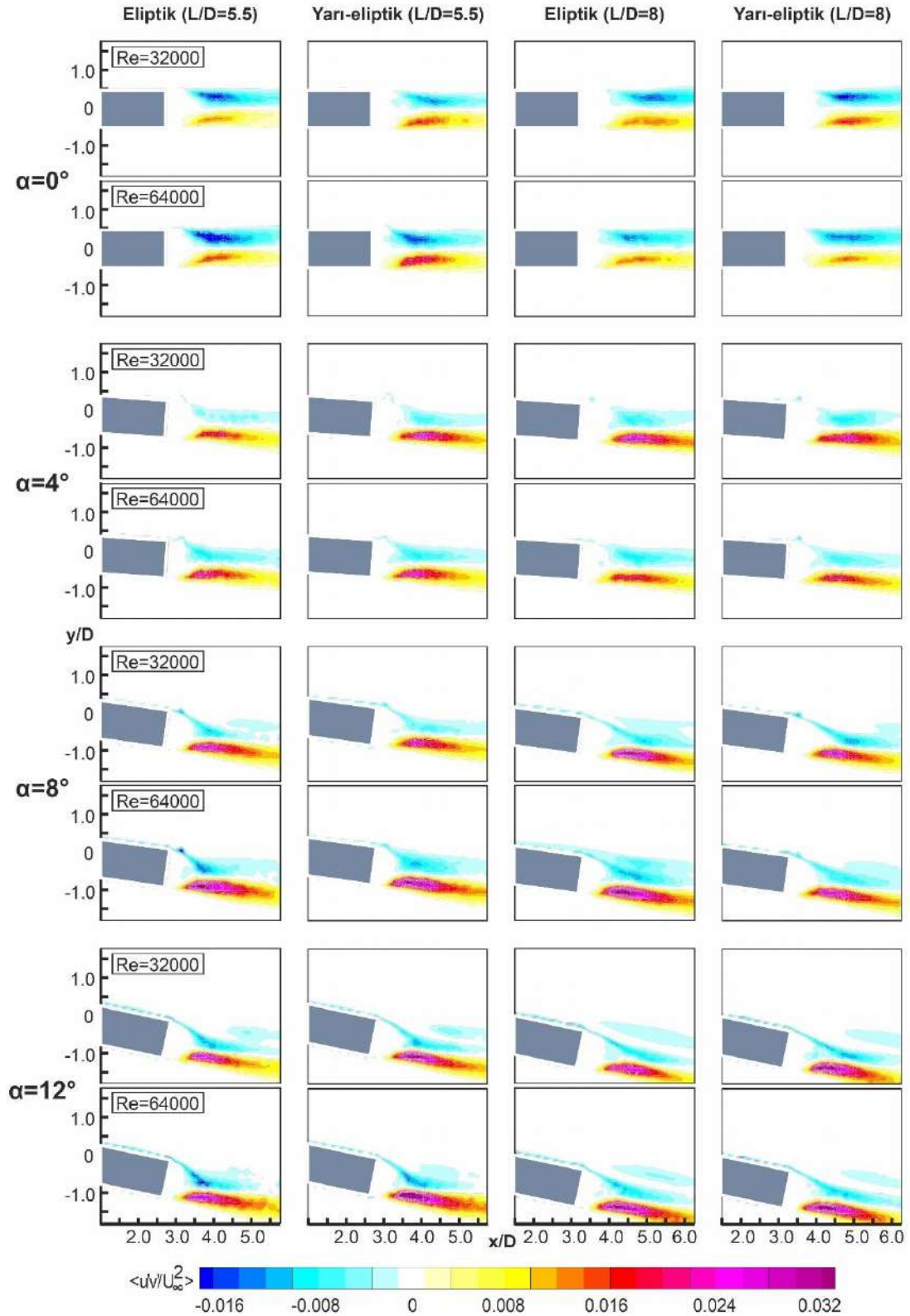
- Artan Reynolds sayısı ile konturlarda daha yüksek maksimum değerler elde edilmiştir.
- Hücum açısının artması, kontur şiddetlerinin artmasına, kontur alanlarının büyümesine ve daha yüksek maksimum değerlerin oluşmasına sebep olmuştur.
- Söz konusu daldırma oranı için eliptik modelde genel olarak kontur şiddetleri artmıştır.
- Uzun modellerde ($L/D=8$), genel olarak düşük Reynolds değerinde daha şiddetli konturlar oluşurken, yüksek Reynolds değerinde konturların şiddeti azalmıştır.

Şekil 4.45'te daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi kontur dağılımları $\langle u'v'/U_\infty^2 \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ ve $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılmıştır. Şekilden çıkarılan sonuçlar literatüre de uygun olarak genel itibariyle şu şekildedir:

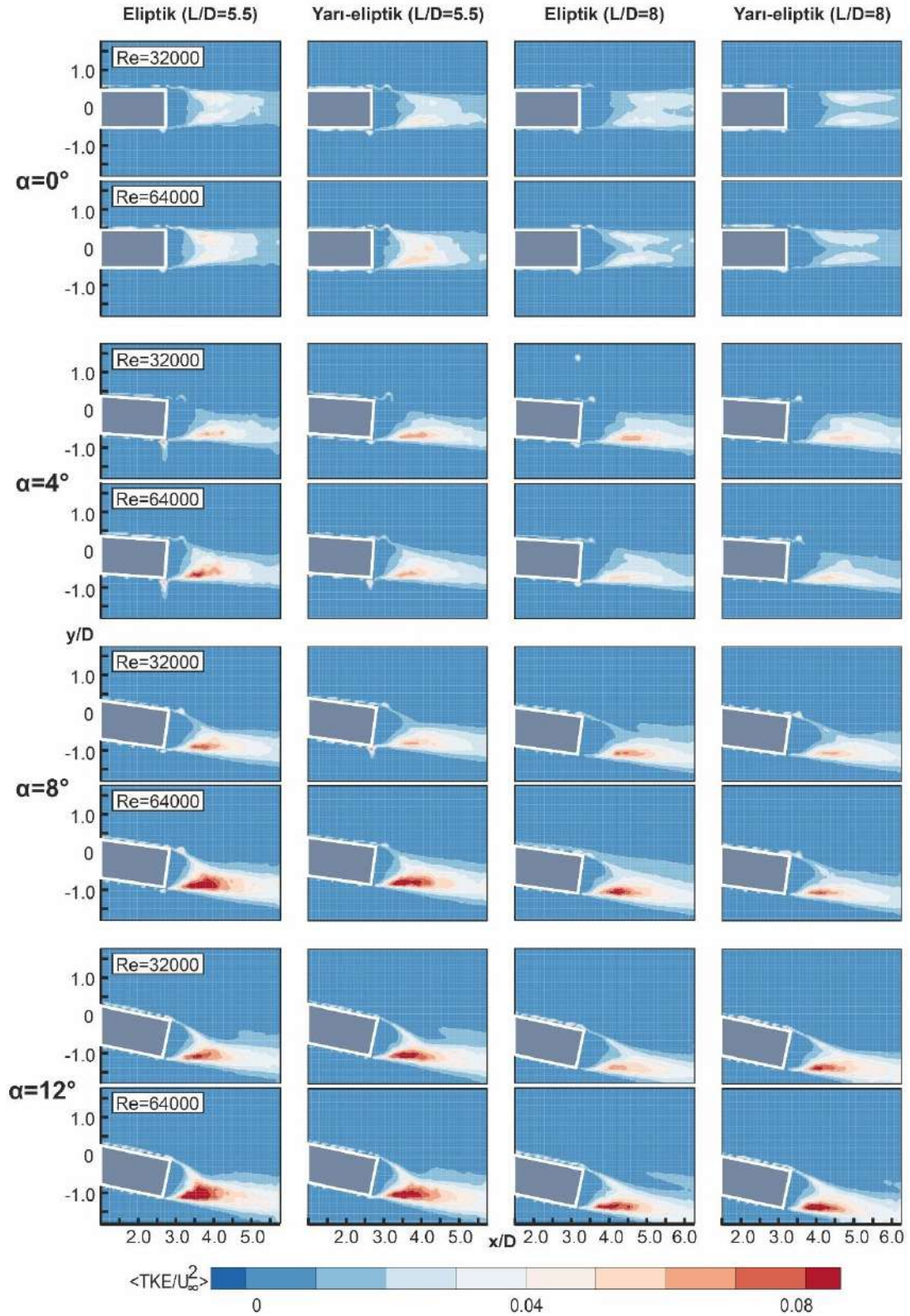
- Reynolds değerinin artması art izinde daha şiddetli konturların görülmesini sağlamıştır.
- Hücum açısı arttıkça Reynolds kayma gerilmesi maksimum pozitif ve negatif değerlerinin mutlak büyüklüğünde artış gözlenmiştir.
- Söz konusu derinlik oranı için, burun yapısı ve incelik oranının genel bir trend izlemediği görülmektedir.



Şekil 4.44 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı konturları $\langle v_{rms}/U_\infty \rangle$ dağılımı değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8, hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması



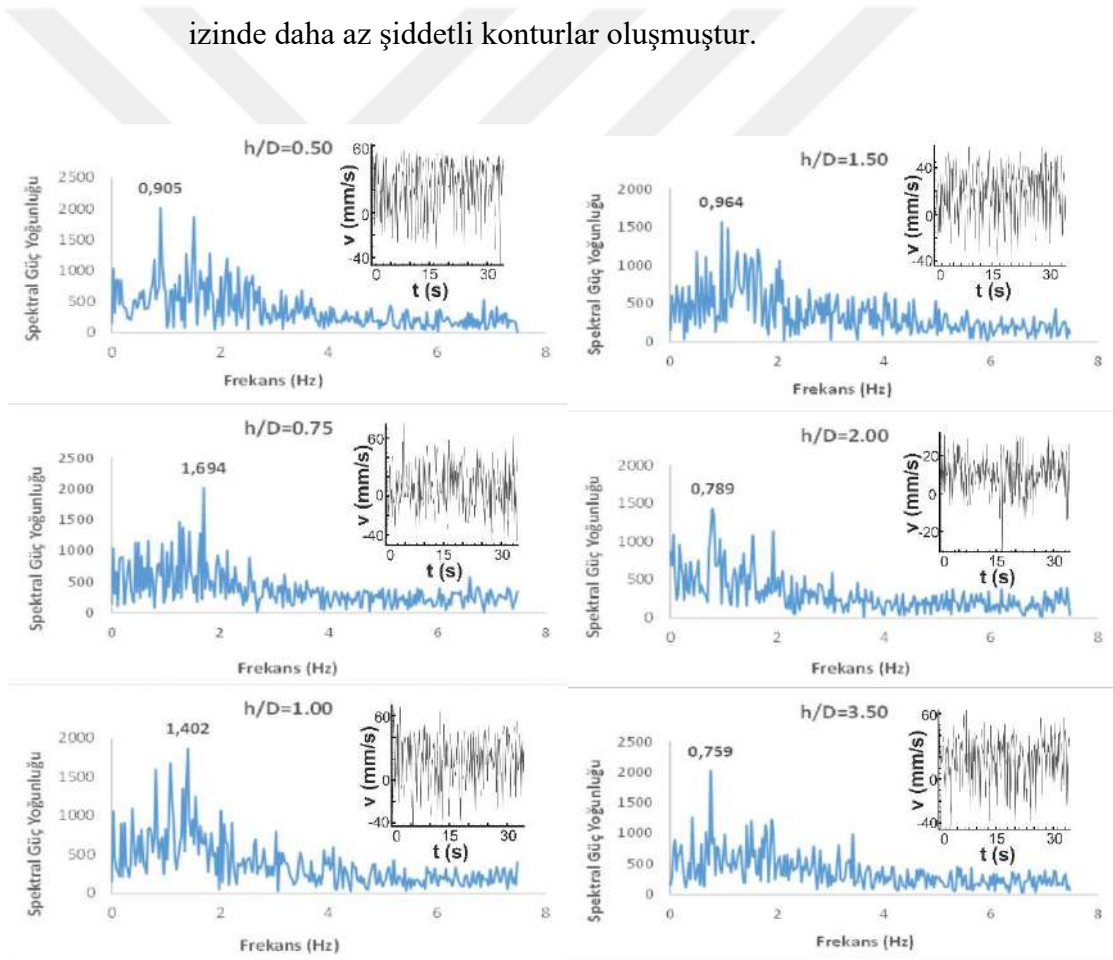
Şekil 4.45 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı Reynolds kayma gerilmesi kontur dağılımları $\langle u'v' / U_\infty^2 \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8 , hücum açısı $\alpha=0^\circ$, 4° , 8° , 12° , $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması



Şekil 4.46 Daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji konturları $\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8, hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılması

Yukarıdaki Şekil 4.46’da daldırma oranı $h/D=3.50$ için zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji konturları $\langle TKE/U_\infty^2 \rangle$ değişiminin eliptik ve yarı-eliptik burun yapısı, boy/en oranı $L/D=5.5$ ve 8, hücum açısı $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ ve $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde karşılaştırılmıştır. Şekilden çıkarılan sonuçlar literatüre de uygun olarak genel itibariyle şu şekildedir:

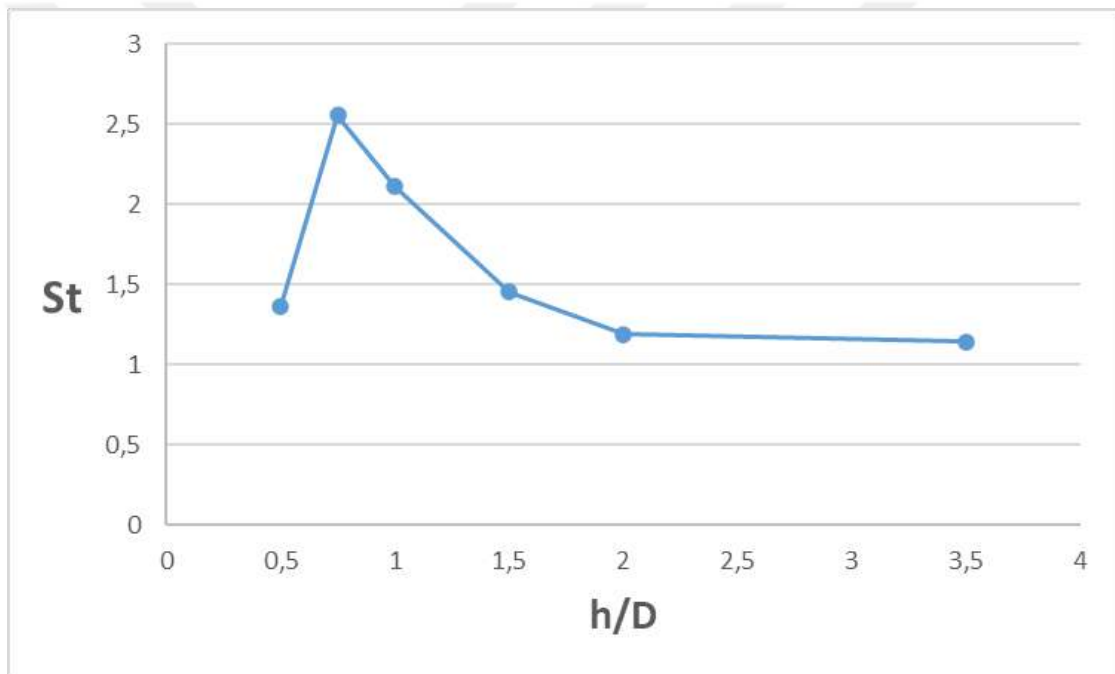
- Artan Reynolds sayısı ile konturlar daha yüksek maksimum değerlere ulaşılabilmiştir.
- Artan hücum açısı, daha yoğun kontur bölgelerinin oluşmasına sebep olmuş, art izinde daha yüksek maksimum değerlere ulaşılmıştır.
- Burun yapısı bu daldırma oranı için baskın bir yönde etki göstermemiştir.
- Boy/en oranı yüksek olan modellerde maksimum değerler düşmüş ve art izinde daha az şiddetli konturlar oluşmuştur.



Şekil 4.47 $L/D=5.5$ boy/en oranına sahip eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=32000$ koşullarındaki Zaman-Dikey Hız grafikleri ve bunlara bağlı Frekans-Spektral Güç Yoğunluğu grafiklerinin $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ daldırma oranı değerlerinde karşılaştırılması

Şekil 4.47’de gösterilen grafiklerden elde edilen girdap kopma frekansı değerlerinden $St = fL/U_\infty$ Strouhal sayısı formülüne göre aşağıdaki Şekil 4.48’deki daldırma oranı - Strouhal sayısı grafiği elde edilmiştir.

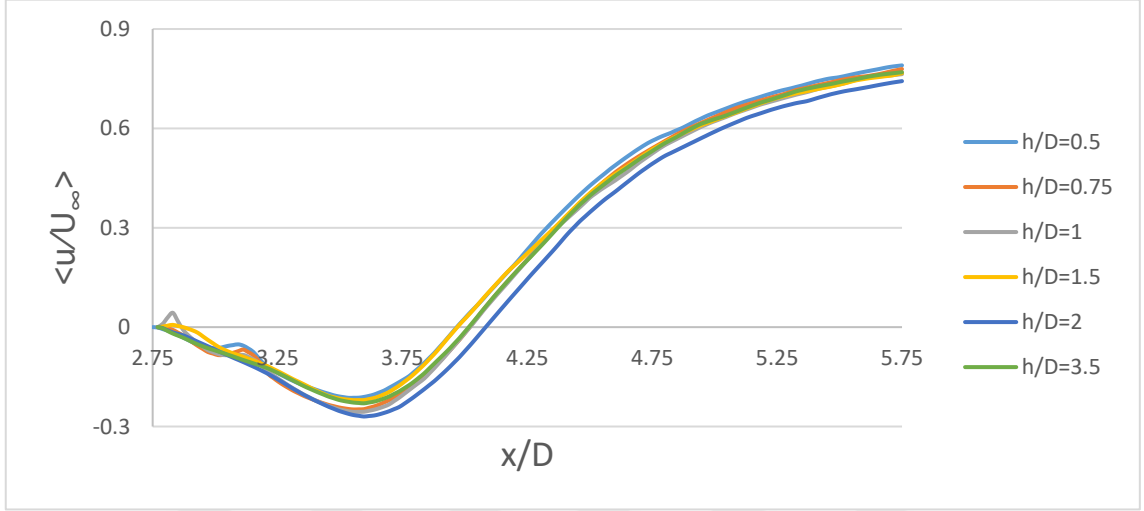
Daldırma oranı $h/D=0.50$ için modelin üst kısmı yüzeye temas halinden olduğundan dolayı sadece alt yüzeyden vorteks salınımı gerçekleşmektedir. $h/D=0.75$ daldırma oranında ise yüzeydeki titreşimden dolayı hem alt hem de üst yüzeyden kopma olduğu için girdap kopma frekans değeri ve dolayısıyla Strouhal sayısı ciddi bir yükseliş göstermiştir. Sonrasında ise literatüre de uygun olarak, daldırma oranı arttıkça girdap frekansında ve Strouhal sayısında yaklaşık olarak logaritmik bir azalma eğrisi görülmektedir (Şekil 4.48).



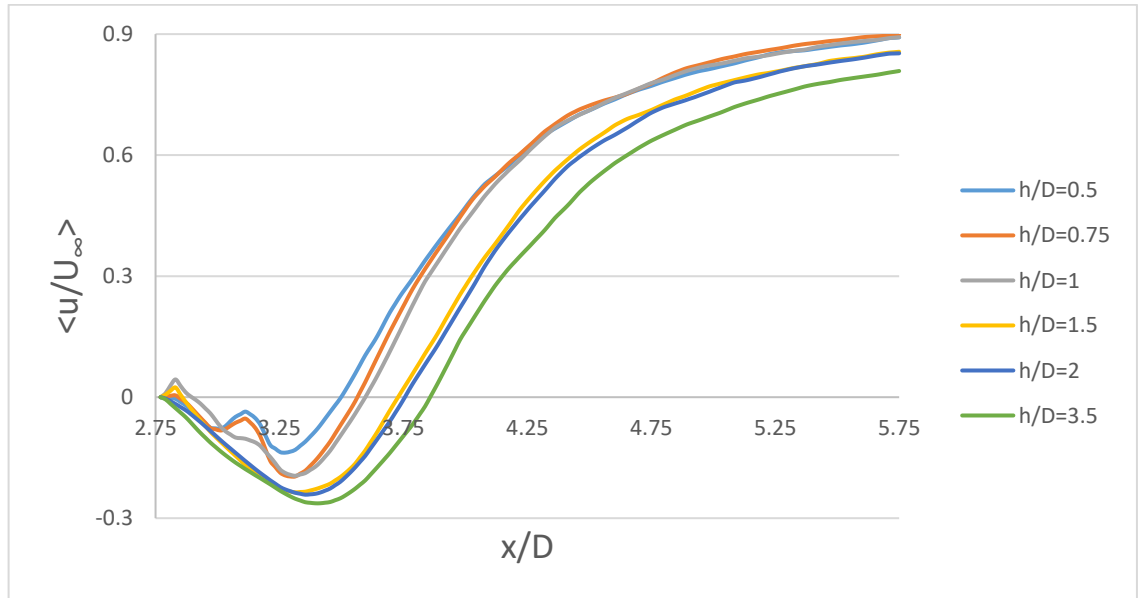
Şekil 4.48 Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=32000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığındaki daldırma oranı-Strouhal sayısı değişimi grafiği

Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ (Şekil 4.49) ve $Re=64000$ (Şekil 4.50) koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni değerlerinin geometrinin arttıkça yatay simetri eksenini boyunca değişimi verilmiştir. Reynolds sayısı arttıkça girdap oluşum uzunluğunun kısaldığı ve hızın sıfır olduğu durma noktasının geometrinin sırtına daha yakın olduğu görülmüştür. Hız iki katına çıkmasına rağmen serbest yüzey etkisi ve türbülanslı art izinin etkileşiminden dolayı uzak art izi bölgesinde asimptotik değer doğrusal olarak artmamaktadır. $Re=64000$ değerindeki akışın toparlanma eğilimi

$Re=32000$ değerine göre daha yüksektir. Bunda, art izine olan momentum ve kütle transferinin artışı önemli etkindir. Minimum değerine ulaşmadan önce düşük daldırma oranlarında ($h/D=0.5$ ve $h/D=0.75$), sınırlandırılmış art izindeki dönüşlü akışın etkisinden dolayı zaman ortalamalı hız değerinde artış ve azalış gösteren çalkantılar oluşmaktadır. Bu artış yüksek Reynolds sayısında daha kısa mesafede fakat daha yüksek genlikte oluşmaktadır.

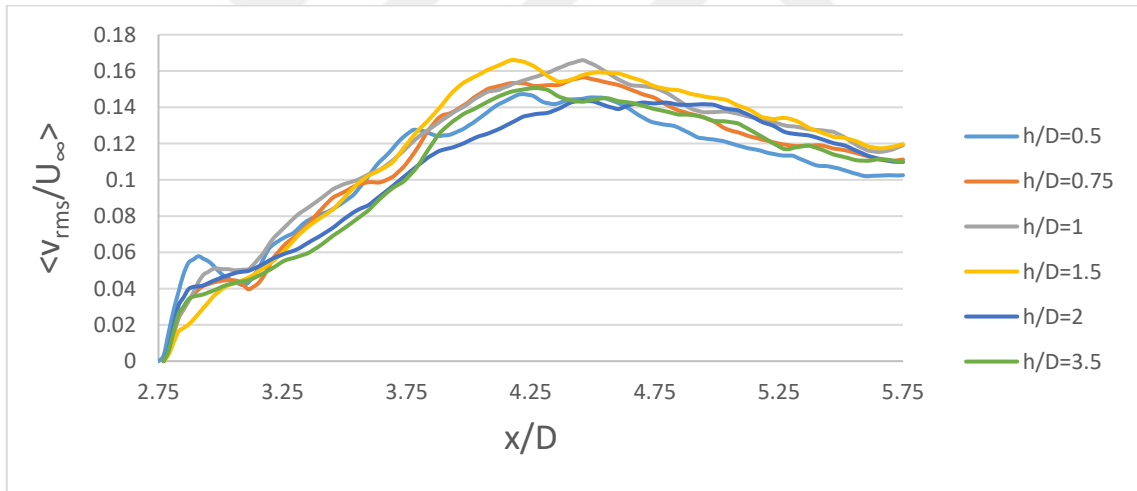


Şekil 4.49 Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=32000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenindeki çizgisel dağılımı

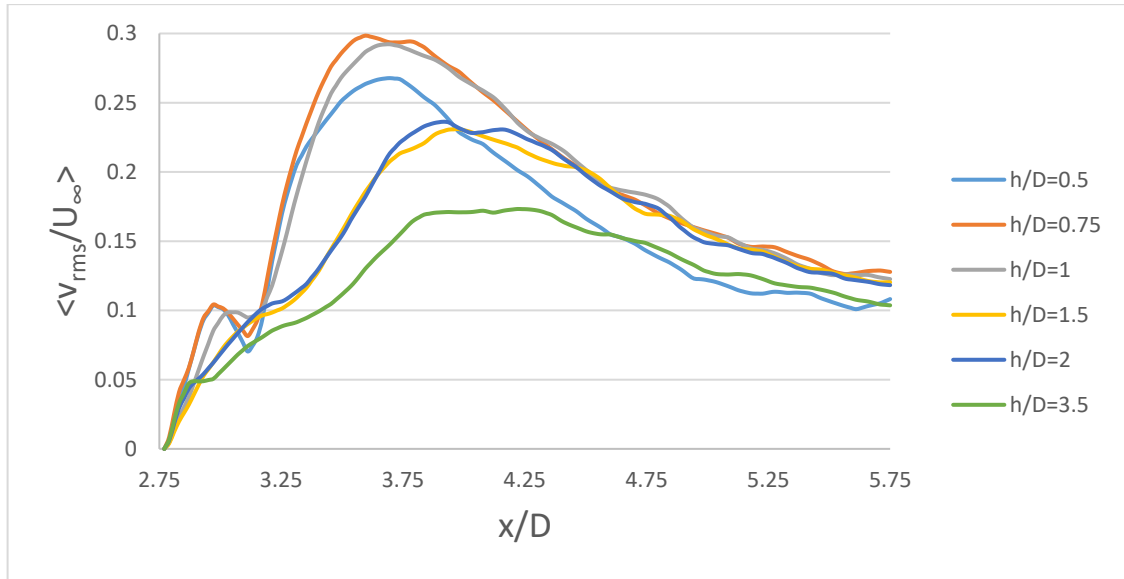


Şekil 4.50 Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=64000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenindeki çizgisel dağılımı

Şekil 4.51 ve 4.52'de boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ değerinde $Re=32000$ ve $Re=64000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenini boyunca değişimi sunulmuştur. Çalkantılı hız değerleri art izi bölgesinde ilerledikçe artmaktadır, bu artış $Re=32000$ için yaklaşık $x/D=4.5$ civarında tüm daldırma oranlarında maksimum değere ulaşarak sonrasında serbest akımın art izini toparlayan momentum transferi ile azalmaktadır. $Re=64000$ değerinde ise akışın serbest yüzeye yönelmesinden dolayı boyutsuz değerlerler hem daha yüksek çıkmakta hem de art izine daha yakın mesafede yaklaşık $x/D=3.5$ civarında maksimum olmaktadır. Yaklaşık olarak üniform akış şartlarını gösteren daldırma oranı $h/D=3.5$ için bu değişim en düşük seviyededir. Uzak art izi olan $x/D=5.75$ civarında her iki Reynolds sayısı ve tüm daldırma oranları için boyutsuz çalkantıların nicel ve nitel olarak birbirine yaklaştığı, 0.10-0.12 aralığında karar kıldığı görülmektedir.

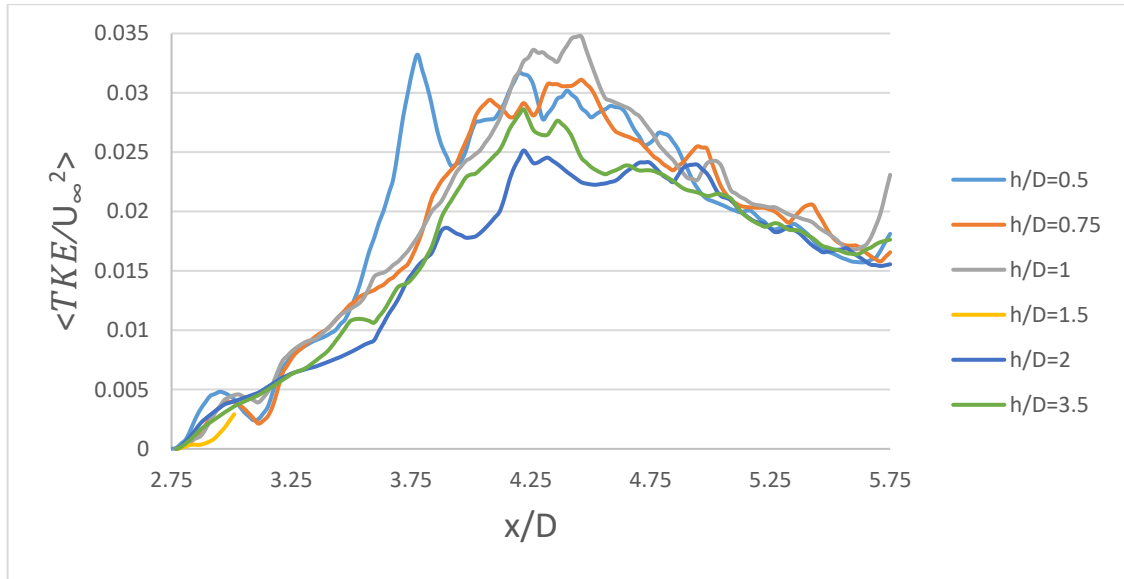


Şekil 4.51 Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=32000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenini üzerindeki çizgisel dağılımı

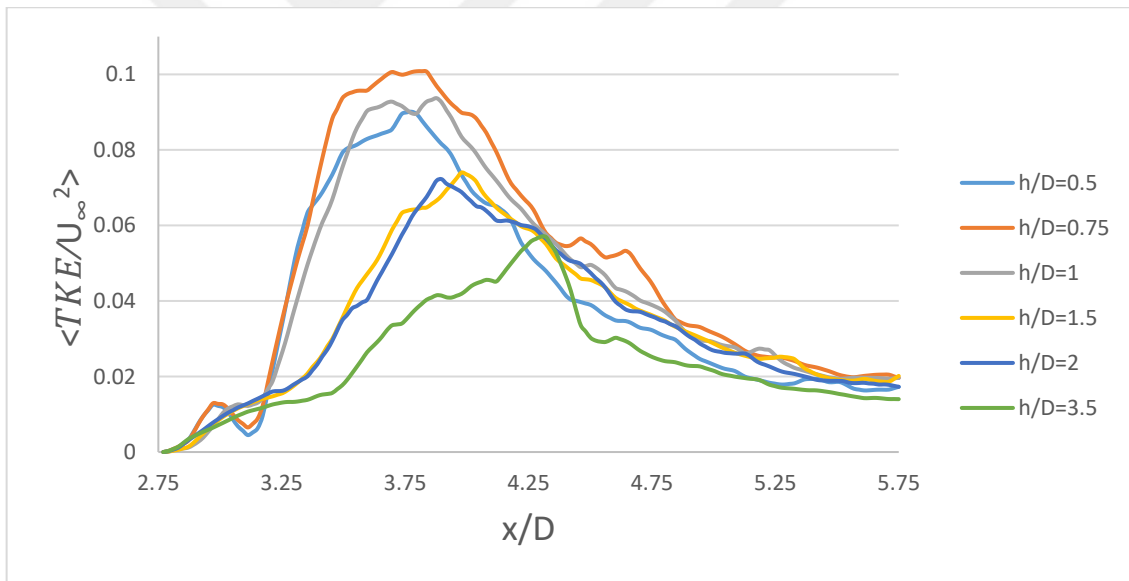


Şekil 4.52 Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=64000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenindeki çizgisel dağılımı

Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$, $Re=32000$ (Şekil 4.53) ve $Re=64000$ (Şekil 4.54) koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenindeki çizgisel dağılımı gösterilmiştir. Düşük Reynolds sayısındaki ($Re=32000$) TKE çalkantı değeri, yüksek Reynolds değerine ($Re=64000$) göre daha karmaşıktır. Burada birim zamandaki ortalama data sayısı 512 ile sınırlandırıldığı için çalkantılı değişimlerin birbiri ile etkileşim değerinin yeterince sönümlenmemesinden kaynaklandığı söylenebilir. Art izi boyunca TKE dağılımı, daldırma oranı arttıkça üniform akış şartlarında genel bir azalma eğilimi göstermektedir. Serbest yüzeye yakın bölgelerde maksimum TKE değerinin oluştuğu bölge kuyruk kısmına daha yakın oluşmuşken, daldırma oranının en yüksek değeri $h/D=3.5$ için TKE art izinin en uzağında ve en düşük değere sahip şekilde oluşmaktadır. Verilen sonuçlar sayısal değerlerin doğrulanmasına katkı sağlayabilecektir.



Şekil 4.53 Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=32000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenini üzerindeki çizgisel dağılımı



Şekil 4.54 Boy/en $L/D=5.5$ oranına sahip yarı-eliptik uçlu model için hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ve $Re=64000$ koşullarında, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ değer aralığında, zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenini üzerindeki çizgisel dağılımı

4.2. Kuvvet Ölçüm Deney Sonuçları

Bu çalışmada, kuvvet deneyleri kapsamında 40 mm ve 60 mm çaplı, küt firar kenarlı torpido benzeri modellerin iki farklı burun yapısı (eliptik ve yarı-eliptik) ve 40 mm çap için $L=220$ mm ve 320 mm uzunluklarının, 60 mm çap için $L=330$ mm ve 480 mm uzunluklarının kuvvet ölçümündeki etkileri araştırılmıştır. Akışın Reynolds sayıları 220 mm model ($L/D=5.5$) için $Re=1.2 \times 10^5$, $Re=2.4 \times 10^5$ ve $Re=3.6 \times 10^5$ olacak şekilde;

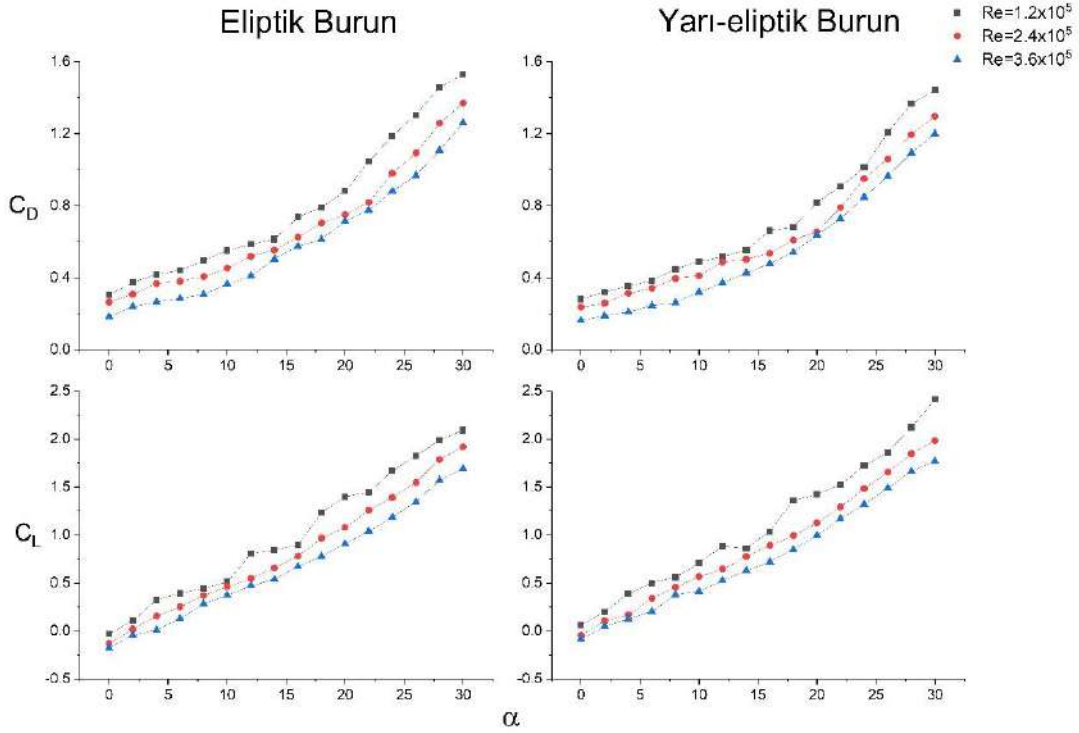
320 mm model ($L/D=8$) için $Re=2.4 \times 10^5$, $Re=3.6 \times 10^5$ ve $Re=4.8 \times 10^5$ olacak şekilde; 330 mm model ($L/D=5.5$) için yine $Re=2.4 \times 10^5$, $Re=3.6 \times 10^5$ ve $Re=4.8 \times 10^5$ olacak şekilde ve son olarak 480 mm model ($L/D=8$) için $Re=3.6 \times 10^5$, $Re=4.8 \times 10^5$, $Re=6.0 \times 10^5$ ve $Re=7.2 \times 10^5$ olacak şekilde rüzgâr türbininin ve kuvvet ölçüm sisteminin çalışma sınırları göz önüne alınarak belirlenmiş ve bu değerlerde kuvvet ölçüm verileri sağlanmıştır. Hücum açısı her model ve Reynolds sayısı için $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığında 2° aralıklarla ve uygun modeller (titreme ve kuvvet aşımı problemi oluşturmayan modeller) için 30° 'den sonra 10° aralıklarla 90° 'ye kadar değiştirilerek ölçüm alınmış ve her bir durum için aerodinamik kuvvetlerin değişimi araştırılmıştır. Kuvvet deneylerinden elde edilen sonuçlar ve yorumlar şu şekilde sıralanabilir:

Şekil 4.55'te $D=40$ mm ve $L=220$ mm ($L/D=5.5$), eliptik ve yarı-eliptik uçlu, küt kuyruklu modellerin $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı Reynolds sayısı değerlerinde kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları verilmiştir.

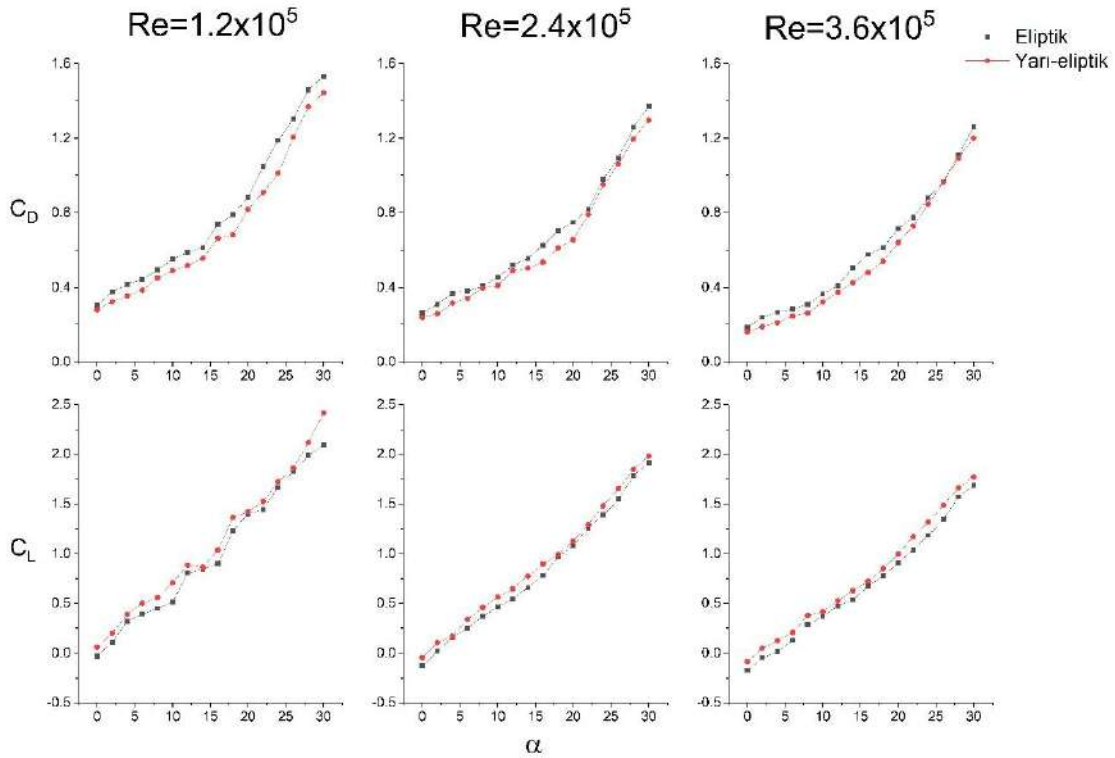
Şekil 4.56'da $D=40$ mm ve $L=220$ mm ($L/D=5.5$), küt kuyruklu modellerin $Re=1.2 \times 10^5$, $Re=2.4 \times 10^5$ ve $Re=3.6 \times 10^5$ değerlerinde $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı burun yapılarında kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları verilmiştir.

Söz konusu grafiklerde açıkça görülebilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

Şekil 4.55 ve 4.56'nın her ikisinde de açıkça eliptik ya da yarı-eliptik modeller fark etmeksizin C_D ve C_L değerleri, artan hücum açısı değerleri ile artış göstermiştir. Şekil 4.55 yardımıyla C_D ve C_L değerlerinin hem eliptik hem yarı-eliptik modelde Reynolds sayısı ile ters bağıntılı davrandığı görülmektedir. Yani, artan Reynolds değeri C_D ve C_L değerlerinin her ikisinde de düşüşe sebep olmuştur. Bunların haricinde Şekil 4.56'ya bakıldığında ise eliptik uçlu modelin C_D katsayısında ve yarı-eliptik modelin ise C_L katsayısında daha yüksek değerler verdiği görülecektir. Diğer bir deyişle; eliptik model, yarı-eliptik modele göre belirlenen hücum açısı aralığında ve Reynolds sayısı değerlerinde, daha yüksek C_D ve daha düşük C_L değerlerine sahiptir.



Şekil 4.55 $D=40$ mm ve $L=220$ mm ($L/D=5.5$), eliptik ve yarı-eliptik uçlu, küt kuyruklu modellerin $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı Reynolds sayısı değerlerinde kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları



Şekil 4.56 $D=40$ mm ve $L=220$ mm ($L/D=5.5$), küt kuyruklu modellerin $Re=1.2 \times 10^5$, $Re=2.4 \times 10^5$ ve $Re=3.6 \times 10^5$ değerlerinde $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı burun yapılarında kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları

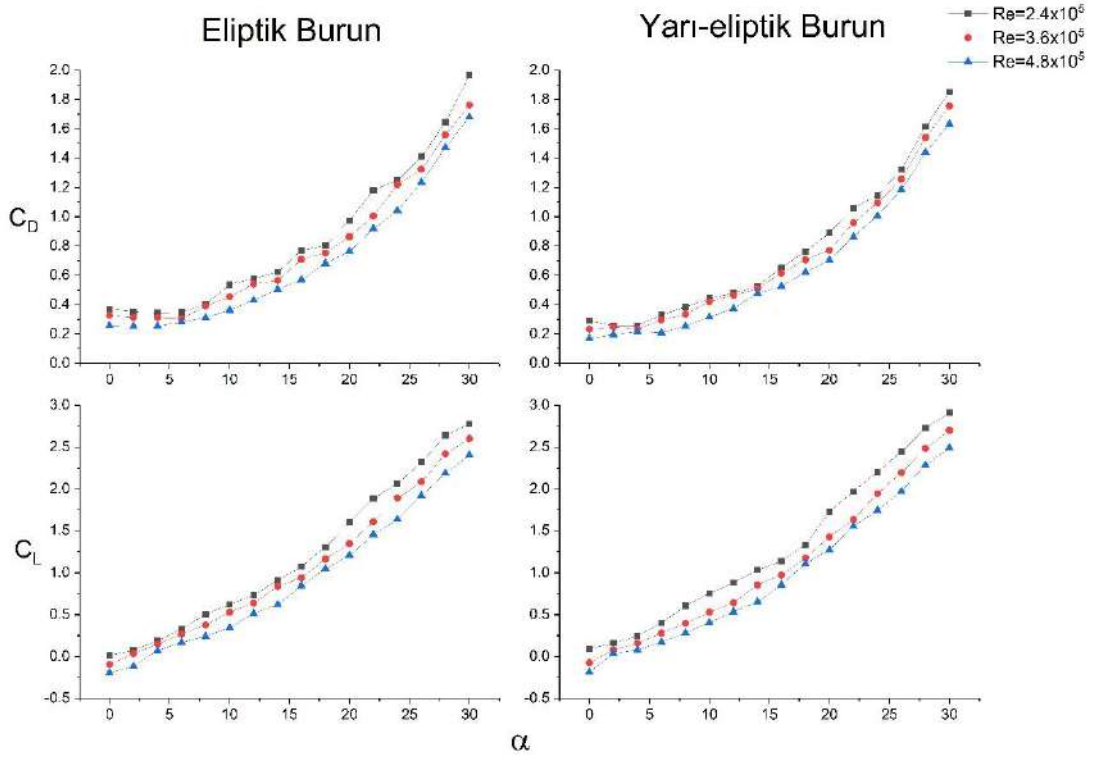
Şekil 4.57’de $D=40$ mm ve $L=320$ mm ($L/D=8$), eliptik ve yarı-eliptik uçlu, küt kuyruklu modellerin $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı Reynolds sayısı değerlerinde kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları verilmiştir.

Şekil 4.58’de $D=40$ mm ve $L=320$ mm ($L/D=8$), küt kuyruklu modellerin $Re=2.4 \times 10^5$, $Re=3.6 \times 10^5$ ve $Re=4.8 \times 10^5$ değerlerinde $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı burun yapılarında kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları verilmiştir.

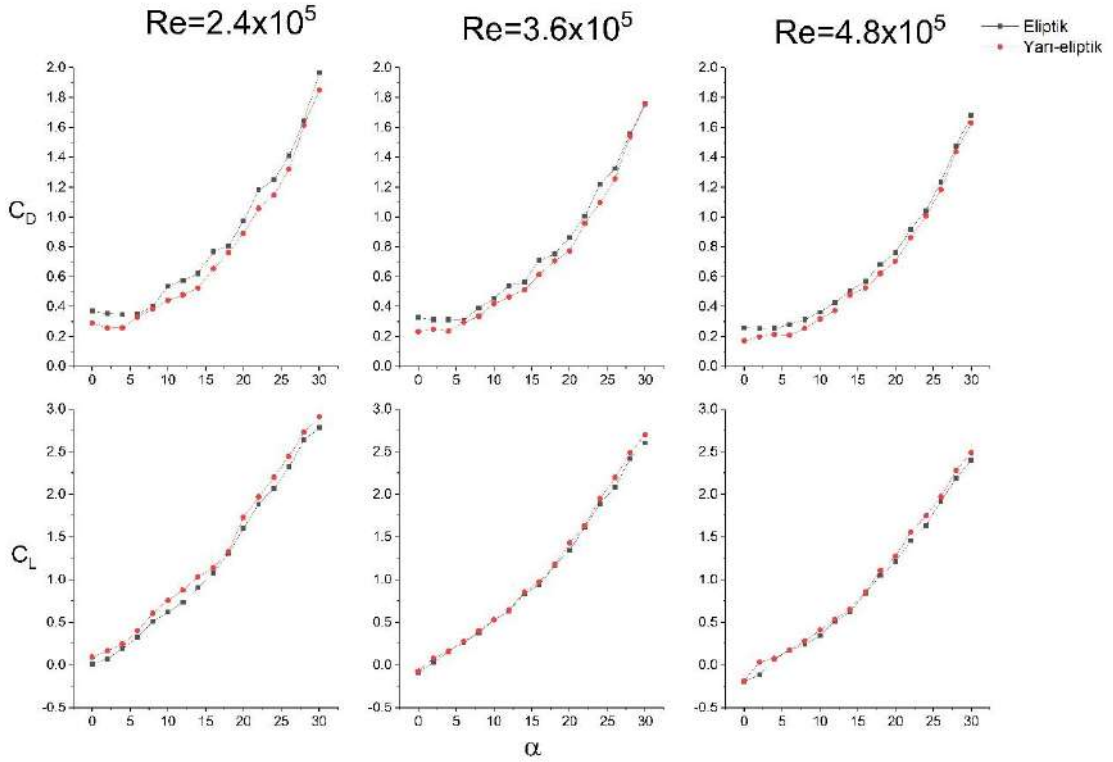
Bir önceki değerlendirmede (220 mm, $L/D=5.5$ olan modelde) de belirtildiği şekilde aynı paralellikteki sonuçlar bu şekillerde (320 mm, $L/D=8$ olan modelde) de gözlemlenebilmektedir. Yine kısaca sıralayacak olursak:

- Şekil 4.57 ve 4.58’nin her ikisine de göre, eliptik ya da yarı-eliptik modeller fark etmeksizin C_D ve C_L değerleri belirlenen aralıkta, artan hücum açısı değerleri ile artmaktadır.
- Şekil 4.57’e göre, C_D ve C_L değerleri hem eliptik hem de yarı-eliptik modelde, artan Reynolds değeri ile azalmıştır.
- Şekil 4.58’ye göre, eliptik uçlu model, yarı-eliptik uçlu modele kıyasla, belirlenen hücum açısı aralığında ve Reynolds sayısı değerlerinde, daha yüksek C_D ve daha düşük C_L değerlerine sahiptir.

Söz konusu sonuçlar, ölçüm yöntemleri tekniğine göre kesinlik konusunda net bir tutarlılık sergilemektedir. Aynı şekilde, literatürdeki benzer çalışmaların sonuçlarına göre de paralellik göstermektedir.



Şekil 4.57 $D=40$ mm ve $L=320$ mm ($L/D=8$), eliptik ve yarı-eliptik uçlu, küt kuyruklu modellerin $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı Reynolds sayısı değerlerinde kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları



Şekil 4.58 $D=40$ mm ve $L=320$ mm ($L/D=8$), küt kuyruklu modellerin $Re=2.4 \times 10^5$, $Re=3.6 \times 10^5$ ve $Re=4.8 \times 10^5$ değerlerinde $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı burun yapılarında kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları

Kuvvet ölçümü sonuçlarına göre, 220 mm ve 320 mm modellerde, C_D ve C_L katsayıları üzerinde belli aralıklarda hücum açısının etkisi, belli değerlerde Reynolds sayısının etkisi, iki farklı burun konisi şeklinin etkisi karşılaştırılan grafikler üzerinden yorumlanmıştır. İncelik parametresinin (L/D) söz konusu katsayılar üzerinde etkisini görebilmek için 220 mm ($L/D=5.5$) ve 320 mm ($L/D=8$) modeller karşılaştırılmalıdır. Eliptik uçlu modeller kendi arasında, yarı-eliptik uçlu modeller kendi arasında şu şekilde karşılaştırılmıştır:

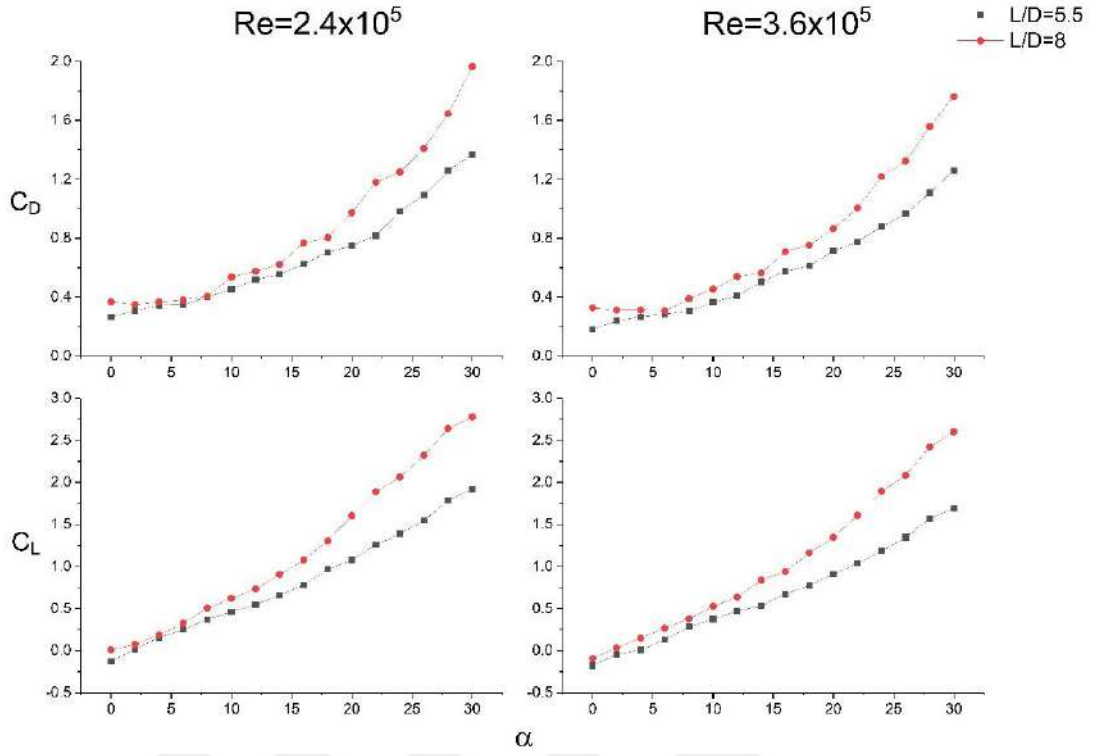
Şekil 4.59'da $D=40$ mm, eliptik burun yapılı, küt kuyruklu modellerin $Re=2.4 \times 10^5$ ve $Re=3.6 \times 10^5$ değerlerinde $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı en/boy oranlarındaki kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları verilmiştir.

Şekil 4.60'ta $D=40$ mm, yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu modellerin $Re=2.4 \times 10^5$ ve $Re=3.6 \times 10^5$ değerlerinde $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı en/boy oranlarındaki kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları verilmiştir.

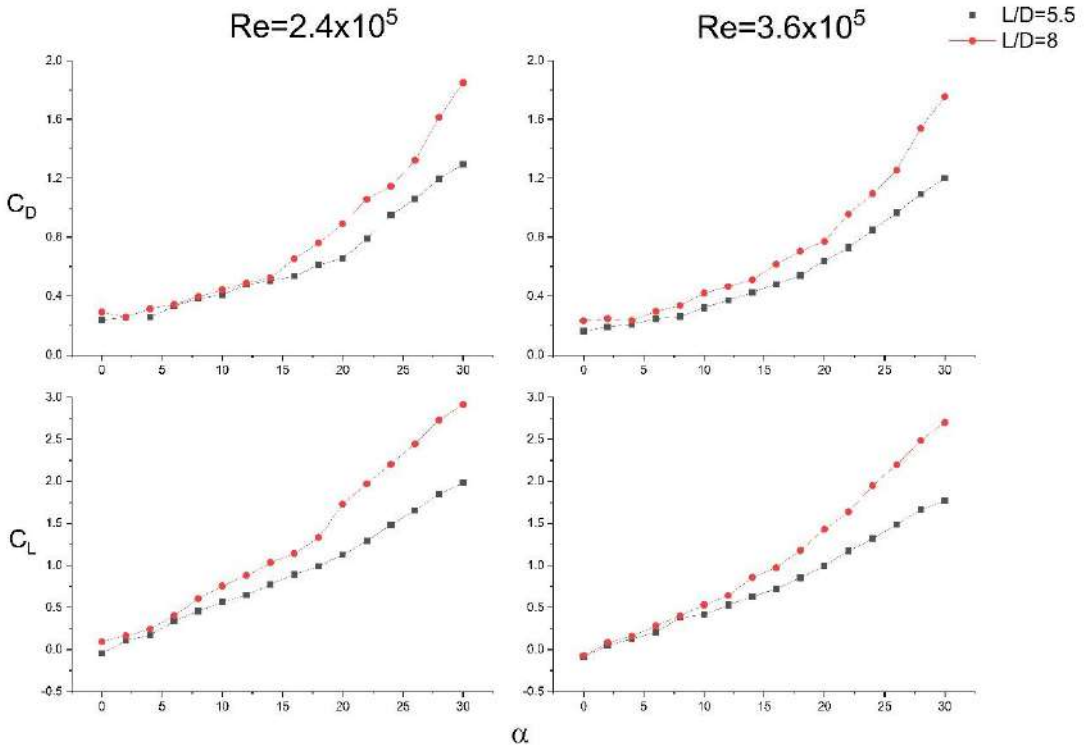
Yine basitçe söylemek gerekirse, Şekil 4.59 ve 4.60'taki her grafikte C_D ve C_L değerleri, belirlenen aralıkta hücum açısı arttıkça, artmaktadır.

$L/D=5.5$ ($L=220$ mm, $D=40$ mm) ve $L/D=8$ ($L=320$ mm, $D=40$ mm) modeller arasında farka gelince, incelik faktörü yüksek olan ($L/D=8$) model her durumda (eliptik ya da yarı-eliptik, $Re=2.4 \times 10^5$ ya da $Re=3.6 \times 10^5$ durumlarında) hem C_D hem de C_L katsayısı için daha yüksek değerler göstermiştir. Yani, daha ince model ($L/D=8$) diğer modele ($L/D=5.5$) kıyasla, belirlenen hücum açısı aralığında ve Reynolds sayısı değerlerinde, daha yüksek C_D ve C_L değerlerine sahiptir.

Söz konusu sonuçlar, literatürde aynı aralıkta çalışılan benzer çalışmaların sonuçlarına göre de paralellik göstermektedir (Phillips, 2010).



Şekil 4.59 $D=40$ mm, eliptik burun yapılı, küt kuyruklu modellerin $Re=2.4 \times 10^5$ ve $Re=3.6 \times 10^5$ değerlerinde $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı en/boy oranlarındaki kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları



Şekil 4.60 $D=40$ mm, yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu modellerin $Re=2.4 \times 10^5$ ve $Re=3.6 \times 10^5$ değerlerinde $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığındaki hücum açısına göre farklı en/boy oranlarındaki kuvvet ölçüm deneyleri sonucundan gelen C_D ve C_L katsayıları dağılımları

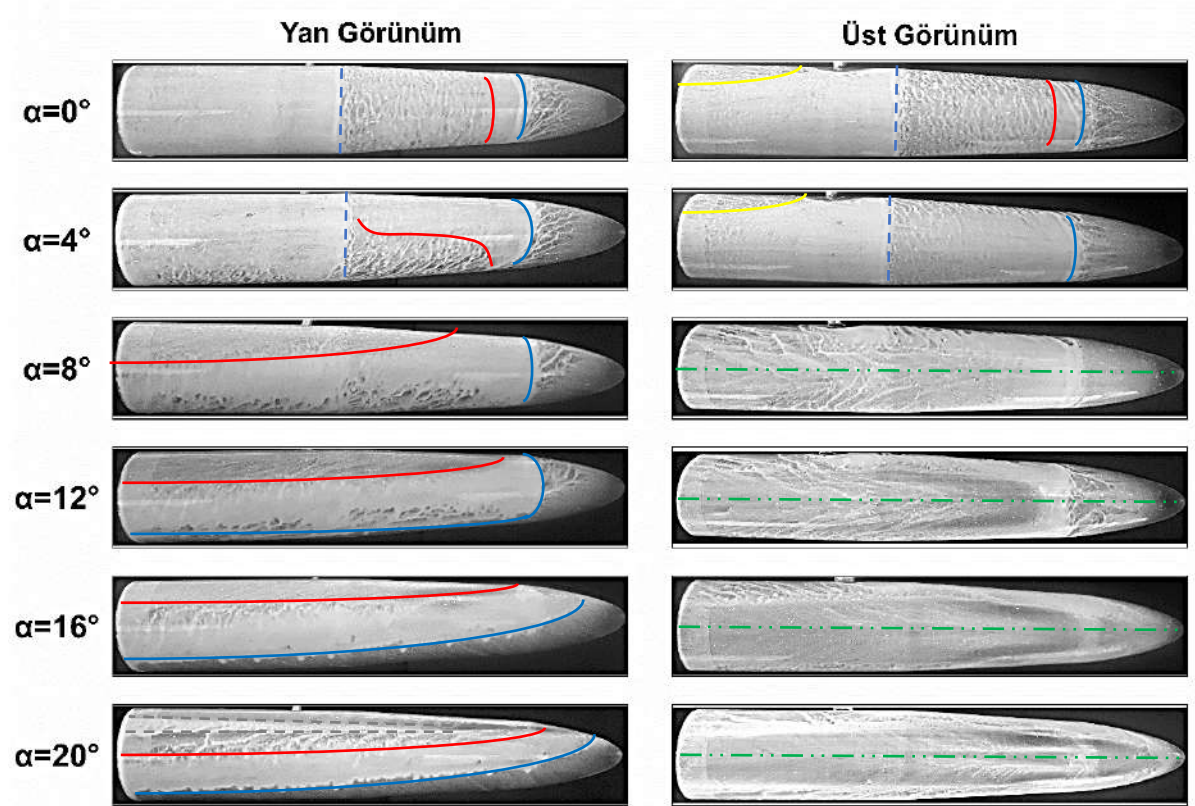
4.3. Yüzey Yağ, İplikçik ve Duman Tel Akış Görüntüleme Deney Sonuçları

Bu araştırmada, yüzey yağ akış görüntüleme deneyleri kapsamında 60 mm çaplı, küt firar kenarlı torpido benzeri modellerin iki farklı burun yapısı (eliptik ve yarı-eliptik) ve iki farklı uzunluk ($L=330$ mm ve 480 mm) değeri için akış görselleri incelenmiştir. Akışın Reynolds değeri $Re=4.8 \times 10^5$ ve modelin hücum açısı $\alpha=0^\circ-20^\circ$ aralığında olacak şekilde belirlenmiştir.

İplikçik akış görüntüleme deneylerinde 60 mm çaplı, küt firar kenarlı torpido benzeri modellerin iki farklı burun yapısı (eliptik ve yarı-eliptik) için çalışılmıştır. Akışın Reynolds değeri $Re=4.8 \times 10^5$ belirlenmiş ve modelin hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ile $26^\circ-50^\circ$ aralığında olacak şekilde ayarlanmıştır.

Duman tel akış görüntüleme deneylerinde 60 mm çaplı yarı-eliptik burun konili ve küt firar kenarlı torpido benzeri model kullanılmıştır. Akışın Reynolds değeri $Re=6.4 \times 10^4$ olarak ve modelin hücum açısı $\alpha=0^\circ-50^\circ$ aralığında olacak şekilde deneyler yapılmıştır.

Yüzey yağ, iplikçik ve duman tel akış görüntüleme deneylerinden elde edilen sonuçlar ve yorumlar şu şekilde sıralanabilir:



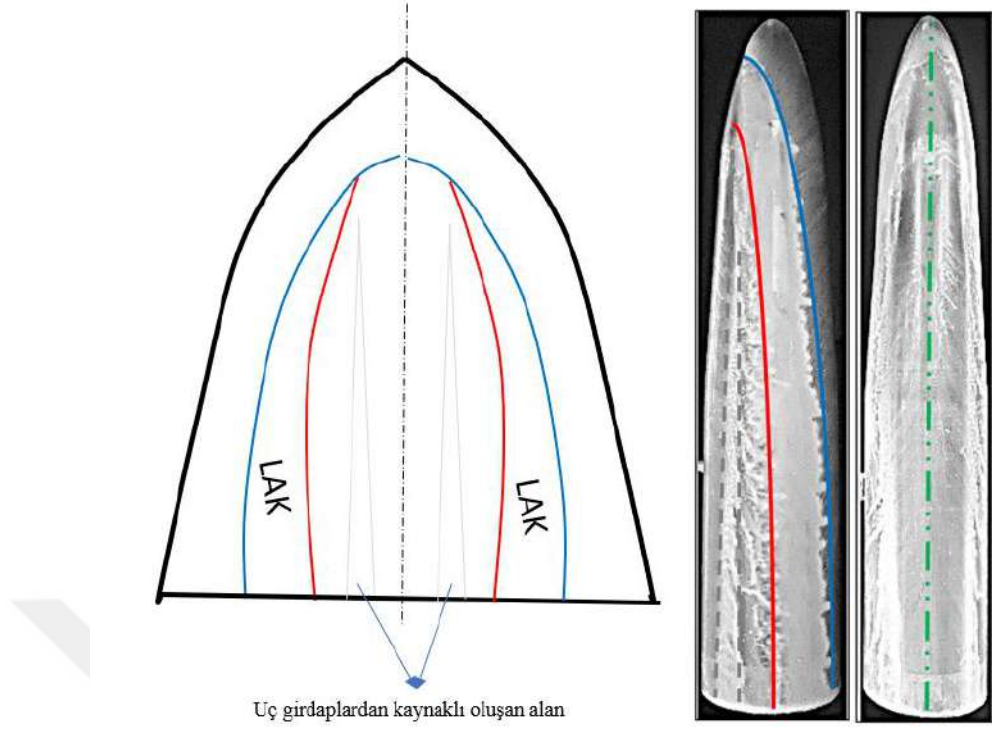
Şekil 4.61 $D=60$ mm, $L=330$ mm yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ hücum açısı aralığında yandan ve üstten yüzey yağ akış görüntülemesi

Şekil 4.61’de $L/D=5.5$ incelik oranına sahip yarı-eliptik uçlu modelin 0° - 20° arası hücum açılarındaki yan ve üst görünüşlerinden oluşan yüzey yağ akış görüntüleme sonuçları verilmiştir. Hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ’de, modelin burun kısmından itibaren yüzeyi takip eden akışın düz mavi ve kırmızı çizgilerle gösterilen bölgede biriktiği görülmüştür. Mavi çizgi hizasında laminer akış ayrılması oluşurken kırmızı çizgideyse türbülanslı tekrar tutunma gerçekleşmiştir. Arada kalan bölgede ise laminer ayrılma kabarcığı (LAK) benzeri yapı oluşmuştur. Kırmızı çizgi itibariyle akış, modelle tekrar temasa başlamış fakat bu temas çok güçlü ve düzenli olmadığından kısmi bir yüzey yağı süpürme işlemi olmuştur. Mavi kesikli çizgi ile gösterilen kısımdan itibaren ise akış tamamen ayrılmış ve arka uca kadar yeni bir temasa girmemiştir. Akışın model üzerindeki bu davranışının temel sebebi, yarı-eliptik uçlu modelin geometrisini belirleyen üç bölgeyi ayıran iki belirgin sınırdır. Akış ayrılması her iki durumda da tam olarak bu sınırlarda gerçekleşmiştir.

Hücum açısı $\alpha=4^\circ$ için, akış $\alpha=0^\circ$ durumunda olduğu gibi aynı yerden ayrılmış ve fakat modele üst bölgede tekrar tutunamamıştır. Bununla birlikte, modelin geometrisinden ve hücum açısından kaynaklı olarak modelin alt bölgesine tutunabilmiş ve iki çizgi arasında yüzey yağında belirgin bir süpürme işlemi gerçekleştirmiştir. İkinci akış ayrılması ile (kesikli mavi çizgiden sonra) bu etkinliğini bir miktar kaybetmiş ve söz konusu alt bölgede daha zayıf bir süpürme yapabilmıştır.

İlk iki durum için diğerlerine göre şeklin genelinde daha belirgin görünen dikkat edilecek bir diğer husus, sarı çizgi ile belirtilmiş bölgedir. Modelin üstten görüntüsünde tam olarak bağlantı çubuğunun hemen arkasında kalan bölgede, silindir bağlantı çubuğundan kaynaklı bir akış görüntüsü mevcuttur. Bu durum, akışın o bölgede bir miktar yığılmasından ve çubuğun akış içerisinde oluşturduğu girdaplardan kaynaklanmıştır. Yine bu bölgede düzenli girdap kopmalarından kaynaklı oluşan art izi bölgesi model üzerinde gözlemlenebilmiştir.

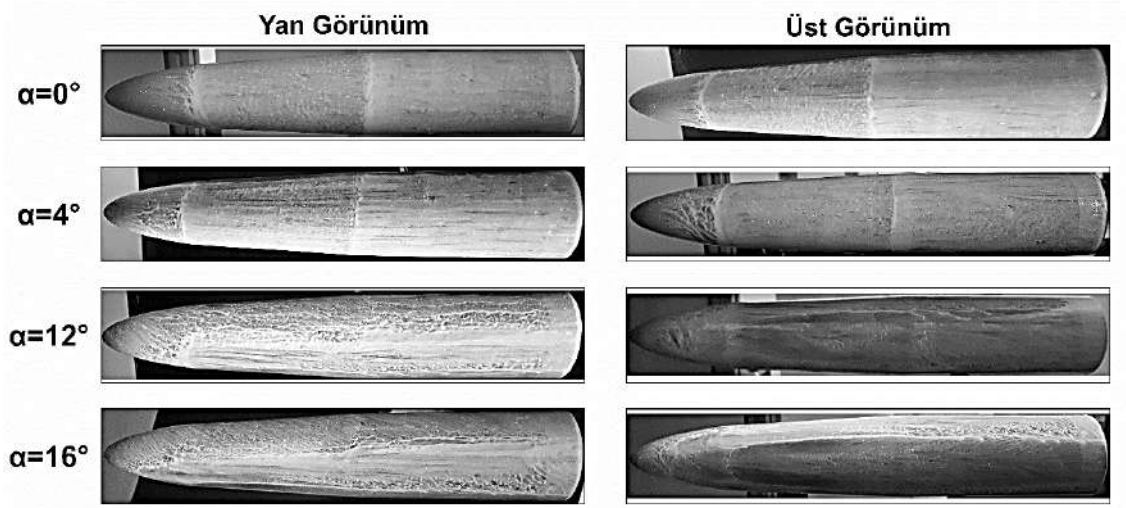
Hücum açısı $\alpha=8^\circ$ olduğunda atak açısının artmasından kaynaklı olarak modelin alt bölgesine temas eden akışın modelin çevresini dolanarak üst bölgeye (kırmızı çizginin yukarısı) tutunma durumunun başladığı görülebilir. Bununla birlikte akışın modelin üst bölgesinde simetrik bir akış yapısı oluşturduğu da bu açıdan sonra daha belirgin şekilde görülebilmektedir. $\alpha=8^\circ$, 12° , 16° , 20° atak açılarında modelin yan görünüm yüzeyinde mavi eğri ile gösterilen bölgede laminer akış ayrılması görülürken kırmızı eğri ile gösterilen bölgede türbülanslı tekrar tutunma görülmüştür. Bu mavi ve kırmızı eğriler arasında kalan bölge laminer ayrılma kabarcığı bölgesidir.



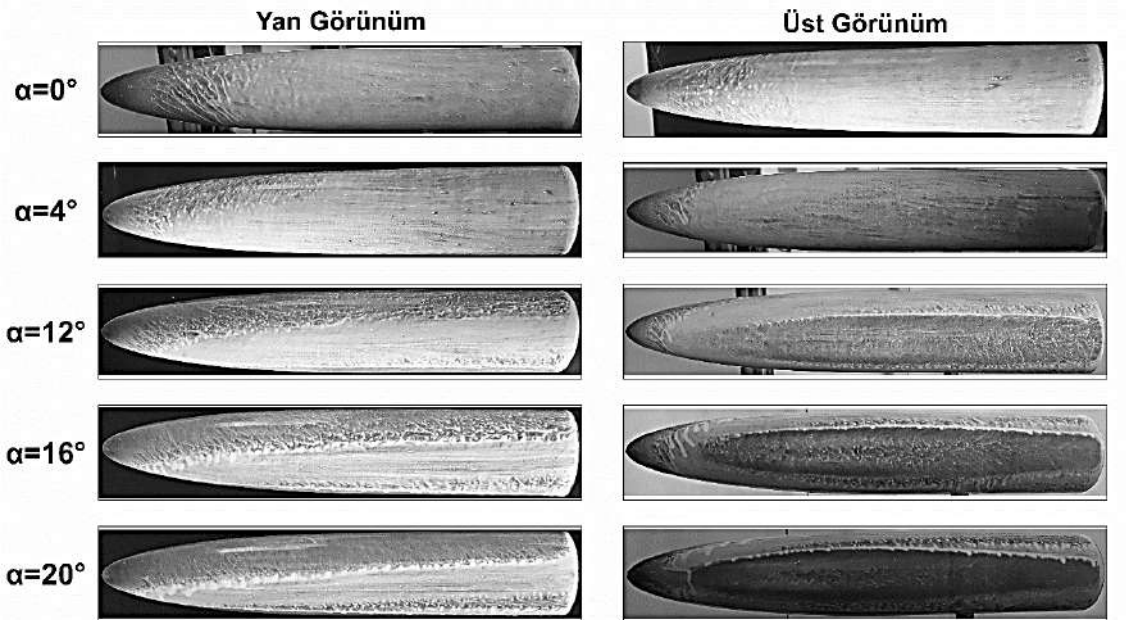
Şekil 4.62 D=60 mm, L=330 mm yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, $\alpha=20^\circ$ hücum açısında üst görünümünden çizgilerin detaylı gösterimi

Hücum açısının $\alpha=12^\circ$, 16° ve 20° olduğu durumlar için, akış ayrılmasının hücum açısının artışıyla üst bölgede buruna her seferinde daha fazla yaklaştığı kolayca görülmektedir. Bununla birlikte, yine modelin altına çarpan akış dairesel yörüngede modelden ayrılarak modelin üst bölgesinde tekrar modele tutunmuş ve modelin aksenal simetrik geometrisinden kaynaklı olarak tekrar yanlara ayrılarak modelin ayrılma kenarına doğru devam etmiştir. Modelin üst bölgesinde bu birleşme-ayrılma işleminden dolayı iki boyutlu incelemelerdeki durma noktası benzeri bir durma çizgisi fenomeni oluşmuştur (yeşil kesikli çizgiler). Bu çizgi doğal olarak modelin üst yüzeyindeki simetrik görüntünün simetri eksenini oluşturmuştur. Hücum açısı $\alpha=20^\circ$ 'de diğerlerinden farklı olarak bir ara bölgenin (kesikli siyah çizgilerle gösterilen bölge) de oluşmasına, açının ciddi miktarda yükselmesiyle birlikte güçlenen uç girdapların sebep olduğu düşünülmektedir.

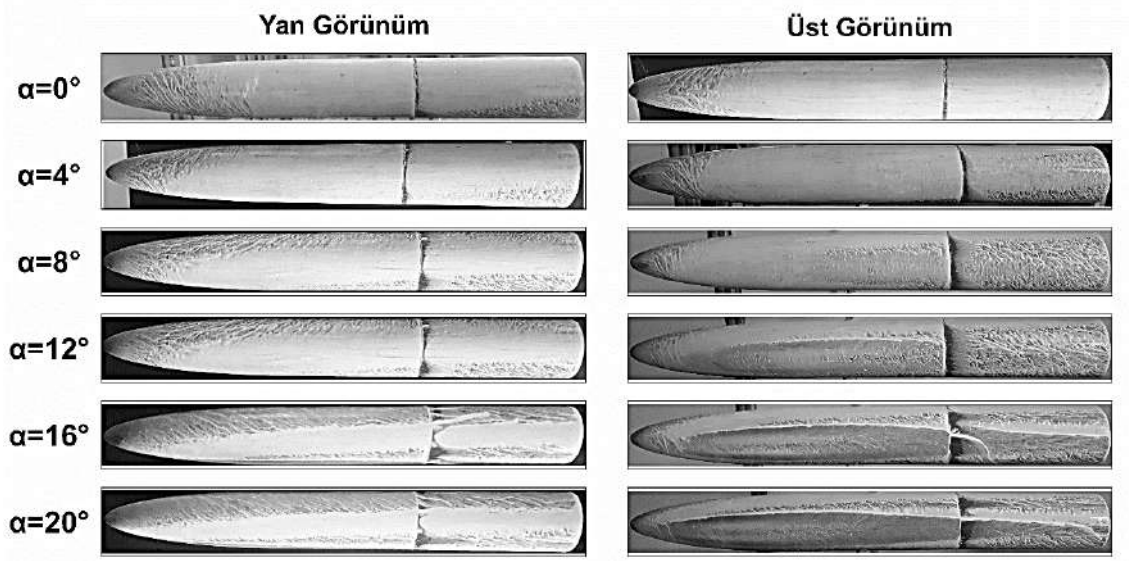
Şekil 4.61'de, genel olarak görsellerde dikkat çeken bir nokta da modelin altına doğru yağın sarkma yapması durumudur. Bu durum, deneysel sistem durdurulduktan sonra görüntü alındığı ve bu iki durum arasında bir miktar zaman geçtiği için yüzey yağında yer çekimi yönünde akma oluşmasından kaynaklıdır.



Şekil 4.63 $D=60$ mm, $L=330$ mm yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, $0^\circ < \alpha < 16^\circ$ hücum açısı aralığında yüzey yağ akış görüntülemesi

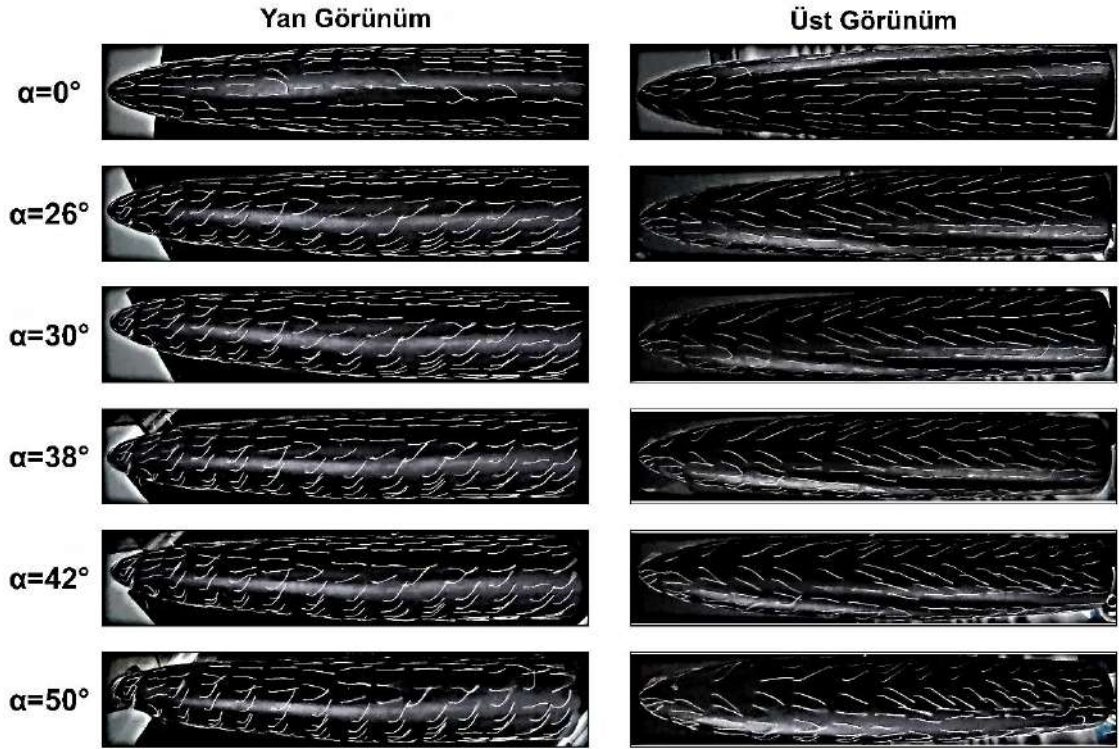


Şekil 4.64 $D=60$ mm, $L=330$ mm eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ hücum açısı aralığında yüzey yağ akış görüntülemesi



Şekil 4.65 D=60 mm, L=480 mm yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ hücum açısı aralığında yüzey yağ akış görüntülemesi

Şekil 4.63, 4.64 ve 4.65'te sırasıyla, $L/D=5.5$ boy/en oranına sahip yarı-eliptik uçlu model ($L=330$ mm, $D=60$ mm), $L/D=5.5$ boy/en oranına sahip eliptik uçlu model ($L=330$ mm, $D=60$ mm) ve $L/D=8$ boy/en oranına sahip eliptik uçlu modelin ($L=480$ mm, $D=60$ mm) rüzgâr tüneline modelin altından bağlamak suretiyle söz konusu hücum açılarında, yüzey yağ görüntüleme tekniği ile alınmış deney sonuçlarına yer verilmiştir. Öncesinde, $L/D=5.5$ boy/en oranına sahip yarı-eliptik uçlu modelin ayrıntılı incelemesi yapıldığı için aynı tespitler tekrar edilmeyecektir. Bununla birlikte, eliptik burun konisine sahip modelde, daha önce yarı-eliptik modelde belirtilen geometriden kaynaklı belirgin kırılma noktaları oluşmadığı için akışın söz konusu iki kırılma bölgesinde özellikle ayrılması gibi bir durum söz konusu olmamış ve akış burundan itibaren modele daha fazla tutunarak ilerleyebilmiştir. Uzun modelde ise akışın değişmesini gerektirecek bir duruma rastlanmamış, uzaklaşan ayrılma kenarından dolayı şekilsel bir bozulma olmaksızın ayrılma kenarına kadar yüzey görüntüsünü devam ettirmiştir. Sadece, modelin uzaması için arka tarafına eklem yapıldığı için, bu eklem bölgesinde akışta özellikle duraklama meydana gelmiş ve sadece bu bölgeden kaynaklı bir farklılık gözlemlenebilmiştir.

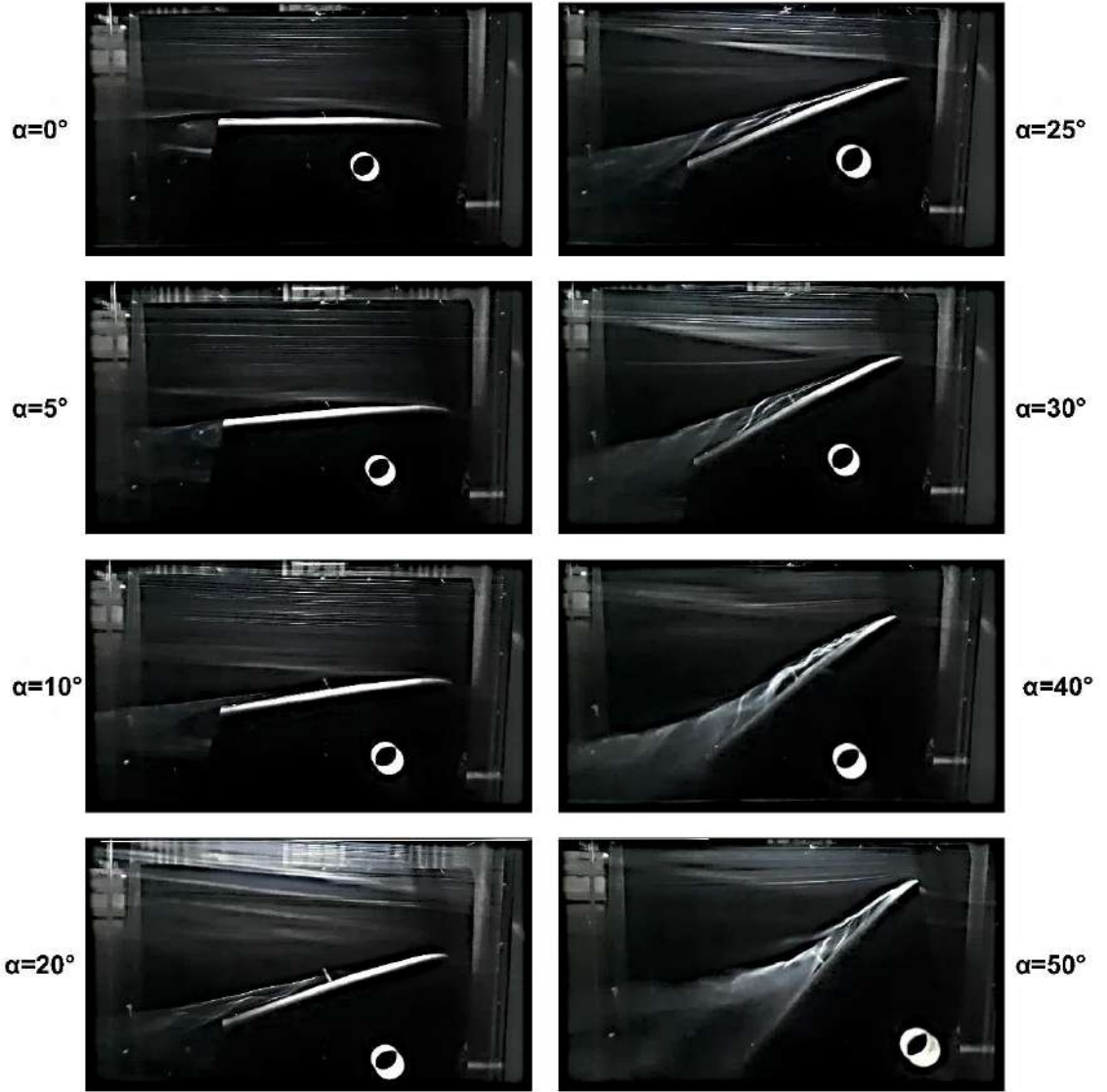


Şekil 4.66 D=60 mm, L=330 mm yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, 0° ve $26^\circ < \alpha < 50^\circ$ hücum açısı aralığında iplikçik akış görüntülemesi



Şekil 4.67 D=60 mm, L=330 mm eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, 0° ve $26^\circ < \alpha < 50^\circ$ hücum açısı aralığında iplikçik akış görüntülemesi

Şekil 4.66 ve 4.67’de, $L/D=5.5$ oranında sırasıyla yarı-eliptik ve eliptik burun yapılı modeller üzerinde uygulanan iplikçik deney görüntüleri bulunmaktadır. Sonuçlar, model çapının düşük olması, düşük hücum açılarında akış yapısı oluşumunun gözlenememesi ve yine düşük atak açılarında iplikçik uzunluklarının akış şekillerinin oluşum mesafesine kıyasla uzun kalması dolayısıyla açısal değişimlerin yeterli farklılıkları oluşturamamasından ötürü yüzey yağ görüntüleme sonuçlarıyla karşılaştırıldığında çok zayıf kalmakta ve iplikçiklerin yöneliminden sadece akışın yönüne dair kabaca çıkarımlar yapılabilmektedir. Bu sebeple hem düşük hem de yüksek atak açılarında deney modellerinin yüzeyi etrafında oluşan akış yapılarının daha belirgin şekilde elde edildiği yüzey yağ akış görüntüleme deneylerine ağırlık verilmiştir.



Şekil 4.68 $D=60$ mm, $L=330$ mm yarı-eliptik burun yapılı, küt kuyruklu model üzerinde $Re=4.8 \times 10^5$ değerinde, 0° ve $26^\circ < \alpha < 50^\circ$ hücum açısı aralığında duman tel akış görüntülemesi

Duman deneyinde de iplikçik deneyine benzer şekilde, model çapının düşük olması ve rüzgâr türbininin minimum çalışma frekansı değerlerindeki kısıtlamadan dolayı çok verimli görseller elde edilememiş olmasıyla birlikte dikkatli incelendiğinde birkaç nokta fark edilebilmektedir. Hücum açısı $\alpha=0^\circ$ için, modelin art izinde simetrik bir yapının olduğu görülebilmektedir. Bu simetrik yapı hücum açısının artmasıyla birlikte açı yönünde kayma göstermiş ve art izinin üst bölgesinde bir de odak bölgesi görülebilmektedir. Hücum açısının artmasıyla birlikte modelin burun etkisiyle oluşturduğu uç girdap etkisi güçlenmiş ve daha kolay gözlemlenebilir bir hâl almıştır. Ek olarak, yüksek açılarda bu girdap, modelin üst yüzeyini tamamen etkisi altına almış ve hücum açısı $\alpha=50^\circ$ için modelin burnundan kaynaklı ikinci bir uzanımın daha oluşmaya başladığı görülmüştür.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Yapılan tez çalışmasında, PIV ve boya deneylerindeki tüm durumların $Re=32000$ ve 64000 Reynolds sayısı değerleri için, $0.5 \leq h/D \leq 3.5$ daldırma oranı ve $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ ve 12° hücum açısı değerleri için, farklı burun yapısı (eliptik ve yarı eliptik) ve farklı model uzunluklarında ($L=220$ mm ve 320 mm), PIV ve boya deney düzenekleri oluşturularak deneyleri alınmış ve sonrasında, bilimsel data çıkarma ve akış görselleştirme amacıyla gerçekleştirilen prosesler neticesinde elde edilen sonuçların ayrıntılı incelemesi yapılmış ve sonuç olarak, model üzerindeki ve art izi bölgesindeki akış yapısındaki değişimler belirlenmiştir.

Söz konusu tez çalışması kapsamında yapılan akış görselleştirme çalışmalarının sonuçları göstermiştir ki, geometrilerin burun kısmından başlayarak gelişen kayma tabakası küt kuyruk kısmının alt ve üst uçlarından art izi bölgesine uzanmıştır. Geometrinin alt ve üst kayma tabakalarından uzanan bu akışların etkileşimi ile düzenli girdap dökülmeleri gözlemlenebilmiştir. Ayrıca art izi bölgesi ile karşılaştırıldığında, modelin burun bölgesindeki kontur seviyelerinin sönük kalması bu bölgedeki girdap etkileşiminin daha zayıf kaldığını göstermektedir.

Daldırma oranının düşük olduğu ($h/D=0.50$ ve 0.75) yüzeye yakın bölgelerde, serbest yüzeyin etkisi daha yoğun hissedilmekte ve art izi serbest yüzey etkisinde formunu almaktadır. Dolayısıyla, art izindeki akış yapısı alt kayma tabakasının ve yine bu tabakadan dökülen girdapların etkisinde kalmıştır. Üst bölgedeki akışın sıkışarak hızlanması sonucunda üst kayma tabakasından gelen akışa jet etkisine benzer bir nitelik kazandırmıştır. Bu derinliğin düşük olduğu bölgelerde art izindeki akış yapısı, geometrinin yatay merkez çizgisine göre asimetric bir görsel oluşturmuştur. Daha derin daldırma oranlarında ($h/D \geq 1.00$) bu serbest yüzey etkisi azaldığı için daha simetric bir akış yapısı elde edilmiştir. Hücum açısının arttığı durumlar da ele alındığında, özellikle $h/D=1.00$ daldırma oranında, modelin kalkan burun kısmının serbest bölgeyle direkt etkileşimi oluşmuş ve yine bu bölgedeki akış yoğun serbest yüzey etkisine maruz kalmıştır. Dolayısıyla, tez çalışmasındaki açılı durumlar da hesaba katıldığında, serbest yüzey etkisinin daldırma oranının $h/D < 1.50$ olduğu derinliğe kadar akış formasyonu üzerinde aktif rol oynadığı söylenebilir. Ayrıca artan daldırma oranı ile birlikte üniform akış şartlarına yaklaşıldığından dolayı, genel itibariyle, kayma tabakalarının etkileşiminden doğan maksimum ve minimum değerlerin şiddetinde azalmalar

görülmüştür. Aynı zamanda serbest yüzey etkisi azaldıkça modelin art bölgesinde von Karman girdap yapısı belirgin ve gözlemlenebilir hale gelmiştir. Daldırma oranı değişimi; farklı burun yapılarında (eliptik ve yarı-eliptik), farklı Reynolds değerlerinde (32000 ve 64000), farklı incelik oranlarında ($L/D=5.5$ ve 8) ve farklı hücum açılarında (0° , 4° , 8° ve 12°) aynı tür etkilere sebep olmuştur.

Reynolds sayısının değişimi de akış karakteristiğinde önemli değişiklikler meydana getirmiştir. Reynolds sayısının daha yüksek olduğu $Re=64000$ değerinde serbest akışın art izine momentum aktarımı yükseldiği için, $Re=32000$ değerindekilere göre kritik noktalar ve kontur seviyeleri art izinde modelin kuyruğuna daha yakın bölgede oluşmuş ve daha yüksek değerlere ulaşabilmiştir. Dolayısıyla, artan Reynolds değeri ile art izi boyutları kısalmıştır. Ayrıca, Reynolds sayısının artışı ile akış boyunca artan momentum ve enerji taşınımı sonucunda art izindeki girdap yapılarının azaldığı ve küçüldüğü belirlenmiştir. Reynolds sayısı değerinin değişimi; farklı burun yapılarında (eliptik ve yarı-eliptik), farklı daldırma oranlarında ($h/D=0.50$, 0.75 , 1.00 , 1.50 , 2.00 ve 3.50), farklı incelik oranlarında (5.5 ve 8) ve farklı hücum açılarında (0° , 4° , 8° ve 12°) benzer etkilere sebep olmuştur.

Hücum açısının artması ile akışın geometri yüzeyinden daha erken ayrıldığını ilk bakışta söylemek mümkündür. Ayrıca hücum açısı artışının, art izinde hücum açısı yönünde asimetriye sebep olduğu görülmektedir. Öyle ki, model açısız durumdayken ve serbest yüzeyin yoğun etkisinde ($h/D \leq 1.00$) değilken, art izinde görülen odak çiftleri (F_1 ve F_2); modele burnu yukarı kalkacak şekilde hücum açısı verilmesiyle, aynı yönde tek bir odak noktası şeklinde oluşum sergilemiştir. Hücum açısı değerinin artmasıyla, art izindeki maksimum ve minimum değerlerin ve genel kontur değerlerinin şiddetlendiği görülmektedir. Dolayısıyla, hücum açısı artışının, art izindeki çalkantıyı da artırdığı söylenebilir. Bununla birlikte, $h/D=0.50$ ve 0.75 daldırma oranı değerlerinde zayıf kalan üst kayma tabakası etkisi hücum açısının artmasıyla birlikte daha baskın hale gelmiştir. Bunun yanında özellikle $h/D=1.00$ civarında modelin burun bölümü serbest yüzey etkisinde kalmıştır. Hücum açısının değişimi; farklı burun yapılarında (eliptik ve yarı-eliptik), farklı daldırma oranlarında ($h/D=0.50$, 0.75 , 1.00 , 1.50 , 2.00 ve 3.50), farklı incelik oranlarında (5.5 ve 8) ve farklı Reynolds değerlerinde (32000 ve 64000) aynı tür etkilere sebep olmuştur.

Deneyler boyunca değişen bir diğer parametre incelik (boy/çap) oranıdır. L/D oranının artması, art izi bölgesinin modelin arka kısmından daha uzağa doğru genişlemesine sebep olmuştur. Aynı şekilde, art izindeki odak noktaları ve diğer

ekstramum noktalar modelin arka bölgesinden daha uzakta oluşmuşlardır. Bununla birlikte, modelin incelik oranının 5.5'tan 8'e çıkmasıyla art izindeki kontur şiddetleri ve maksimum minimum değerleri azalmıştır. Boy/çap oranının değişimi; farklı burun yapılarında (eliptik ve yarı-eliptik), farklı daldırma oranlarında ($h/D=0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00$ ve 3.50), farklı hücum açılarında ($0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ ve 12°) ve farklı Reynolds değerlerinde (32000 ve 64000) aynı tür etkilere sebep olmuştur.

Modelin burun yapısının değişimiyle de akış yapısında belirli farklılıklar görülmüştür. Yarı-eliptik burun yapısına sahip modelin art izindeki kontur değerleri, eliptik burun yapısına sahip modele göre, çalışmada proses edilen parametreler için belirlenen aralıklarda, daha şiddetli çıkmıştır. Bu durum, yarı-eliptik burunlu modelin çevresinde daha yoğun girdaplı bir akışın olduğunu da göstermektedir. Modelin burun yapısının değişiminin; iki incelik oranında ($L/D=5.5$ ve 8), altı daldırma oranında ($h/D=0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00$ ve 3.50), dört hücum açısında ($\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ ve 12°) ve yine Reynolds sayısının iki değerinde ($Re=32000$ ve 64000) geometri çevresindeki akış yapısını etkilediği ve bu etkileşimin serbest yüzeyden uzaklaştıkça azaldığı, simetrik olmayan akış yapısının sıfır derece hücum açısında simetriğe yaklaştığı, yüksek açılarda ise sonuçların benzer olduğu gözlemlenmiştir.

Yarı-eliptik uçlu modelin açısız durumları için, Reynolds $Re=32000$ ve 64000 değerlerinde daldırma oranı $0.5 < h/D < 3.5$ aralığında değiştirilerek zaman ortalamalı akım yönündeki hız bileşeni değerlerinin, zaman ortalamalı akım yönüne dik yöndeki hız bileşeni türbülans çalkantı değerlerinin ve zaman ortalamalı türbülans kinetik enerji değerlerinin geometrinin art izinde yatay simetri eksenine boyunca dağılımı incelenmiştir. $Re=32000$ değerinde, $Re=64000$ değerindekilere oranla daha dalgalı eğriler elde edilmiştir. Bu durumun sebebi olarak birim zamanda alınan data sayısının düşük olması sebebiyle, bu değerlerin ortalama değerleri oluştururken sönümlenme etkisinin zayıf kalması olarak açıklanabilir. Reynolds sayısının artışı ile girdap oluşum uzunluğu azalmış ve durma noktası modele yaklaşmıştır. Ayrıca moment aktarımının daha yüksek olmasından dolayı, yüksek Reynolds değerinde akışın toparlanma eğilimi de daha yüksek olmuştur. İncelenen değerlerde, daha derine, uniform akışa doğru gidildikçe daha stabil bir dağılım görülmektedir. Ayrıca daldırma oranı arttıkça maksimum değerler daha uzakta ve daha düşük şiddette oluşmuştur. Alınan sonuçlar HAD analizlerini doğrulama amacıyla kullanılabilir ve bu sonuçlara HAD ile daha fazla Reynolds değerinden faydalanılarak ek yapılabilir.

Ek olarak bu araştırmada, kuvvet ölçüm deneylerinde her bir model için model geometrisi ve rüzgâr tünelinin performans sınırları gözetilerek $Re=1.2 \times 10^5 - 7.2 \times 10^5$ aralığında Reynolds sayısı değerleri seçilmiştir. Deneylerde iki farklı burun yapısı (eliptik ve yarı eliptik), iki farklı çap uzunluğu ($D=40$ mm ve 60 mm) ve iki farklı uzunluk/çap değeri ($L/D=5.5$ ve 8) literatür araştırması ile belirlenmiştir. Hücum açısı, $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığında 2° aralıklarla ve 30° 'den sonra 10° aralıklarla 90° 'ye kadar değiştirilerek ölçüm alınmış ve tüm bu parametrelerin sıralı ve aşamalı farklılığı sonucundaki aerodinamik kuvvetlerin değişimi araştırılmıştır.

Kuvvet deneyi sonuçlarına göre hücum açısı arttıkça söz konusu modeller için $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ aralığında C_D ve C_L değerleri de artış göstermiştir. Reynolds sayısı artışı ise tersine bir etki yapmış ve C_D ve C_L değerlerinde düşüş meydana getirmiştir. Bunun yanında, aynı durumlar için eliptik uçlu modelin daha yüksek C_D ve yarı-eliptik modelin daha yüksek C_L katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca L/D incelik oranı yüksek olan ($L/D=8$) model eşit durumlarda incelik oranı $L/D=5.5$ olan modele kıyasla daha yüksek C_D ve C_L değerlerine sahiptir.

Rüzgâr tüneline kuvvet ölçüm deneylerine ek olarak yüzey yağ, iplikçik ve duman tel akış görüntüleme deneyleri de yapılmıştır. Yüzey yağ akış görüntüleme deneylerinde 60 mm çaplı modeller için iki farklı burun yapısı (eliptik ve yarı-eliptik) ve iki farklı uzunluk ($L=330$ mm ve 480 mm) değeri kullanılmıştır. Akışın Reynolds değeri $Re=4.8 \times 10^5$ ve modelin hücum açısı $\alpha=0^\circ - 20^\circ$ aralığında olacak şekilde ele alınmıştır. İplikçik akış görüntüleme deneylerinde yine 60 mm çaplı modellerin iki farklı burun yapısı (eliptik ve yarı-eliptik) için çalışılmıştır. Akışın Reynolds değeri $Re=4.8 \times 10^5$ belirlenmiş ve modelin hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ile $26^\circ - 50^\circ$ aralığında olacak şekilde ayarlanmıştır. Duman tel akış görüntüleme deneylerinde ise 60 mm çaplı ve yarı-eliptik burun konili model kullanılmıştır. Akışın Reynolds değeri $Re=6.4 \times 10^4$ olarak ve modelin hücum açısı $\alpha=0^\circ - 50^\circ$ aralığında olacak şekilde deneyler tekrarlanmıştır.

Rüzgâr tüneline uygulanan söz konusu görselleştirme deneylerinin sonucunda iplikçik ve duman tel akış görselleştirmede çeşitli sebeplerden dolayı beklenen sonuç alınamamış, ağırlık yüzey yağ akış görselleştirme deneylerine verilmiştir. Söz konusu sebepler; iplikçik için model çapının düşük olması, düşük hücum açılarında akış yapısı oluşumunun gözlenememesi ve iplikçik uzunluklarının akış şekillerinin oluşum mesafesine kıyasla uzun kalması; duman tel için model çapının düşük olması ve rüzgâr türbininin minimum çalışma frekansı değerlerindeki kısıtlamalar şeklinde sıralanabilir. İplikçik deneylerinde akışın yönüne dair kaba çıkarımlar yapılabilmekte, duman

deneysinde ise art izindeki simetrik/asimetrik yapılar, uç girdapların hücum açısının artışı ile güçlenmesi gözlemlenebilmektedir. Yüzey yağ akış görüntüleme deneylerinde ise modeller üzerindeki yüzey yağının şeklinden detaylı olarak akışın ayrılma noktaları, durma noktaları, laminer ayrılma kabarcığı bölgeleri ve bunların hücum açısı ile değişimi incelenebilmiştir.

5.2 Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar savunma sanayisine yönelik araştırmaların doğrulanması ve tasarımına katkı sağlayacak kaynak oluşturabilir.

Yapılan deney ve proseslerin her biri için HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) çalışmaları ile de desteklenerek çift taraflı doğrulanmış sonuçlar oluşturulabilir. Gerçek şartlara daha yakın yüksek Reynolds sayıları ve Mach sayılarında da HAD analizleri yapılabilir.

Sisteme pasif veya aktif akış kontrol yöntemlerinden bazıları eklenerek daha optimum modeller için yeni çalışmaların önü açılabilir.

Süpersonik rüzgâr tüneli gibi daha yüksek Reynolds değerlerinde deney alınabilen sistemler kullanılarak, daha yüksek Reynolds sayılarının akış karakteristiğine etkileri araştırılabilir.

Modelin burnunun veya arka kenarının şekli değiştirilerek daha az enerji kayıplı modeller elde edilebilir.

Modele kanard, kanat veya kuyruk eklemesi yapılarak akış karakteristiği üzerindeki etkileri incelenebilir.

Art izindeki akış ayrılma etkisini azaltmak ve taşıma kuvveti oluşturmak amacıyla akış ayırıcı plaka (splitter plate) uygulaması yapılabilir.

İncelenen geometrinin prototip üretimi yapılarak gerçek su altı şartlarında araştırma faaliyetleri geliştirilebilir.

Çizgisel data çalışması genişletilerek daha ayrıntılı sonuçlar elde edilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Alijani, M., Zeinali, M. ve Nouri, N.M., 2018. Designing of the body shape of an autonomous underwater vehicle using the design of experiments method, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(18).
- Allston, T., Munroe, J., Lewis, R., Mouland, D., Xu, J. ve Walker, D., 2014. Predicting the wake behind a large AUV hydrofoil, *Methods in Oceanography*, 10, 166-177.
- Alvarez, A., Bertram, V. ve Gualdesi, L., 2009. Hull hydrodynamic optimization of autonomous underwater vehicles operating at snorkeling depth, *Ocean Eng.*, 36, 105-112.
- Anonim, 2020a, <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/> [Ziyaret Tarihi: 05 Temmuz 2022].
- Anonim, 2020b, <https://web.archive.org/web/20210419194114/https://www.trthaber.com/haber/bilim-teknoloji/nufuz-edici-bombanin-yeni-parti-teslimati-yapildi-491496.html> [Ziyaret Tarihi: 30 Eylül 2022].
- Anonim, 2022a, <https://www.bilmediklerimiz.com/dronedan-hedefi-rahatlikla-yurabilen-bir-mini-roket-gelistirildi/>, [Ziyaret Tarihi: 10 Temmuz 2022].
- Anonim, 2022b, <https://www.millisavunma.com/akya-agir-torpedo/>, [Ziyaret Tarihi: 10 Temmuz 2022].
- Anonim, 2022c, <https://shiftdelete.net/bayraktar-tb2-ve-aselsan-cats-basariya-imza-atti>, [Ziyaret Tarihi: 10 Temmuz 2022].
- Anonim, 2022d, <https://www.millisavunma.com/roket-san-cakir-seyir-fuzesi-ailesi/>, [Ziyaret Tarihi: 10 Temmuz 2022].
- Anonim, 2022e, <https://www.millisavunma.com/simsek-ve-turna-hedef-ucak-sistemleri/>, [Ziyaret Tarihi: 29 Ekim 2022].
- Anonim, 2022f, <https://paratic.com/rusyadan-belarusa-iskender-m-balistik-fuzesi-tedariki/> [Ziyaret Tarihi: 10 Temmuz 2022].
- Anonim, 2022g, <https://www.trthaber.com/haber/gundem/savunmada-yeni-sayfa-nufuz-edici-bomba-ile-acildi-711340.html> [Ziyaret Tarihi: 30 Eylül 2022].
- Anonim, 2022h, <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n2414-il#polars> [Ziyaret Tarihi: 22 Ekim 2022].
- Bearman, P. W., 1965. Investigation of the flow behind a two-dimensional model with a blunt trailing edge and fitted with splitter plates, *J. Fluid Mech.*, 21(2), 241-255.
- Cardenas, P. ve de Barros, E.A., 2020. Estimation of AUV Hydrodynamic Coefficients Using Analytical and System Identification Approaches, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 54(4).

- Castillo, R. ve Pol, S., 2022. Wind tunnel studies of wind turbine yaw and speed control effects on the wake trajectory and thrust stabilization, *Renewable Energy*, 189, 726-733.
- Cengel, Y.A. ve Cimbala, J.M., 2014. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (3. baskı). McGraw-Hill, New York.
- Dantas, J. L. D. ve de Barros, E. A., 2013. Numerical analysis of control surface effects on AUV manoeuvrability, *Applied Ocean Research*, 42, 168-181.
- Evans, J. ve Nahon, M., 2004. Dynamics modeling and performance evaluation of an autonomous underwater vehicle, *Ocean Engineering*, 31, 1835-1858.
- Hoth, J. ve Kowalczyk, W., 2018. Determination of Flow Parameters of a Water Flow Around an AUV Body, *Center for Teaching and Learning, Hamburg University of Technology*, Am Schwarzenberg-Campus 3, 21073 Hamburg, Germany.
- Jagadeesh, P. ve Murali, K., 2010. RANS Predictions of Free Surface Effects on Axisymmetric Underwater Body, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 4(2), 301-313.
- Kaynarcalıoğlu, M., 2016. Eliptik Burun Kesitli Silindir evresinde Oluşan Hidrodinamik ve aerodinamik akış karakteristiklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Kılavuz, A., 2020. Investigation of Flow Characteristics Occurring by Interaction of Different Torpedo-Like Geometries with a Free Water Surface, Yüksek Lisans Tezi, *ukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- Kılavuz, A., Sarıgizel, F., Ozgoren, M., Durhasan, T., Sahin, B., Kavurmacıoğlu, L.A., Akilli, H., Sekeroğlu, E. ve Yanıktepe, B., 2021. The impacts of the free-surface and angle of attack on the flow structures around a torpedo-like geometry, *European Journal of Mechanics / B Fluids*, 92, 226-243.
- Koren, S., Arieli, R. and Rom, J., 1992. Measurements of Lateral Aerodynamic Characteristics of Forebodies at High Angles of Attack in Subsonic and Transonic Flows, *AIAA*, 92(0174).
- Liu, X., Tan, Y.H., Di, B. ve Chen, B.M., 2017. Hydrodynamic modelling for a small-scale underwater vehicle using computational fluid dynamics, *13th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA)*, Ohrid, Macedonia.
- Manshadi M.D., Hejranfar K. ve Farajollahi, A.H., 2017. Effect of Vortex Generators on Hydrodynamic Behaviour of an Underwater Axisymmetric Hull at High Angles of Attack, *Journal of Visualization*, 20, 559-579.
- McLean, J. D. 2014, https://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_attack#/media/File:Airfoil_angle_of_attack.jpg, [Ziyaret Tarihi: 21 Ekim 2022].

- Mitra, A., Panda, J.P. ve Warrior, H.V., 2019. Experimental and numerical investigation of the hydrodynamic characteristics of Autonomous Underwater Vehicles over seabeds with complex topography, *Department of Ocean Engineering and Naval Architecture*, IIT Kharagpur, India.
- Muthuvel, A., Monish, B.K., Purandarraj, S. ve Darshan, N. K., 2019. Numerical simulation of flow over an autonomous under water vehicle with appendages for various turbulence models, *AIP Conference Proceedings*, 2039(1).
- Nematollahi, A., Dadvand, A. ve Dawoodian, M., 2015. An axisymmetric underwater vehicle-free surface interaction: A numerical study, *Ocean Engineering*, 96, 205-214.
- Özgören, M., Doğan, S., Okbaz, A., Şahin, B. ve Akıllı, H., 2011, Küre Serbest Yüzey Etkileşimiyle Oluşan Türbülanslı Akış Yapısının Deneysel Araştırılması, 18. *Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Zonguldak, 141-146.
- Özgören, M., Durhasan, T., Kavurmacıoğlu, L., Şahin, B., Kılavuz, A., Sarıgüznel, F., Kenan, Ö., Erdem, M., Yağmur, S. ve Kaynarcalıoğlu, M., 2022. *Yeni Nesil Torpedo Benzeri Farklı Geometrilerin Çevresinde Oluşan Akış Yapısı ve Kontrolünün Araştırılması*, TÜBİTAK Proje No. 214M318.
- Pan, Y., Zhang, H. ve Zhou, Q., 2012. Numerical Prediction of Submarine Hydrodynamic Coefficients Using CFD Simulation, *Journal of Hydrodynamics*, 24, 840-847.
- Phillips, A. B., 2010. Simulations of a self propelled autonomous underwater vehicle, Doktora Tezi, *University of Southampton, School of Engineering Sciences*, Southampton.
- Sarıgüznel, F., 2020. Free Surface and Passive Control Effects on Flow Characteristics around Various Torpedo-Like Geometries, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- Sarıgüznel, F., Kılavuz, A., Özgören, M., Durhasan, T., Şahin, B., Kavurmacıoğlu, L.A., Akıllı, H., Sekeroğlu, E. ve Yanıktepe, B., 2021. Experimental investigation of free-surface effects on flow characteristics of a torpedo-like geometry having a cambered nose, *Ocean Engineering*, 253.
- Seyhan, M., Sarioglu, M., ve Akansu, Y. E., 2021a. Influence of Leading-Edge Tubercle with Amplitude Modulation on NACA 0015 Airfoil, *AIAA J.*, 59(10), 3965–3978.
- Seyhan, M. ve Sarioglu, M., 2021b. Investigation of drag reduction performance of half NACA 0009 and 0012 airfoils placed over a trailer on the flow around truck-trailer, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(7), 2971-2979.
- Sarıoglu, M. ve Akansu, Y. E., 2021c. Hücüm ve Firar Kenarı Dalgalı Geometriye Sahip Uçak Kanadı Performansına Artan Azalan Genlik Modülasyonunun Etkisinin İncelenmesi, TÜBİTAK projesi 2018-2021, Proje No.118M592.

- Shariati, S. K. ve Mousavizadegan, S. H., 2018. Identification of underwater vehicles using surface wave pattern, *Applied Ocean Research*, 78(2018), 281–289.
- Sharma, V. ve Dutta, S., 2022. Experimental investigation of flow characteristics over a surface-modified structured torpedo model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 230.
- Sun, C., Zhou, T., An, H., Zhu, H. ve Cheng, L., 2022. Experimental studies on wake structures of a circular cylinder with different surface roughness heights, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 94.
- Şekeroğlu, E., 2019. Akarsu Uygulaması İçin bir Dikey Eksenli Su Türbininin Akış ve Güç Parametrelerinin İncelenmesi, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Osmaniye.
- Thomareis, N. and Papadakis, G., 2017. Effect of trailing edge shape on the separated flow characteristics around an airfoil at low Reynolds number: A numerical study, *Physics of Fluids*, 29, 29-45.
- Tian, W., Song, B. ve Ding, H., 2019. Numerical research on the Influence of Surface Waves on the Hydrodynamic Performance of an AUV, *Ocean Engineering*, 183(2019), 40-56.
- Yağmur, S., 2016. Torpido Benzeri Geometri Çevresindeki Akış Yapısının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.