

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ESNEK KANATLARIN DÜŞÜK REYNOLDS
SAYILARINDA KARARSIZ AERODİNAMİĞİNİN
İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Hacımurat DEMİR**

**Danışman
Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ**

Doktora Tezi

**Temmuz 2018
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ESNEK KANATLARIN DÜŞÜK REYNOLDS
SAYILARINDA KARARSIZ AERODİNAMİĞİNİN
İNCELENMESİ**

(Doktora Tezi)

**Hazırlayan
Hacımurat DEMİR**

**Danışman
Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından
FDK-2015-6171 kodlu proje ve TÜBİTAK tarafından 213M329 kodlu uluslararası
COST projesi ve ayrıca TÜBİTAK 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma
Bursu ile desteklenmiştir.**

**Temmuz 2018
KAYSERİ**

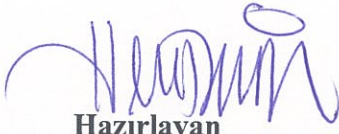
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.



Hacımurat DEMİR

“Esnek Kanatların Düşük Reynolds Sayılarında Kararsız Aerodinamiğinin İncelenmesi” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.



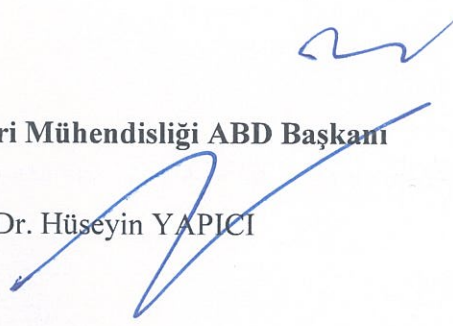
Hazırlayan

Hacımurat DEMİR



Danışman

Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ



Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ danışmanlığında **Hacımurat DEMİR** tarafından hazırlanan “**Esnek Kanatların Düşük Reynolds Sayılarında Kararsız Aerodinamiğinin İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Enerji Sistemleri Mühendisliği** Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

20 / 07 / 2018

JÜRİ:

Danışman : Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ

Üye : Prof. Dr. Hüseyin AKILLI

Üye : Prof. Dr. Gamze GENÇ

Üye : Doç. Dr. Yücel ÖZMEN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Gülşah ELDEN

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 07/08/2018 tarih ve 2018/34-04 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Doktora tez konumun belirlenmesinde, tez ile alakalı çalışmaların yürütülmesinde, elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde, tezin yazımında bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen danışmanım değerli hocam Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ'e teşekkür ederim.

Doktora tez konumun sayısal modellenme kısmında birlikte çalıştığım ve tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Danesh TAFTI ve *HPCFD* ekibine, sayısal modelleme süresince yüksek performanslı bilgisayarlarını (NewRiver, Dragonstooth, Cascades) kullandığım *Virginia Polytechnic Institute and State University Advanced Research Computing (ARC)* merkezine teşekkür ederim. Akademik hayatımda her türlü desteği sağlayan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Hüseyin YAPICI, Prof. Dr. Gamze GENÇ, Doç. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR ve Dr. Öğretim Üyesi Gülşah ELDEN'e, tez çalışmam boyunca beraber çalıştığım Arş. Gör. Halil Hakan AÇIKEL'e, sayısal çalışmalarda destek olan Mustafa ÖZDEN'e ve Rüzgâr Mühendisliği ve Aerodinamik Araştırma Grubu (*WEAR*) ekibimizin tüm yardımsever üyelerine teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar için Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine FDK-2015-6171 kodlu doktora, FDA-2014-5273 kodlu dış destekli, FBG-2014-5337 kodlu güdümlü projeler ve TÜBİTAK'a 213M329 kodlu uluslararası COST projesi destekleri için teşekkür ederim. Ayrıca Amerika'da *Virginia Polytechnic Institute and State University Makine Mühendisliği Bölümü*'nde araştırma yapmak üzere verdiği 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Son olarak, eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi hiçbir şekilde desteğini esirgemeyen, bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Hacımurat DEMİR
Temmuz 2018, KAYSERİ

ESNEK KANATLARIN DÜŞÜK REYNOLDS SAYILARINDA KARARSIZ AERODİNAMİĞİNİN İNCELENMESİ

Hacımurat DEMİR

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Temmuz 2018
Danışman: Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, esnek kanatlarda akışkan-yapı etkileşimi üzerine deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, farklı açıklık oranlarına ($AR=1$, $AR=3$ ve $2D$) sahip esnek kanatlar için farklı hücum açılarında ($\alpha=0^\circ-40^\circ$) ve $Re=2.5 \times 10^4$, 5.0×10^4 ve 7.5×10^4 için duman teli deneyi, kuvvet ölçüm deneyi, hız ve deformasyon ölçüm deneyi gerçekleştirilmiştir. Düşük hücum açılarında hücum kenarına yakın kısımda kısa kabarcık gözlemlenmiş ve hücum açısının artışı ile daha geniş hale gelmiştir. Kabarcıktan dolayı hücum kenarından kopan girdaplar firar kenarına doğru hareket etmiş ve kanatta titreşimlere sebep olmuştur. Reynolds sayısı artışıyla tüm esnek kanatlar için kabarcık ve ayrılmış akış bölgesi küçülmüştür ve kanatta farklı titreşim modları ortaya çıkmıştır. $2D$ esnek kanat $AR=1$ ve $AR=3$ esnek kanatlarla karşılaştırıldığında, düşük hücum açılarında oluşan hücum kenarı ayrılmaları ve kabarcığın daha baskın olduğu gözlemlenmiştir. $2D$ esnek kanatta uç girdapları oluşmamasından dolayı kabarcık daha etkindir ve aerodinamik performans daha düşüktür. Sayısal modellemeye elde edilen sonuçlar incelendiğinde, esnek kanat üzerinde oluşan deformasyon geometrisi deneysel sonuç ile benzerlik göstermiştir. Ayrıca, ön gerilme değerinin artması ile esnek kanat üzerinde oluşan deformasyonun ve kaldırma kuvvetinin azaldığı görülmüştür. Rijit kanat ile kıyaslandığında tüm ön gerilme değerleri için esnek kanatta daha fazla kaldırma elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akışkan-Yapı Etkileşimi, Düşük Reynolds Sayısı Aerodinamiği, Esnek Kanat, Laminer Ayrılma Kabarcığı, Titreşim Modu, Yer Değiştirme.

INVESTIGATION OF UNSTEADY AERODYNAMICS OF FLEXIBLE WINGS AT LOW REYNOLDS NUMBERS

Hacimurat DEMİR

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

PhD Thesis, July 2018

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ

ABSTRACT

In this thesis, experimental and numerical studies on the fluid-structure interaction in flexible wings were performed. In accordance with this purpose, smoke-wire flow visualization experiment, force measurement, velocity and deformation measurements were conducted for flexible wings with different aspect ratios ($AR=1$, $AR=3$ and $2D$) at varying angles of attack ($\alpha=0^\circ$ - 40°) and Reynolds numbers of 2.5×10^4 , 5.0×10^4 , and 7.5×10^4 . It was observed that short bubble was seen near the leading edge of the wing at lower angles of attack, and then it became larger with the increasing the angle of attack. Vortices formed from the leading edge due to the bubble moved towards the trailing edge of the wing and caused to vibration on the flexible wing. As Reynolds number increased, the size of the bubble and separated flow region shrank for all flexible membrane wings, and various vibrational modes came into existence on the flexible membrane wings. Leading edge separations and the bubble occurred on the wing at low angles of attack were larger and more significant for $2D$ flexible wing compared with $AR=1$ and $AR=3$ flexible membrane wings. Due to the absence of tip vortices on $2D$ flexible wing, separation bubbles were more effective and aerodynamic performance was less. When the results obtained from the numerical modeling were analyzed, it was understood that the geometry of the deformation region on the wing was similar to the experimental result. Besides, it was seen that deformation on the flexible wing decreased with increasing pre-stress value, and it caused to decrease in lift. Compared with the rigid wing, flexible wing achieved more lift for all pre-stress values.

Keywords: Displacement, Flexible Wing, Fluid Structure Interaction, Laminar Separation Bubble, Low Re Numbers Aerodynamics, Vibration Mode.

İÇİNDEKİLER

ESNEK KANATLARIN DÜŞÜK REYNOLDS SAYILARINDA KARARSIZ AERODİNAMİĞİNİN İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Genel Bilgiler	3
1.2. Literatür Çalışması	5

2. BÖLÜM

ESNEK KANAT DENEYSEL ÇALIŞMALARI

2.1. Giriş	15
2.2. Rüzgâr Tüneli ve Özellikleri	15
2.3. Esnek Kanat Üretimi	17
2.4. Kullanılan Deneysel Metotlar	19
2.4.1. Akış Görselleştirme Deneyi.....	19

2.4.2. Aerodinamik Kuvvet Deneyi.....	21
2.4.3. Deformasyon Ölçüm Deneyi	21
2.4.4. Esnek Kanat Profili İçin Hız Dağılımlarının İncelenmesi	24
2.5. Elde Edilen Deneysel Sonuçlar	25
2.5.1. AR=1 Esnek Kanat İçin Duman Teli Deneyi Sonuçları	25
2.5.2. AR=1 Esnek Kanat İçin Kuvvet Deneyi Sonuçları.....	35
2.5.3. AR=1 Esnek Kanat İçin Deformasyon Ölçüm Deneyi Sonuçları.....	36
2.5.4. AR=1 Esnek Kanat İçin Hız Dağılımı Ölçüm Deneyi Sonuçları	40
2.5.5. AR=3 Esnek Kanat İçin Duman Teli Deneyi Sonuçları	45
2.5.6. AR=3 Esnek Kanat İçin Kuvvet Deneyi Sonuçları.....	54
2.5.7. AR=3 Esnek Kanat İçin Deformasyon Ölçüm Deneyi Sonuçları.....	55
2.5.8. AR=3 Esnek Kanat İçin Hız Dağılımı Ölçüm Deneyi Sonuçları	61
2.5.9. 2D Esnek Kanat İçin Duman Teli Deneyi Sonuçları	65
2.5.10. 2D Esnek Kanat İçin Kuvvet Deneyi Sonuçları.....	69
2.5.11. 2D Esnek Kanat İçin Deformasyon Ölçüm Deneyi Sonuçları	69
2.5.12. 2D Esnek Kanat İçin Hız Dağılımı Ölçüm Deneyi Sonuçları	75
3. Esnek Kanat Üzerindeki LSB Oluşumunun Zamana Bağlı İncelenmesi	77
4. Esnek Membran Kanatların Akışkan-Yapı Etkileşimleri.....	81

3. BÖLÜM

ESNEK KANAT SAYISAL ÇALIŞMALARI

3.1. Giriş	99
3.2. ANSYS HAD Yazılımı ile Sayısal Çalışmalar	100
3.3. Açık Kaynak Kodu ile Sayısal Çalışmalar	105
3.3.1. Rijit Kanat ve Esnek Membran Kanat	106
3.3.2. Akışkan-Yapı Etkileşimi (Fluid-Structure Interaction-FSI)	112
3.3.3. Mesh Bağımsızlık Çalışması	115
3.3.4. Esnek Kanadın Sayısal Modellemesi.....	122

4. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar129

4.2. Öneriler133

KAYNAKÇA134

ÖZGEÇMİŞ.....139



KISALTMALAR

AR	: Aspect Ratio (Açıklık Oranı)
c	: Kort, Viter Uzunluğu
C_D	: Sürüklenme Kuvveti Katsayısı
C_L	: Taşıma Kuvveti Katsayısı
CTA	: Constant Temperature Anemometer (Sabit Sıcaklık Anemometresi)
DIC	: Digital Image Correlation (Dijital Görüntü İşleme)
f	: Frekans
FSI	: Fluid-Structure Interaction (Akışkan-Yapı Etkileşimi)
HAD	: Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
h_w	: Membran Malzeme Kalınlığı
İHA	: İnsansız Hava Aracı
LSB	: Laminer Separation Bubble (Laminer Ayrılma Kabarcığı)
MHA	: Mikro Hava Aracı
N_x	: Kort Yönündeki Ön Gerilme
N_y	: Span Yönündeki Ön Gerilme
N_{xy}	: Membrana Uygulanan Kayma Gerilmesi
p	: Basınç
Re	: Reynolds Sayısı
Re_{stress}	: Re Gerilmesi
St	: Strouhal Sayısı
Tu	: Türbülans Yoğunluğu
TKE	: Türbülans Kinetik Enerjisi
U	: Hız
U'	: Anlık Hız
$\bar{u}$	: Ortalama Hız
y/s	: Y Ekseninde Konumun Spana Göre Boyutsuz Yeri
Z	: Yer Değiştirme
Z_{ort}	: Boyutsuz Ortalama Deformasyon (Yer Değiştirme)
Z_{std}	: Yer Değiştirmenin Standart Sapması
ρ_w	: Membran Malzeme Yoğunluğu

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1. Literatür taraması sonuçları	14
Tablo 2. Input dosyaları	106
Tablo 3. Değişen hücum açıları için boyutsuz ön gerilme değerleri.....	113
Tablo 4. $\alpha=8^\circ$ için boyutsuz ön gerilme değerleri.....	113
Tablo 5. Mesh bağımsızlık için kullanılan durumlar	116



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.	Hava araçlarının uçtuğu hız ve Re sayıları	4
Şekil 2.	Laminer ayrılma kabarcığı	4
Şekil 3.	Kanat profili ve karakteristik tanımlamaları	5
Şekil 4.	Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği rüzgâr tüneli	16
Şekil 5.	Esnek membran kanatlar ve boyutları	16
Şekil 6.	Esnek kanat için üretilen çerçevenin yatay kesiti.....	17
Şekil 7.	Esnek kanat için membran malzeme	17
Şekil 8.	AR=1 esnek membran kanat	18
Şekil 9.	AR=3 esnek membran kanat	18
Şekil 10.	AR=1 esnek kanat profili ve test odasında konumlanmış hali	19
Şekil 11.	Duman teli deneyi için oluşturulan karanlık ortam	20
Şekil 12.	Duman telinden tel yere dik iken duman gelişinin farklı konumları	20
Şekil 13.	Elektronik göstergeli kuvvet ölçüm sistemi	21
Şekil 14.	Boya püskürtülen esnek kanatlar.....	22
Şekil 15.	DIC sisteminin ayarlanması	23
Şekil 16.	DIC kalibrasyon işlemi.....	23
Şekil 17.	DIC deneyi esnasında esnek kanatların deforme olmuş görüntüleri.....	23
Şekil 18.	Çift eksenli X-wire probunun test odasındaki görünümü	25
Şekil 19.	Duman teli ile akış görselleştirme (AR=1 ve $Re=2.5 \times 10^4$).....	27
Şekil 20.	Duman teli ile akış görselleştirme (AR=1, $Re=5.0 \times 10^4$)	30
Şekil 21.	Duman teli ile akış görselleştirme (AR=1, $Re=7.5 \times 10^4$)	33
Şekil 22.	Esnek kanat için farklı Re sayılarında aerodinamik kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi	36
Şekil 23.	AR=1 esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon sonuçları.....	37
Şekil 24.	AR=1 esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=5.0 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon sonuçları.....	37
Şekil 25.	AR=1 esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=7.5 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon sonuçları.....	38

Şekil 26.	AR=1 esnek membran kanatta $Re=5.0 \times 10^4$ 'de ve $\alpha=24^\circ$ 'de oluşan deformasyonun 3 boyutlu örnek gösterimi.....	38
Şekil 27.	Farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ için AR=1 esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları.....	39
Şekil 28.	Farklı hücum açılarında ve $Re=5.0 \times 10^4$ için AR=1 esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları.....	39
Şekil 29.	Farklı hücum açılarında ve $Re=7.5 \times 10^4$ için AR=1 esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları.....	40
Şekil 30.	AR=1 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.1$ konumunda hız dağılımı	41
Şekil 31.	AR=1 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.1$ konumunda TKE dağılımı	42
Şekil 32.	AR=1 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.4$ konumunda hız dağılımı	43
Şekil 33.	AR=1 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.4$ konumunda TKE dağılımı	44
Şekil 34.	Duman teli ile akış görselleştirme (AR=3, $Re=2.5 \times 10^4$)	45
Şekil 35.	Duman teli ile akış görselleştirme (AR=3, $Re=5.0 \times 10^4$)	48
Şekil 36.	Duman teli ile akış görselleştirme (AR=3, $Re=7.5 \times 10^4$)	51
Şekil 37.	Esnek kanat için farklı Re sayılarında aerodinamik kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi.....	55
Şekil 38.	Esnek AR=3 esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon	56
Şekil 39.	Esnek AR=3 esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=5.0 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon	57
Şekil 40.	Esnek AR=3 esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=7.5 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon	58
Şekil 41.	AR=3 esnek membran kanatta $Re=2.5 \times 10^4$ 'de ve $\alpha=16^\circ$ 'de oluşan deformasyonun 3 boyutlu örnek gösterimi.....	58
Şekil 42.	Farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ için AR=3 esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları.....	59
Şekil 43.	Farklı hücum açılarında ve $Re=5.0 \times 10^4$ için AR=3 esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları.....	60
Şekil 44.	Farklı hücum açılarında ve $Re=7.5 \times 10^4$ için AR=3 esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları.....	61
Şekil 45.	AR=3 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.1$ konumunda hız dağılımı	62
Şekil 46.	AR=3 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.1$ konumunda TKE dağılımı	63

Şekil 47.	AR=3 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.4$ konumunda hız dağılımı	64
Şekil 48.	AR=3 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.4$ konumunda TKE dağılımı	65
Şekil 49.	Duman teli ile akış görselleştirme (2D, $Re=2.5 \times 10^4$)	66
Şekil 50.	Duman teli ile akış görselleştirme (2D, $Re=5.0 \times 10^4$)	67
Şekil 51.	Esnek kanat için farklı Re sayılarında aerodinamik kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi	69
Şekil 52.	2D esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon sonuçları	70
Şekil 53.	2D esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=5.0 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon sonuçları	71
Şekil 54.	2D esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=7.5 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon sonuçları	71
Şekil 55.	Farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ için 2D esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları	72
Şekil 56.	Farklı hücum açılarında ve $Re=5.0 \times 10^4$ için 2D esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları	73
Şekil 57.	Farklı hücum açılarında ve $Re=7.5 \times 10^4$ için 2D esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları	74
Şekil 58.	2D esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.4$ konumunda hız dağılımı	75
Şekil 59.	2D esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.4$ konumunda TKE dağılımı	76
Şekil 60.	AR=3 esnek kanat için $\alpha=12^\circ$ ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de $y/s=0.4$ konumunda zamana bağlı duman deneyi sonucu	77
Şekil 61.	AR=3 esnek kanat için $\alpha=6^\circ$ ve $Re=5.0 \times 10^4$ 'de $y/s=0.4$ konumunda zamana bağlı duman deneyi sonucu	78
Şekil 62.	AR=3 esnek kanat için $\alpha=10^\circ$ ve $Re=5.0 \times 10^4$ 'de $y/s=0.4$ konumunda zamana bağlı duman deneyi sonucu	79
Şekil 63.	Farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ için AR=3 esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları	79
Şekil 64.	Farklı hücum açılarında ve $Re=5 \times 10^4$ için AR=3 esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları	80
Şekil 65.	AR=1 esnek membran kanat için farklı Re sayılarında $y/s=0.4$ konumunda elde edilen duman deneyi fotoğrafları	82

Şekil 66.	AR=3 esnek membran kanat için farklı Re sayılarında $y/s=0.4$ konumunda elde edilen duman deneyi fotoğrafları.....	83
Şekil 67.	2D esnek membran kanat için farklı Re sayılarında $y/s=0.4$ konumunda elde edilen duman deneyi fotoğrafları.....	84
Şekil 68.	AR=1 esnek membran kanadın $\alpha=8^\circ$ hücum açısında türbülans yoğunluğu ve Re gerilme dağılımı a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$ c) $Re=7.5 \times 10^4$	85
Şekil 69.	AR=3 esnek membran kanadın $\alpha=8^\circ$ hücum açısında türbülans yoğunluğu ve Re gerilme dağılımı a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$ c) $Re=7.5 \times 10^4$	86
Şekil 70.	2D esnek membran kanadın $\alpha=8^\circ$ hücum açısında türbülans yoğunluğu ve Re gerilme dağılımı $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$	87
Şekil 71.	AR=1 esnek membran kanat için $Re=2.5 \times 10^4$ 'de deformasyon ve duman deneyi sonuçlarının birleştirilmiş hali.....	87
Şekil 72.	AR=3 esnek membran kanat için $Re=2.5 \times 10^4$ 'de deformasyon ve duman deneyi sonuçlarının birleştirilmiş hali.....	88
Şekil 73.	AR=3 esnek membran kanadın standart sapma ve duman deneyi sonuçlarının birleştirilmiş hali a-b) $Re=2.5 \times 10^4$ c-d) $Re=5 \times 10^4$ e-f) $Re=7.5 \times 10^4$	88
Şekil 74.	2D esnek membran kanadın standart sapma ve duman deneyi sonuçlarının birleştirilmiş hali a-b-c) $Re=2.5 \times 10^4$ d-e-f) $Re=5 \times 10^4$	89
Şekil 75.	Farklı hücum açılarında ve Re sayılarında esnek membran kanatlar için ortalama maksimum boyutsuz deformasyonlar ve standart sapmaların hata çubukları	91
Şekil 76.	AR=1 esnek kanat için membran titreşiminin güç spektral dağılımlarının hücum açısına göre dağılımları $Re=2.5 \times 10^4$, b) 5×10^4 , c) 7.5×10^4	92
Şekil 77.	AR=3 esnek kanat için membran titreşiminin güç spektral dağılımlarının hücum açısına göre dağılımları a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) 5×10^4 , c) 7.5×10^4	93
Şekil 78.	2D esnek kanat için membran titreşiminin güç spektral dağılımlarının hücum açısına göre dağılımları a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) 5×10^4 , c) 7.5×10^4	94
Şekil 79.	Boyutsuzlaştırılmış maksimum deformasyon değerinin farklı Re sayılarındaki dağılım bandı	95

Şekil 80.	Boyutsuzlaştırılmış maksimum deformasyon değerinin farklı en/boy oranlarında a) $Re=5 \times 10^4$ ve b) $Re=7.5 \times 10^4$ için dağılımı	95
Şekil 81.	Farklı hücum açılarında ve $Re=5 \times 10^4$ 'de $AR=2$ ve $AR=3$ esnek kanat üzerinde oluşan deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma değerlerinin karşılaştırılması	96
Şekil 82.	$AR=2$ ve $AR=3$ esnek kanat için $Re=5 \times 10^4$ 'de boyutsuzlaştırılmış maksimum zaman ortalamalı yer değiştirmenin hücum açısına göre değişiminin karşılaştırılması	98
Şekil 83.	Modellemede kullanılan örnek ağ yapısı	100
Şekil 84.	$AR=1$ esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de deneysel ve sayısal sonuçlar	101
Şekil 85.	2D esnek kanat için $\alpha=12^\circ$ 'de deneysel ve sayısal sonuçlar	102
Şekil 86.	2D esnek kanadın $Re=2.5 \times 10^4$ için $k-k_L-\omega$ ve duman deneyi sonuçları	103
Şekil 87.	2D esnek kanadın $Re=5.0 \times 10^4$ için $k-k_L-\omega$ ve duman deneyi sonuçları.....	104
Şekil 88.	GenIDLEST aşamaları	106
Şekil 89.	Sayısal modellemede kullanılan kanatların kesitsel görünüşleri.....	107
Şekil 90.	Membran malzeme ve deneysel çalışmada kullanılan esnek kanat	107
Şekil 91.	Sayısal modellemede kullanılan akış alanı ve ve alt bölgeleri.....	108
Şekil 92.	Rijit kanadın aerodinamik katsayılarının $Re=2.5 \times 10^4$ 'de anlık değişimi ..	109
Şekil 93.	$Re=2.5 \times 10^4$ için kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi	109
Şekil 94.	Rijit kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de ortalama hız dağılımı.....	110
Şekil 95.	Rijit kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de ortalama basınç dağılımı.....	111
Şekil 96.	Rijit kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de girdap dağılımı .	112
Şekil 97.	Akış çözücüsü için ana input dosyası.....	114
Şekil 98.	Input dosyaları a) referans b) esnek membrane kanat.....	115
Şekil 99.	Esnek membran kanadın aerodinamik kuvvet katsayılarının $\alpha=8^\circ$ ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de anlık değişimi	116
Şekil 100.	Kuvvet katsayısı sonuçları a) Durum 1, b) Durum 2 ve c) Durum 3 $\alpha=8^\circ$ ve $Re=2.5 \times 10^4$	117
Şekil 101.	Sayısal modellemeden elde edilen $\alpha=8^\circ$ 'de farklı ön gerilme değerleri için esnek membran kanat üzerinde oluşan ortalama deformasyon	

	sonuçları a) ön gerilme=1, b)ön gerilme=1.5, c)ön gerilme=1.75, d)ön gerilme=3, e)ön gerilme=5	117
Şekil 102.	$\alpha=8^\circ$ için esnek membran kanatta oluşan ortalama deformasyon sonuçları.....	118
Şekil 103.	$\alpha=8^\circ$ için esnek membran kanattaki deformasyonun 3 boyutlu örnek gösterimi	118
Şekil 104.	Esnek membran kanadın aerodinamik kuvvet katsayılarının $Re=2.5 \times 10^4$ ve $\alpha=8^\circ$ için ve anlık değişimi a)ön gerilme=1, b)ön gerilme=1.5, c)ön gerilme=1.75, d)ön gerilme=3, e)ön gerilme=5	119
Şekil 105.	Deformasyonun öngerilme ile değişimi.....	119
Şekil 106.	Esnek membran kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de ortalama basınç dağılımı a)ön gerilme=1 b)ön gerilme=1.5 c)ön gerilme=1.75 d)ön gerilme=3 e)ön gerilme=5	120
Şekil 107.	Esnek membrane kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de girdap dağılımı a)ön gerilme=1 b)ön gerilme=1.5 c)ön gerilme=1.75, d)ön gerilme=3 e)ön gerilme=5...	121
Şekil 108.	Esnek membran kanat üzerinde oluşan ortalama deformasyon sonuçları.....	122
Şekil 109.	Esnek membran kanadın $\alpha=8^\circ$ 'de kuvvet katsayılarının anlık değişimi .	123
Şekil 110.	Esnek membran kanadın zaman ortalamalı kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi	123
Şekil 111.	Esnek membran kanadın farklı hücum açlarındaki girdap dağılımı	124
Şekil 112.	$Re=2.5 \times 10^4$ için aerodinamik kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimin sayısal ve deneysel olarak karşılaştırılması	125
Şekil 113.	$Re=2.5 \times 10^4$ için ortalama hız dağılımı	125
Şekil 114.	$Re=2.5 \times 10^4$ için ortalama basınç konturları	126
Şekil 115.	$\alpha=8^\circ$ için ortalama hız ve basınç konturları	127
Şekil 116.	Sayısal modelleme sonucu elde edilen farklı hücum açılarında girdap dağılımı	128

GİRİŞ

Son yıllarda, rüzgar türbinleri, insansız hava araçları (İHA) ve mikro hava araçları (MHA) ile alakalı çalışmaların artışı dikkat çekmektedir. Rüzgâr türbinleri, İHA ve MHA'lar düşük Reynolds (Re) sayılı akış rejimlerinde çalışmaktadır. Re sayısının düşük olmasının sebebi, bahsi geçen hava araçlarının ya sahip olduğu kanatların birim uzunluklarının küçük oluşundan ya da akış hızlarının düşük oluşundan veya bunların her ikisinin de aynı anda mevcut olmasından kaynaklanmaktadır. Ek olarak, yüksek irtifalardaki düşük hava yoğunluğu ve yüksek kinematik viskoziteye bağlı olarak da İHA'lar için düşük Re sayısı dikkat çekmektedir.

Düşük Re sayılarında hareket eden sabit kanatlı rüzgar türbini ve İHA ve MHA'lar yanında döner ve çırpın kanada sahip MHA'lar da mevcut olup doğada bulunan sinek, böcek gibi çok düşük Re sayılarında çalışmaktadırlar. Düşük Re sayısı aerodinamiği şimdiye kadar az çalışılmış ve son 20 yılda çalışmalar yoğunlaşmış olup bu konu daha tam anlaşılamamıştır. Bunun yanında düşük Re sayılarında kararsız (*unsteady*) aerodinamik durumları karmaşası dolayısıyla şimdiye kadar çok incelenmemiş fakat İHA ve MHA'lar için büyük öneme sahip olduğundan araştırılması elzemdir.

Doğada; kuşlar, böcekler ve yarasalar gibi diğer uçan yaratıklar, kanatlarıyla temas eden hava ile etkileşime girerek değişken atmosfer koşullarına kolaylıkla adapte olabilmektedirler. Bu biyolojik sistemler, küçük uçan araçları içeren uygulamalar için kanatlardaki esnek membran malzemelerin kullanımını araştırmak için son zamanlarda araştırmacılara ilham kaynağı olmuştur. Kanat yüzeylerindeki esneklik serbest akış koşullarına bağlı olarak kanadın şeklini pasif olarak değiştirebilmesine yol açarak aerodinamik verimi ve uçuş kararlılığının artışına olanak sağlar. Bununla birlikte, esnekliğin kullanıldığı kanatlarda akışkan yapı etkileşimi söz konusu olduğu için kararsız akış durumları daha da önemli olmaktadır. Bu kararsız akış durumları ve esnek

kanatta akışkan-yapı etkileşimi hala sırlar barındırmakta olup bu konuların daha çok araştırılması gerekmektedir.

Bu tez çalışması toplam olarak dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, yapılan tez çalışması ile alakalı genel bilgiler ve literatür taraması sunulmuştur. İkinci bölümde, esnek kanat için yapılan deneysel çalışmalardan bahsedilmiş ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar verilmiştir. Üçüncü bölümde esnek kanat için gerçekleştirilen sayısal çalışmalar ve sonuçları sunulmuştur. Son bölümde ise bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ve öneriler ifade edilmiştir.



1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

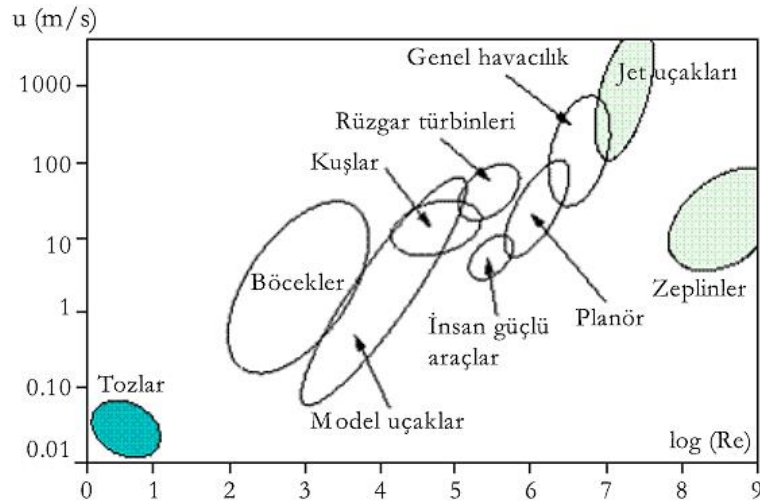
1.1. Genel Bilgiler

İHA ve MHA üzerine son zamanlarda çok fazla araştırma mevcuttur. İHA, MHA ve rüzgâr türbinlerinin akış rejimlerinde düşük Re sayıları ile karşılaşılmaktadır. Rüzgar türbini ve İHA gibi sabit kanat, MHA gibi döner ve çırpın kanat konfigürasyonları için düşük Re sayılarında kanat aerodinamiği şimdiye kadar tam anlaşılamamış ve özellikle düşük Re sayılarında kararsız aerodinamik oldukça ilgi çekmektedir [1-10].

Klasik yüksek hızlı uçakların Re sayısı 10^7 - 10^9 aralığında değişirken, daha hafif ve küçük uçakların Re sayısı 10^5 - 10^6 arasında değişmektedir (Şekil 1) [11]. $5.0 \times 10^4 < Re < 100 \times 10^4$ aralığında olan dış akış rejimleri *düşük Re sayılı akış* olarak adlandırılır [12]. Bu rejimde akış yüksek Re sayısındaki akıştan oldukça farklıdır. Düşük Re sayısı aerodinamiği alanları;

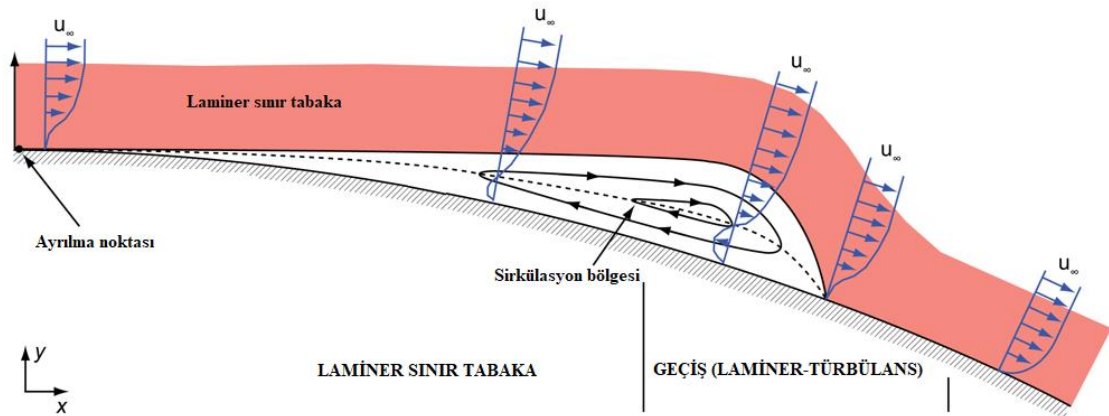
- mikro hava araçları,
- gaz türbin motorlarının türbin ve kompresör kanatçıkları,
- insansız hava araçları,
- deniz taşıtlarının kontrol yüzeyleri,
- rüzgar türbinleri,
- kara taşıtları,
- kuş ve böcek uçuşları

olarak düşünülebilir. Düşük Re sayılı akış rejiminde viskoz kuvvetlerin etkili olması nedeniyle kanat profili yüksek Re sayılı akıştan daha erken tutunma kaybına (stol) uğramaktadır.



Şekil 1. Hava araçlarının uçuğu hız ve Re sayıları [13]

Çırpma hareketi yapmayan MHA'lar tutunma kaybı şartlarına yakın ve oldukça yüksek hücum açılarında uçarlar. Düşük Re sayılı akış durumunda kanat etrafındaki akışta viskoz bölge çok geniştir ve akış içerisinde viskoz kuvvetler atalet kuvvetlere göre daha baskındır. Düşük Re sayılı akışlarda, hücum kenarından firar kenarına doğru ilerledikçe laminar akış viskoz kuvvetlerin etkisinden dolayı çok çabuk bozulmaya başlar. Türbülansa geçiş bölgesinde ise akış, viskoz etkilerin ve ters basınç gradyenlerinin etkisi ile ayrılıp türbülansa geçiş sonrasında tekrar yüzeye tutunarak laminar ayrılma kabarcığını (LSB) meydana gelir (Şekil 2). Ayrılma kabarcığı oluşumu, düşük Re sayılarında seyreden hava araçlarında kararsızlığa ve titreşimlere sebep olarak aerodinamik performansı olumsuz etkiler [14].

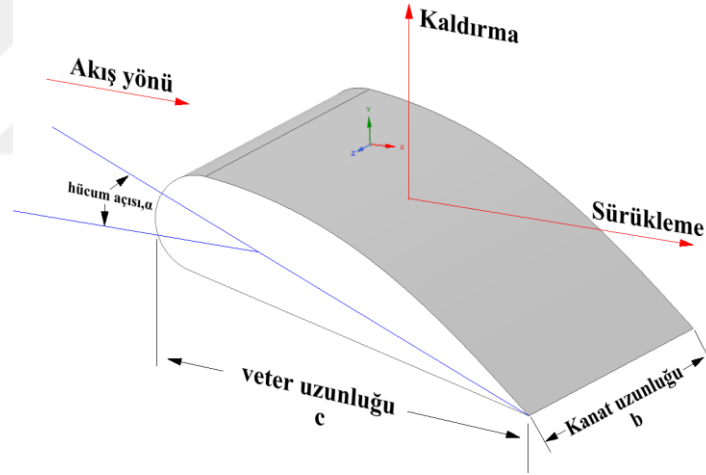


Şekil 2. Laminer ayrılma kabarcığı [15]

Cisimlerin hava ile etkileşimlerini inceleyen aerodinamik bilimi için kanat profilleri önemli bir yere sahiptir. Literatür çalışmalarından bahsetmeden önce kullanılabilecek kanat profili tanımlamalarını görmek için, Şekil 3'te gerekli karakteristik özellikler betimlenmiştir. Bunun yanında tezde sıkça kullanılan açıklık oranı kanat eni ile boyunun oranıdır. Başka bir deyişle kanadın ortalama uzunluğunun karesinin, üst bakış alanına oranına *açıklık oranı (AR)* denir. Kanat dikdörtgen bir levha gibi düşünülerek alan hesabı yapılır, veter boyu c ve uzunluğu b olan kanat için AR;

$$AR = b^2 / A = b^2 / b \cdot c = b/c \quad (1)$$

olarak ifade edilir. Daha büyük AR değerine sahip cisimler daha verimli uçarken, kütle atalet momentlerinin daha büyük olmasından dolayı manevra kabiliyetleri daha az olmaktadır.



Şekil 3. Kanat profili ve karakteristik tanımlamaları

1.2. Literatür Çalışması

LSB ile alakalı ilk deneysel çalışmalardan birini yapan Tani [16] yapmış olduğu çalışmada LSB'yi boyutuna göre kısa (*short bubble*) ve uzun kabarcık (*long bubble*) olarak iki farklı biçimde isimlendirmiştir. Ayrıca Gaster [17] LSB'nin davranışını incelemek için gerçekleştirmiş olduğu çalışmada kabarcığın oluşmasının ve yok olmasının kanat yüzeyi üzerindeki basınç dağılımına ve Re sayısına bağlı olduğunu belirtmiştir. Oluşan kabarcık büyüklüğü Re sayısının artması ile azalmakta ve ayrılma ve tutunma noktaları arasındaki basınç dağılımında bozulma meydana gelmektedir.

Genç ve arkadaşları [18] NACA 2415 kanat profili üzerindeki farklı düşük Re sayılarında LSB oluşumunu deneysel olarak incelemiş ve daha düşük Re sayılarında ve düşük hücum açılarında kısa kabarcık oluşurken, orta derecede hücum açılarında kısa kabarcığın büyüyüp uzun kabarcığa dönüştüğünü gözlemlemişlerdir. Tan ve Auld [19] hücum açısı, Re sayısı ve türbülans seviyesine göre kanat üstünde oluşan LSB karakteristiğini deneysel olarak incelenmiştir. $Re=2 \times 10^5$ ve $\alpha=0^\circ$ 'de ayrılan akışın kanat yüzeyine yapışmadığını gözlemlerken Re sayısının arttırılması ile kanat üzerine yapışmanın gerçekleştiği ve böylelikle LSB'nin uzunluğunun küçüldüğü görülmüştür. Ek olarak türbülans seviyesinin miktarının arttırılması kabarcığın küçülmesine sebep olmuştur. Rijit kanat üzerinde LSB oluşumu ile ilgili daha başka çalışmalar bulunmakta olup, bunun yanında AR'nin değişimi ile ilgili çalışmalara bakacak olursak, Mueller [20] MHA'lar ile ilgili bir çalışma yapmış ve bu çalışmada $AR=0.5$, $AR=1$, $AR=1.5$, $AR=3$ ve sonsuz rijit Eppler 61 kanat profili için $Re=2 \times 10^4$ 'te su ve rüzgar tüneline deneyler yapmıştır. Deneylerde kuvvet ve moment ölçüm sistemi ile birlikte akış görselleştirme için duman teli yöntemi kullanılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda $Re=14 \times 10^4$ ve 0° - 14° hücum açıları arasında en yüksek taşıma kuvvet katsayısı sonsuz kanatta elde edilirken, 14° - 22° hücum açılarında $AR=3$ ve 22° - 28° dereceleri arasında ise $AR=0.5$ kanatta en yüksek taşıma katsayısına ulaşılmıştır.

Gerakopulos ve arkadaşları [21] bir NACA 0018 kanat profili için taşıma ve ayrılma kabarcığı karakteristiklerini 0° 'den 18° 'ye kadar farklı hücum açılarında ve Re sayılarında ($Re=8 \times 10^4$ - 20×10^4) deneysel olarak incelemişlerdir. Kanat profili performansı ile ayrılmış akış bölgesinin gelişimi arasında ilişkiyi incelemek için yüzey basınç dağılımı ölçümünü gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, Re sayısının ve hücum açısının ayrılma kabarcığı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Hücum açısının arttırılmasının ayrılma kabarcığının ilerlemesine sebep olurken, aynı Re sayısında ayrılma kabarcığının uzunluğunun kısılmasına neden olduğu görülmüştür.

Giuni ve Green [22] NACA 0012 kanat profilinin farklı uç şekillerine göre uç girdaplarını incelemek için sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada akış görselleştirmek için duman teli yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmada görülmüştür ki; uç girdaplar firar kenarına doğru yayılarak akışı etkilemektedir. İlk girdabın yapısal olarak kendini takip eden ikinci girdaptan daha kararlı olduğu görülmüştür. Kanat ucunun yuvarlatılmış veya düz olması durumlarında aynı denemeler

yapılmış ve ucu yuvarlatılmış kanatlarda uç girdapların etkisini azalttığı görülmüştür. Her iki geometri için de farklı hücum açılarında deneyler yapılmış ve hücum açısının artması ile uç girdaplarının etkisinin arttığı görülmüştür.

Rijit kanatlar ile ilgili çalışmalar yanında son zamanlarda yarasa gibi hayvanların esnek kanatları üzerine çalışmalara yoğunlaşmış ve esnekliğin akışa etkisi gözlemlenmiştir. Shyy ve arkadaşlarının [23] yaptığı iki boyutlu durumlar için deneyler, membran salınımlı kararsız akışların birleşmesinin güçlü olduğunu göstermiştir. İz bölgesinde özellikle tutunma kaybı açıları sonrası için girdap ile membrani salınımları birleşmektedir. Rijit ve esnek membrani kanat profillerinin karşılaştırması esnekliğin tutunma kaybını geciktirebildiğini göstermiştir. Bu nedenle, esneklik doğada ve mühendislik uygulamalarında önemli bir pasif akış kontrol metodudur.

Üç boyutlu membrani kanatlar için bu şekilde detaylı araştırmalar sınırlıdır. Gordnier [24], düşük en-boy oranlı kanatlarda daha çok üç boyutlu ve uç girdaplı akışlar gözlemlenmiştir. Bu nedenle küçük en-boy oranlı kanatlarda akış-yapı etkileşimleri çok karmaşık olacaktır.

Béguin ve Breitsamter [25] insansız hava araçları uygulamalarında kullanılan şekil değiştiren kanat için deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada kanat profilinde esnek membran malzeme kullanmışlar. Mafsallı bir yapıdan oluşan çerçevenin üzerine membran malzeme kullanarak kaplanmış ve kanat profili yapısı oluşturulmuştur. Deneyler rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiş ve düz ve arkaya yatık kanat yapısı kullanarak yapılmıştır. Aerodinamik yüklere maruz kaldığında kanat yüzeyinde pasif bir deformasyon meydana gelmekte ve maksimum kaldırma-sürüklenme (L/D) oranında %6 ile %23 arasında iyileşme sağlanmıştır.

Timpe ve arkadaşları [26] membran kanat kullanarak pasif akış kontrolü üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Aerodinamik kuvvetler 6 bileşenli kuvvet ölçüm sistemi ile ölçülmüş, membran üzerinde meydana gelen deformasyonları belirlemek için Digital Image Correlation (DIC) sistemi ve esnek kanat üzerinde meydana gelen akış alanı ölçümleri için ise Particle Image Velocimetry (PIV) sistemi kullanılmıştır. Kullanılan esnek kanada %1.3 ve %2.8 ön gerilme uygulanmıştır. Taşıma katsayısı $\alpha=10^\circ$ 'ye kadar kanatlarda aynı eğilimi göstermiştir. Ayrıca, esnek kanatlarda hücum açısı $\alpha=10^\circ$ için yaklaşık %20, $\alpha=25^\circ$ için ise yaklaşık %25'lik bir taşıma artışı olmuştur. PIV deney

sonuçlarında rijit levhada $\alpha=12^\circ$ için akışın hücum kenarından ayrılırken, esnek kanatta ise akışın ayrıldığı bölge küçülmüş ve iz bölgesinde ters akışın olmadığı görülmüştür.

Rojratsirikul ve arkadaşları [27-29] 2 boyutlu esnek membran kanatları PIV sistemi ile deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışma sonucunda ortalama membran şeklin hücum açısına göre fazla değişmediği ve esnek kanat titreşim mod ve genliğinin ayrılmış akış tabakasının kararsızlığına ve yerine bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Membran kanat salınımı ile akış kararsızlığının etkileştiği gözlemlenmiş ve rijit kanat ile esnek kanat karşılaştırmaları sonucunda esnekliğin tutunma kaybını geciktirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca 2 boyutlu esnek kanatta fazla uzunluk oranı olduğunda titreşim modlarının, erken girdap oluşumu ve küçük ayrılmış akış bölgelerinin arttığı görülmüştür. Bunun yanında, Rojratsirikul ve arkadaşları [30-31] ayrıca 3 boyutlu esnek membran kanatları da çalışmışlardır. Bu çalışmalarda $AR=2$ düşük açıklık oranına sahip dikdörtgen ve delta membran kanatların $Re=2.4 \times 10^4$ - 5.9×10^4 iken akış durumunu incelenmiştir. Çalışma sonucunda dikdörtgen esnek kanadın delta esnek kanattan daha fazla taşıma sağladığı ve membran kanat titreşiminin iz bölgesi salınımları ile etkileşiminin muhtemel olduğu görülmüştür. Bunun yanında az sayıdaki deneyle $AR=2$ olan esnek kanadın 3 boyutlu membran titreşimlerinin dominant frekanslarının 2 boyutlu membran kanatlarınkine benzediği görülmüş ve değişik en/boy oranlarına sahip esnek kanatların durumunun incelenmesi gerektiği görülmüştür. Ayrıca yapılan deneyler ve literatürde bulunabilen sınırlı sayıdaki değişik en/boy oranlı kanat deneyleri sonucunda girdap kopma frekanslarının incelenmesi ile rijit kanatların membran titreşimlerinin doğal frekansına yakın girdap kopma frekanslarına sahip olabileceği görülmüş ve bu daha fazla deneyle değişik en/boy oranlı hem esnek hem de rijit kanatlar için bu durumun açıkça gösterilmesi gerektiği sonucu çıkarılmıştır.

Genç ve arkadaşları [32] en/boy oranı 1 ve 3 olan NACA4412 kanat profili için deneysel bir çalışma yapmışlardır. $AR=1$ kanat için stolun geciktiği ve girdaplardan dolayı ekstra bir taşıma sağladığını gözlemlemişlerdir. Öte yandan, uç girdaplarından dolayı sürüklemenin arttığı da görülmüştür. $AR=3$ kanatta, viskoz kuvvetler ve hücum kenarı ayrılımları $Re=2.5 \times 10^4$ ve $Re=5.0 \times 10^4$ etkili iken $Re=7.5 \times 10^4$ 'te kanat üzerindeki akış 2 boyutlu akış gibi davranmıştır. İz bölgesinde yapılan spektral analizlere bakıldığında, en/boy oranının ve kanat geometrisinin yüksek hücum açılarında ihmal edilebilir olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca, Koca ve arkadaşları [33]

NACA 4412 kanat profilinde LSB'nin yerini belirleyebilmek için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları deneysel çalışmada kısa ayrılma kabarcığı oluşumunu düşük hücum açılarında gözlemlemişlerdir. Ayrıca NACA 4412 kanat profilinde hücum açısının artması ile girdap kopma frekans değerinin arttığını görmüşlerdir. Ortalama ve rms hız değerlerine bakıldığında iz bölgesindeki akışın LSB ve firar kenarı ayrılmalarından etkilendiği görülmüştür. Ek olarak, LSB'nin patlaması nedeni ile taşıma kuvveti katsayısında ani bir düşüş olduğu görülmüştür ve ani stol durumu C_L eğrisinde hızlı bir azalış göze çarpmıştır. Ek olarak, Genç [34] yapmış olduğu deneysel çalışmada fazla uzunluğa sahip en/boy oranı 2 olan dikdörtgen esnek kanatta meydana gelen titreşimler ile hücum kenarı ve uç girdaplarının oluşumlarını incelemiştir. Kanatta meydana gelen kamburluğun artmasıyla ayrılmış akış oluşumunda gecikme meydana gelmiştir ve böylelikle taşıma kuvvetinin düşük hücum açılarında bile arttığı gözlemlenmiştir. Ek olarak, düşük hücum açılarında, kanattaki fazla uzunluğun hücum kenarı girdabı oluşumu ile titreşim modunun arttığı ve daha sonra bu girdapların büyümesi ve uç girdaplarıyla birleşmesi ile titreşim modunun tekrar düştüğü gözlemlenmiştir. Hücum kenarı girdapları ile uç girdapları birleşerek kanattaki kararsızlığı arttırmaktadır ve kanatta meydana gelen deformasyonların daha karmaşık hal almasına sebep olduğu görülmüştür. Esnek kanatlar ile alakalı araştırma ise bu tez çalışmasında yapılmıştır.

Tamai ve diğerleri [35] düşük Re sayılarında esnek kanat kullanarak deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. PIV tekniği kullanarak farklı hücum açıları için esnek kanat üzerindeki akış alanı içindeki girdap ve türbülanslı akış yapısı incelenmiştir. Ayrıca kanat profili üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler ölçülmüş ve rijit olan profil ile karşılaştırıldığında daha iyi bir performans gösterdiği ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada esnek kanatta meydana gelen deformasyonların efektif hücum açısını düşürdüğü için tutunma kaybını geciktirdiği görülmüştür. Arbós-Torrent ve arkadaşlarının [36] yaptıkları çalışmada amaç, hücum/firar kenar çerçevelerinin membran üzerindeki etkilerini ölçmek ve ileriki çalışmalar için geometri seçiminde öneriler sağlamaktır. Testler düşük Re sayısında ($Re=9 \times 10^4$) ve 2° - 25° hücum açısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Dört farklı hücum/firar kenar tasarımlarının membran kanat performansları üzerindeki etkilerini incelemek için kuvvet ölçümlerinin yanı sıra yüksek hızlı kameralarla fotoğraflama tekniği kullanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; ortalama

kamburluğun membran titreşimlerinin hem modlarına hem de frekanslarına geometri ve hücum/ firari kenar çerçevelerinin boyutu etki etmektedir. Dikdörtgen kesitli hücum çerçeveler dairesel kesitli olanlara nazaran daha yüksek taşıma kuvvetleri ve daha yüksek ortalama kambur deformasyonu sağlamaktadır. Çerçevelerin aerodinamik yük altında saptığı ve sonuç olarak kanadın performansını değiştirdiği görülmüştür. Ayrıca, bazı çerçevelerin kendi rezonans frekanslarında titrediği gözlemlenmiştir.

Bleischwitz ve arkadaşları [37] yer etkisinin membran kanatların aeromekaniğine etkisini araştırmışlardır. Deneyler rüzgar tüneline $Re=5.6 \times 10^4$ de dikdörtgensel rijit ve membran kanatlar kullanarak yapılmıştır. Membran hareketlerini tahlil etmek için DIC sistemi kullanılmıştır. Membran titreşimlerinin 3 boyutlu-zamansal yapısını incelemek için Uygun Ortogonal Ayırıştırma (*Proper Orthogonal Decomposition*) tekniğini kullanmışlardır. Sonuç olarak yer etkisi daha yüksek taşıma üretimine sebep olmuş ve kuvvet ve membran salınımları arasındaki korelasyonlar vasıtası ile maksimum kamburun anlık geriye doğru hareketi taşıma elde edilmesine sebep olmuştur. Ayrıca maksimum kamburun ileri doğru konumu daha düşük sürüklemeye yol açmıştır. Bu durum yüksek aerodinamik verimi sağlamıştır. Stol durumuna yakın koşullarda, membran deformasyonlarının 3 boyutlu yapısının çoğunlukla kort boyunca yönlendiği görülmüştür. Membran deformasyonlarının 3 boyutlu yapısının aynı hücum açısında yerden uzaklığın azalması ile arttığı görülmüştür. Wrist ve arkadaşları [38] esnek düz ve kamburlu membran (*silikon kauçuk*) kanatlı MHA'nın aerodinamik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Deneyler düşük hızlı rüzgar tüneline değişen hücum açılarında (-4° den 24° ye kadar) $Re=5.0 \times 10^4$ de gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlara göre, düz çerçevelerle kıyaslandığında kambur çerçeveli esnek MHA kanatlarının maksimum kaldırmayı ve aerodinamik verimi arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, kambur çerçeveli kanatların düz çerçevelilere nazaran daha fazla negatif yunuslama momentine yol açtığı görülmüştür. Attar ve arkadaşları [39] düz membran kanadın aerodinamik karakteristikleri ile alakalı deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneyler 1.37×10^4 , 2.26×10^4 , 3.63×10^4 de, 27° hücum açısında rijit düz plaka boyunca 3 farklı membran ön gerilme değeri (%5, %7 ve %10) için gerçekleştirilmiştir. Tutunma kaybı açısının ön gerilmeye bağlılığı zayıftır ve Re sayısının artması ile artmaktadır. En yüksek Re sayısı hariç olmak üzere, esnek-model tutunma kaybı açılarının rijit düz plaka sonuçları ile benzer olduğu görülmüştür. En büyük Re sayısında ise esnek

modeller için dinamik sonuçlar genellikle hücum açısının artması ile azalan taşıma ve sürüklemenin büyük salınım değerlerini ortaya çıkarmıştır. Aeroelastik çırpma kararsızlığı esnek modeller için büyük dinamik tepkinin neden olduğu kabul edilmektedir. Bu hipotez bir potansiyel akış tabanlı hesaplamalı aeroelastik model kullanılarak elde edilen sonuçlar ile desteklenmiştir. Bu aeroelastik kararsızlık kaynaklı titreşimler esnek modellerin daha yüksek Re sayısında daha iyi tutunma kaybı karakteristikleri gösterdiği mekanizma olarak önerilmiştir.

Galvao ve arkadaşları [40] $AR = 0.92$ membran kanat üzerinde oluşan yer değiştirmeyi ölçmek için fotogrametrik teknik kullanarak deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Büyük mod sayısı dik taşıma eğrileri ve daha yumuşak tutunma kaybı durumunu belirginleştirmiştir. Akış ayrılmasından dolayı, yüksek hücum açılarında kanattaki kamburluk azalmıştır.

Sabit esnek kanatlar çalışmaları yanında sinek, böcek veya yarası gibi canlıların kanat aerodinamiğini anlamak için çırpma hareketi yapan esnek kanatlarla ilgili çalışmalarda literatürde araştırılmaya başlanmış olup bu konularda daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Hu ve arkadaşları [41] çırpma kanat aerodinamiğinde değişik esneklik oranına sahip kanatların aerodinamik performanslarını deneysel olarak araştırmıştır. Değişik esneklik oranına sahip 2 farklı malzeme kullanmışlar. Çırpma kanat uçuş rejiminde daha esnek olan kanadın en iyi itki performansına sahip olduğu görülmüştür. Yükselen uçuşta (*soaring flight*) ise en iyi aerodinamik performansı daha az esnek malzeme olan naylon kullanılarak üretilen kanat göstermiştir. Viieru ve ark. [42] çırpma kanatlar, yunuslama, hücum kenarı girdapları vb. ile alakalı düşük Re sayılı kararsız akış dinamiğinin anlaşılması için son gelişmeleri ele almışlardır. Üç farklı Re sayısında (10, 120, 6000) akış yapılarını inceleyerek hücum kenarı girdaplarının yapısının Re sayısı ile belirgin bir şekilde değiştiğini görmüşlerdir. $Re=120$ 'de hücum kenarı girdaplarının uç girdapları ile birleştiğini gözlemlemişlerdir. $Re=10$ 'da ise hücum kenarı girdabı, uç girdabı ve firar kenarı girdabı ile birleşen bir girdap halkası (vortex ring) gözlemlenmiştir.

Esnek kanatlarla ilgili deneysel çalışmalar yanında sayısal çalışmalarda mevcut olup yalnız esnek kanatlarda akışkan-yapı etkileşimini modellemek zor olduğundan çalışma sayısı azdır. Bu tür sayısal çalışmalarda yapısal ve akış modellemesini birbiri ile iletişim

halinde gerçekleştirmek gerektiğinden hem birlikte çözülecek denklemler karmaşık ve çoktur hem de bu denklemleri çözmek için bilgisayar altyapısının güçlü olması gerekmektedir. Hefeng ve arkadaşları [43] akışkan-yapı etkileşimini göz önüne alarak segmentli esnek kanatlar üzerinde $Re=1.35 \times 10^5$ iken sayısal bir çalışma yapmıştır. Üst kısmı membran alt kısmı rijit olan dört çeşit esnek kanat kullanılmıştır. Akış alanı ile segmentli esnek kanatların yapısı arasındaki tepkinin ve aerodinamik karakteristiklerin sayısal simülasyonu için akışkan-yapı etkileşim (FSI) metodu benimsenmiştir. Esnek deformasyonun taşıma ve sürükleme karakteristiklerine etkileri üzerinde durulmuştur. Elde edilen sonuçlardan segmentli esnek kanatların daha yüksek taşıma katsayısına sahip olduğu ve tutunma kaybını geciktirdiği görülmüştür. Yüksek hücum açılarında, esnek membran deformasyonu girdap ayrılmalarının büyüklüğünü düşürmüştür. Rijit muadili ile karşılaştırıldığında taşıma katsayısını %39 oranında artıran üç segmentli esnek kanadın diğer dört kanat arasında en iyi olduğu görülmüştür.

Lian ve Shyy [44] laminar ayrılma ve geçiş ile nitelendirilmiş düşük Reynolds sayılı akışı üzerinde çalışmak için bir geçiş modeli ile Reynolds-Ortalamalı-Navier Stokes (RANS) denklemini birleştirmiştir. Laminar ayrılmaya maruz kalan düşük Re sayılı geçiş akışı için uygun olan yeni bir kesiklilik (*intermittency*) fonksiyonu önermiş ve test etmişlerdir. SD7003 kanat profilinden çerçeve kullanarak esnek membran kanat ve rijit kanadın performanslarını araştırmışlardır. Geçiş yeri (*transition location*), aerodinamik katsayılar ve genel akış yapıları ile ilgili tahminler ve deneysel ölçümler arasında iyi bir uyum olduğunu görmüşlerdir. Aynı zamanda hamleli rüzgarın (*gust*) geçiş süreci ve kanat performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kendinden uyarmalı (*self-excited*) esnek yüzey titreşiminin ayrılma ve geçiş pozisyonlarını etkilediğini gözlemlemişlerdir. Fakat zaman ortalama taşıma ve sürükleme katsayılarının rijit kanadinkine yakın olduğu görülmüştür. Hücum açısının artması ile hem ayrılma noktası hem de geçiş noktasının yeri yukarı akış yönünde (upstream) hareket etmiştir.

Ke ve arkadaşları [45] salınım yapan kanat için esnek yapısal modelleme ile sayısal analiz yapmıştır. Salınım yapan kanadın esnek yapılarıyla alakalı bir dizi denklem türetmişlerdir. Ek olarak, tasarım prensibini, tasarım sürecini ve salınım yapan kanadın analitik metodunun uygulama aralığını detaylı bir şekilde vermişlerdir. Esnek yapısal salınım yapan kanat modeli oluşturulmuş ve ilgili zaman tepki analizi ve frekans tepki analizi yapılmıştır. Analitik sonuçlardan; salınım yapan kanadın titreşim problemlerinin

olmadığı ve itme kuvveti üretecek durumda olduğu görülmüştür. Gordnier ve Attar [46] esnekliğin membran kanat üzerindeki aerodinamik etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. MHA'lar için esnek membran kanatlarda uygulanmak üzere geliştirilen aeroelastik çözücü geliştirilmiştir. Esnek membranı modellemek için Navier-Stokes denklemlerini ve Reissner-Mindlin sonlu elemanlar metodunu birleştirmişlerdir. MHA'lar ile ilgili düşük Re sayılı akışlar için laminar/geçiş/türbülanslı akış alanlarını hesaplayabilmek için LES (Large Eddy Simulation) türbülans modelini kullanmışlardır. AR=2 olan membran kanat için hesaplamalar $\alpha=10^\circ$, 16° ve 23° hücum açılarında ve $Re=24300$ 'de gerçekleştirilmiş ve Roratsirikulu'un PIV deney sonuçları ve yüzey deformasyon ölçümleri ile kıyaslanmış ve makul bir uyuşma görülmüştür. Esnek membran kanat ile kanat üzerindeki kararsız akış arasındaki etkileşimden dolayı ayrılmada azalma ve kaldırmada artış elde edilmiştir. Song ve arkadaşları [47] düşük en/boy oranına sahip dikdörtgen membran kanatların aerodinamiği üzerinde $0.7-2.0 \times 10^5$ aralığındaki Re sayılarında çalışmışlardır. Taşıma ve sürüklenme katsayıları değişen en/boy oranları için ölçülmüştür. Membran kanatların statik ve dinamik deformasyonlarının ölçümü için bir stereo fotogrametri kullanılmıştır. Ölçümlerde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, membran kanatların daha yüksek kaldırmaya sahip olduğu ve tutunma kaybını geciktirdiği görülmüştür. Buna ek olarak, membran titreşimlerinin serbest akım hızının artması ile arttığı gözlemlenmiştir.

Esnek kanatlar üzerine deneysel ve sayısal olarak yapılan çalışmaların özeti Tablo 1'de verilmiştir. Bu çalışmalar genel olarak farklı kanat tipleri ve farklı Re sayıları için gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan bu çalışmalara ilave olarak, bu tez çalışmasında farklı açıklık oranına sahip esnek membran kanatta meydana gelecek yer değiştirme ve bu yer değiştirmenin LBS'yi nasıl etkilediği, membran yüzeyde oluşan titreşimlerin LSB'yi nasıl etkilediği, akış karakteristiklerinin dağılımları ve ayrıca membran kanat ile akış arasında meydana gelen akışkan-yapı etkileşimleri hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir.

Tablo 1. Literatür taraması sonuçları

Yazar	Kanat tipi	Çalışma türü	Re
Béguin ve Breitsamter [25]	elasto-flexible biçim değiştiren kanat	Deneysel	2.3x10 ⁵ , 3.5x10 ⁵ , 4.6x10 ⁵
Timpe ve ark. [26]	rijit ve membran kanat (AR=4.3)		5x10 ⁴
Rojratsirikul ve ark. [27-29]	rijit ve 2 boyutlu esnek membran kanat (2D)		5.31x10 ⁴ , 7.97x10 ⁴ , 10.6 x10 ⁴
Rojratsirikul ve ark. [30-31]	3 boyutlu esnek membran (AR=2) ve delta membran kanat		2.4x10 ⁴ - 5.9 x10 ⁴
Hu ve ark. [41]	Cybird-P1® remote control ornithopter model		1x10 ⁴ , 2x10 ⁴ , 8x10 ⁴
Tamai ve ark. [35]	farklı esnek yüzeylere sahip esnek kanatlar (FM01, FM02, FM03, FM10)		7.5x10 ⁴
Arbo's-Torrent ve ark. [36]	farklı hücum/fırar çerçeve geometrisine sahip membran kanat		9x10 ⁴
Bleischwitz ve ark. [37]	dikdörtgensel rijit ve AR= 2 membran kanat		5.6x10 ⁴
Wrist ve ark. [38]	NACA 2504, 4504, 6504, 4404, 4504, 4604, ve 4506 çerçeveli membran kanat		5.0x10 ⁴
Attar ve ark. [39]	düz plakalı membran kanat		1.37x10 ⁴ , 2.26x10 ⁴ , 3.63x10 ⁴
Galvao ve ark. [40]	membran kanat (AR=0.92)		7x10 ⁴ - 2x10 ⁵
Viieru ve ark. [42]	fruit fly (drosophila)	Sayısal	10 ⁴ -10 ⁵
Hefeng ve ark. [43]	NACA0012 parçalı esneklikli kanat		1.35x10 ⁵
Lian ve Shyy [44]	SD7003 kanadına esneklik verilmiştir		6x10 ⁴
Gordnier ve Attar [46]	membran kanat (AR=2)	Sayısal ve Deneysel [31]	2.43x10 ⁴
Song ve ark. [47]	dikdörtgen membran kanat (AR=0.9,1.4, 1.8)	Sayısal ve Deneysel	7x10 ⁴ - 2x10 ⁵

Ayrıca esnek kanatlar üzerinde meydana gelen laminar ayrılma kabarcığı, türbülansa geçiş konularında detaylı çalışmanın olmadığı, açıklık oranı 3 (AR=3) olan bir esnek kanat üzerinde çalışmanın ve diğer farklı en/boy oranları ile karşılaştırmalı bir çalışmanın olmadığı görülmüş ve bu tez kapsamında literatürde bu açık tespit edilmiştir. Bu açığı kapatmak için bu tez kapsamında deneysel ayrıntılı bir çalışma yapılmış, ayrıca çok fazla deney yerine sayısal modellemeyi deneysel verilerle doğrulayarak daha az maliyetle daha fazla seçeneği çalışmak için hem ticari ANSYS FLUENT yazılımı hem de açık kaynak kod (GenIDLEST) kullanılmıştır.

2. BÖLÜM

ESNEK KANAT DENEYSEL ÇALIŞMALARI

2.1. Giriş

Bu tez çalışması kapsamında, yapılan deneysel çalışmalar ile günümüzde önemi artmakta olan düşük Re sayılı akış rejimlerinde uçan esnek kanatlı MHA üzerinde oluşan kararsız akış durumlarının aerodinamik performans üzerine etkisini daha iyi anlamak için farklı açıklık oranlarına sahip ($AR=1$, $AR=3$ ve $2D$) esnek kanatlar incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda aerodinamik performans, kanat üzerinde oluşan ayrılma kabarcığı ve uç girdaplarının akışa ve birbirlerine etkisi ve akışkan-yapı etkileşimi ile esnek kanat üzerinde meydana gelen deformasyonlar ve titreşimler incelenmiştir. Bu çalışma sonuçlarına geçmeden deneysel sistemleri kısaca tanıyalım.

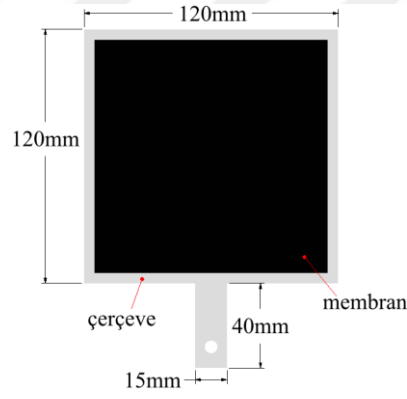
2.2. Rüzgâr Tüneli ve Özellikleri

Şekil 4'te görülen Rüzgar Mühendisliği ve Aerodinamik Laboratuvarında bulunan emmeli tip rüzgâr tüneli 500 mm x 500 mm boyutlarında kare kesite sahip şeffaf fleksibil malzemeden yapılmış bir test odasına sahiptir. Tünelde akışın emilimini sağlamak için 15 kW gücünde ve 1500 devir/dakika hızında çalışan fan kullanılmaktadır. Tünelin çalışma hız aralığı 0-40 m/s olup tünelde elde edilebilecek minimum hızdaki (5 m/s) türbülans yoğunluğu (Tu) %0.7, maksimum hızdaki (40 m/s) Tu is %0.35'e denk gelmektedir [18].

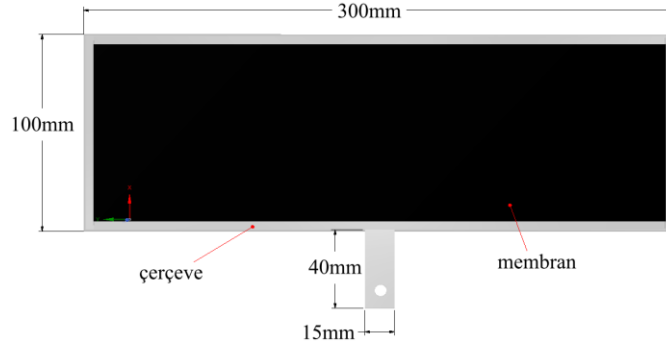


Şekil 4. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği rüzgâr tüneli

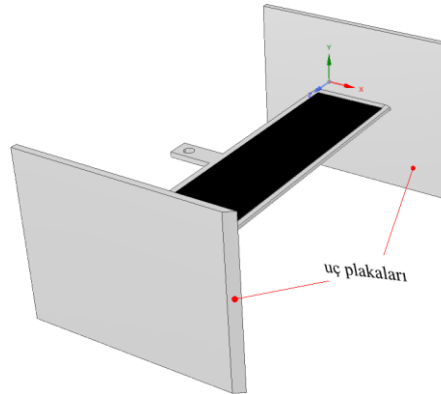
a) AR=1



b) AR=3



c) 2D

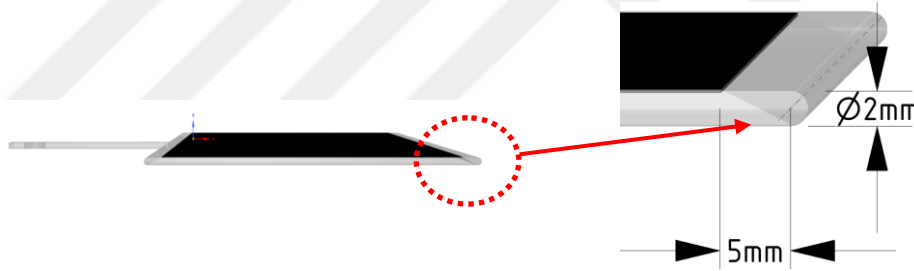


Şekil 5. Esnek membran kanatlar ve boyutları

2.3. Esnek Kanat Üretimi

Deneyisel çalışmada kullanılan esnek kanatların boyutları Şekil 5'te gösterildiği gibi olup veter uzunlukları, $AR=1$ için 120 mm iken $AR=3$ ve 2D esnek kanat için 100 mm'dir. 2D kanat deneyleri için $AR=3$ esnek kanadın her iki ucuna uç plakası yerleştirilmiştir. Esnek kanat çerçevesinin kanat üzerine gelen akışın bozulmasını önlemek için çerçevenin tüm kenarları kanat damlacık şekline (*airfoil-shaped*) sahip olacak biçimde (Şekil 6) tasarlanmış ve esnek kanatların çerçeveleri tel erozyon yöntemi ile çelik malzemeden üretilmiştir. Lateks kauçuk membran malzeme (Şekil 7), çerçevelerin (Şekil 8a ve Şekil 8b) üzerine çift taraflı bant ile yapıştırılarak (Şekil 8b ve Şekil 9b) esnek kanatların (Şekil 8c ve Şekil 9c) üretimi gerçekleştirilmiştir.

Lateks malzemenin özellikleri; kalınlık, $t= 0.2$ mm, elastisite modülü, $E=2.2$ MPa ve yoğunluğu, $\rho_m=1\text{g/cm}^3$ 'dir. Bu özelliklere ve akış şartlarına göre; aeroelastik katsayı $Re=2.5 \times 10^4$ için $\Pi=0.082$, $Re=5 \times 10^4$ için $\Pi=0.052$, $Re=7.5 \times 10^4$ için $\Pi=0.039$ 'dur.

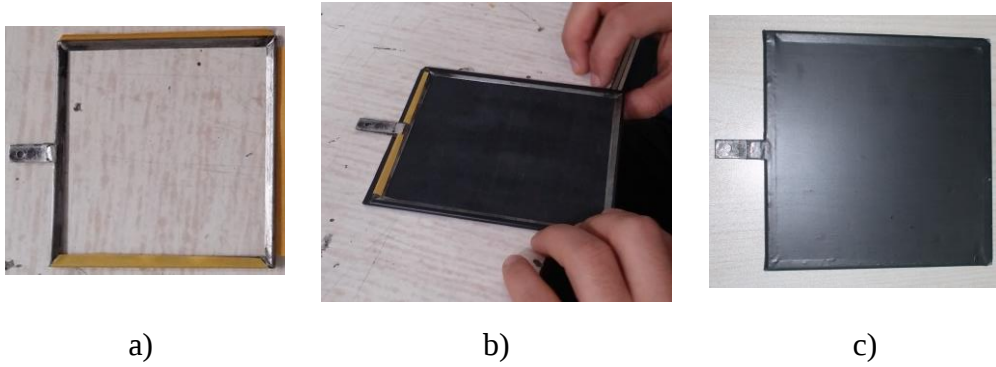


Şekil 6. Esnek kanat için üretilen çerçevenin yatay kesiti

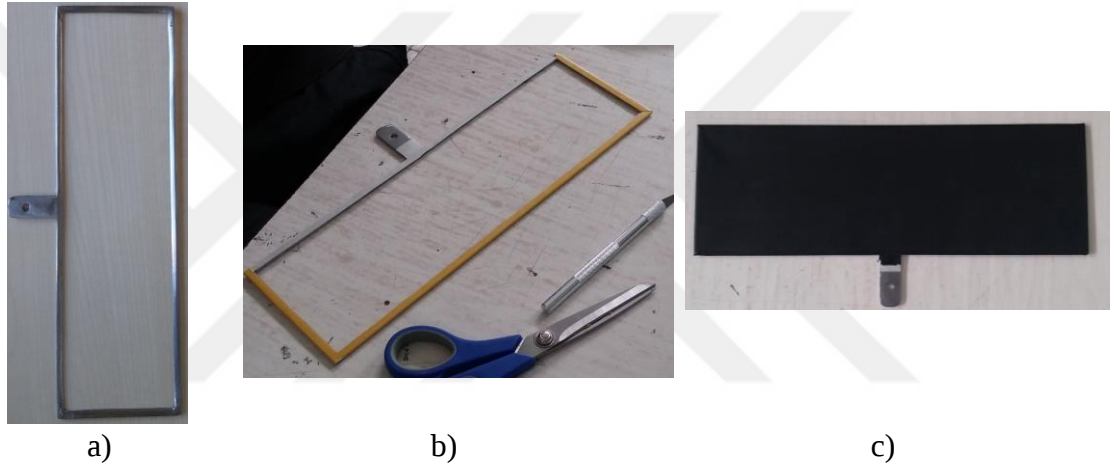


- Kalınlık, $t= 0.2$ mm
- Elastisite modülü, $E=2.2$ MPa
- Yoğunluk, $\rho_m=1\text{g/cm}^3$

Şekil 7. Esnek kanat için membran malzeme

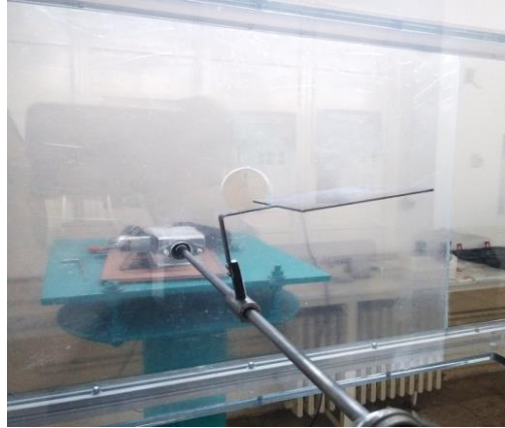


Şekil 8. AR=1 esnek membran kanat



Şekil 9. AR=3 esnek membran kanat

Membran malzeme kanat çerçevesine yapıştırılırken malzeme gerilmesin diye kesilip hazırlanmış lateks malzeme Şekil 8b’de görüldüğü gibi masa üzerine serilmiş, gerdirmeden kenarları masaya bantla hafifçe tutturulmuş ve sonra çift taraflı bant yapıştırılmış çerçeve üzerine yerleştirilip lateks malzemenin yapışması sağlanmıştır. Deneyler yapılırken bir süre sonra esnekliği değişen formu bozulan membran malzeme mümkün olduğunca yenilenmiştir. Örnek olarak üretimi tamamlanan AR=1 esnek kanadın rüzgâr tüneline yerleştirilmiş hali Şekil 10’da görülmektedir.



Şekil 10. AR=1 esnek kanat profili ve test odasında konumlanmış hali

Esnek kanadın rüzgâr tüneli test odasında yerleştirilmiş hali büyük bir alanı işgal ederse test odası duvarı ile kanat arasında kalan alan daralır ve akış düzeni bozularak blokaj hataları oluşur. Literatürde rüzgâr tüneli deneylerinde blokaj etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olabilmesi için blokaj oranının %10 sınırının altında olması gerekir [48, 49] Blokaj oranı kanat kesit alanının test odası kesit alanına oranıdır. Bu tez çalışmasında yapılan deneylerde örnek olarak büyük alana sahip AR=3 esnek kanadın (100 mm kort, 300 mm span uzunluklu) $\alpha=30^\circ$ hücum açısı için karşı kesit alanının (100 mm x $\sin 30^\circ$ x 300 mm) tünel kesit alanına (500x500 mm²) oranı yani blokaj oranı %6 iken $\alpha=40^\circ$ hücum açısı için ise %8 olup blokaj etkisi ihmal edilebilir seviyededir.

2.4. Kullanılan Deneysel Metotlar

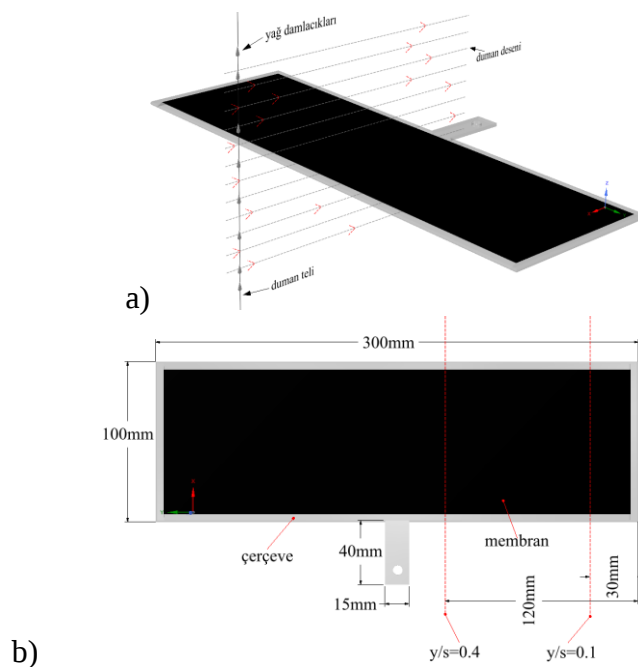
2.4.1. Akış Görselleştirme Deneyi

Kanat profili üzerindeki akış yapısını görselleştirmek için duman teli deneyi yapılmıştır. Duman teli ile akış görüntüleme deneyi cisim üzerinde akış yapısını görmek için en kolay ve en ucuz yöntemlerden biridir. Bunun yanında dezavantajları ise deneylerin karanlık ortam gerektirmesi (Şekil 11) ve dumana uygun açıdan ışık vererek iyi bir kamera ile görüntü odaklanmasının uygun ayarlanmasının zorluğudur. Bu nedenlerden dolayı aynı deney defalarca tekrarlanabilmekte ve zaman kaybı fazla olabilmektedir.



Şekil 11. Duman teli deneyi için oluşturulan karanlık ortam [50,51]

Bu deneysel yöntemde temel prensip, test odasında cisim öncesine yerleştirilmiş bir tel üzerinden yağ damlatılırken tele elektrik verilir ve elektrik geçen tel üzerinden yerçekimi etkisi ile damla damla aşağı akan yağ yanar ve dumanla çıkış çizgileri oluşturulur. Bu çıkış çizgileri test odasındaki akışla birlikte cisim üzerinden akar ve bu esnada cisim etrafındaki akış olaylarının görselleşmesine yardımcı olur. Şekil 12’de yapılan deneylerde duman teli konumları gösterilmiş ve telin konumu için y/s ifadesi kullanılmıştır. Şekil 12b’de gösterilen $y/s=0.1$ konumu uç girdaplarını, $y/s=0.4$ konumu ise ayrılma kabarcığının durumunu incelemek için seçilmiştir. Ayrıca kanadın alt ve üst yüzeyinden duman gönderilerek de farklı düşük Re sayılarında uç girdaplarının hücum açısı ve en/boy oranına göre değişimi araştırılmıştır.

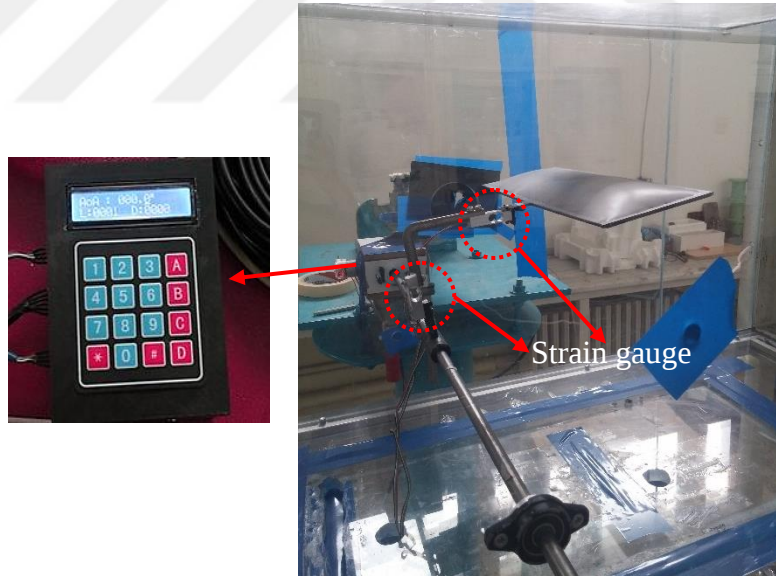


Şekil 12. Duman telinden tel yere dik iken duman gelişinin farklı konumları

2.4.2. Aerodinamik Kuvvet Deneyi

Esnek kanat profilinin değişik en/boy oranları ($AR=1$, $AR=3$ ve $2D$) için 3 farklı Re sayısında ($Re=2.5 \times 10^4$, 5.0×10^4 ve 7.5×10^4) ve 0° 'den 40° 'ye kadar belirli hücum açılarında aerodinamik kuvvetleri küçük kanatlar için kendi tasarladığımız bilgisayar kontrollü otomatik açı değişimli kuvvet ölçüm sistemi ile ölçülmüştür. Şekil 13'te verilen fotoğrafta görüldüğü gibi, taşıma ve sürüklenme kuvvetleri gerinim ölçer (*strain-gauge*) ile ayrı ayrı ölçülmekte ve bu ölçülen kuvvetler kanadın hücum açısına göre değişen, normal ve teğetsel yönlerdeki koordinatlardaki (C_n ve C_t) kuvvetlerdir. Ölçülen kuvvet değerleri koordinat dönüşümü ve hesaplamalar sonucu x- ve y-eksenlerindeki taşıma (C_L) ve sürüklenme (C_D) kuvvet katsayılarına (2) nolu eşitlik yardımıyla dönüştürülmüştür.

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U^2 A} , \quad C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 A} \quad (2)$$



Şekil 13. Elektronik göstergeli kuvvet ölçüm sistemi [52]

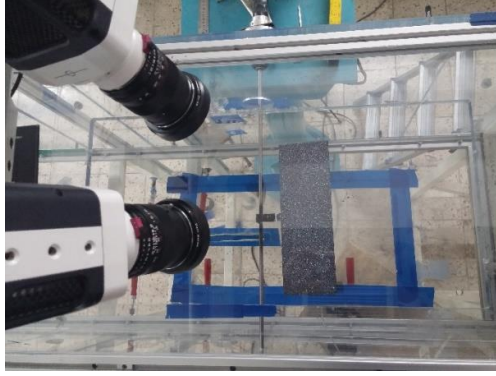
2.4.3. Deformasyon Ölçüm Deneyi

Esnek kanat üzerinde oluşan kararsız akışın kanat malzemesi üzerindeki etkisi ile esnek malzemede zamanla değişimler meydana gelmektedir. Bu değişimler deformasyon (yer değiştirme) olarak karşımıza çıkmakta ve bu anlık deformasyonların standart sapması kanatta meydana gelen titreşimler hakkında bilgi vermektedir. Esnek membran kanat

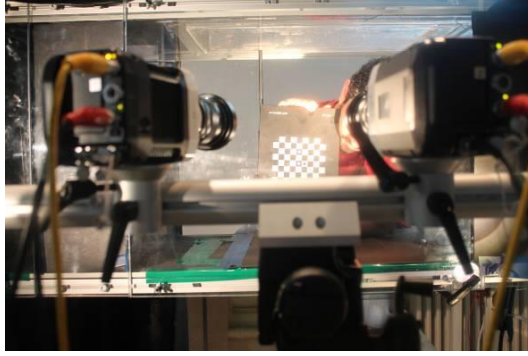
üzerinde oluşan deformasyonlar DANTEC Dynamics marka Q-450 model DIC (Digital Image Correlation) sistemi ile yapılmıştır [52]. DIC sistemi ile ölçüm alabilmek için esnek kanat üzerine boya püskürterek bu boya parçacıklarının hareketi takip edilmektedir. Boya püskürtülmüş esnek kanat profilleri Şekil 14’te gösterilmiştir. Bu partiküllerin hareketleri Şekil 15’te gösterilen yüksek hızlı 2 adet kamera yardımı ile izlenmekte ve kaydedilmektedir. Deneye başlarken ilk olarak esnek kanadın yüzeyine kamera odaklanmakta ve kameraların odağı ayarlandıktan sonra kalibrasyon işlemine başlanmaktadır. Şekil 16’da kalibrasyon işlem aşamalarını gösteren fotoğraflar görülmektedir. Kalibrasyon, 9x9 11mm’lik desenlerden oluşan kalibrasyon tahtası ile yapılmıştır. Bu kalibrasyon tahtası içerisindeki ölçüler ölçüm yapılacak alana göre farklı kullanılabilir. Daha sonra saniyede 1000 adet kaydedilen görüntülerin ISTR4D yazılımında korelasyon yapılmasıyla esnek malzemenin gösterdiği anlık şekil değişimi belirlenmektedir. Bu anlık elde edilen veriler daha sonra bir program yardımıyla işlenmekte ve ortalamalar hesaplanmaktadır. Bu tez çalışmasında, MATLAB’da ortalama deformasyonlar ve standart sapmaların hesaplanması için kod yazılmıştır. Ayrıca Şekil 17’de DIC deneyi esnasında esnek membran kanatların halleri ve sistemin örnek gösterimi mevcuttur.



Şekil 14. Boya püskürtülen esnek kanatlar



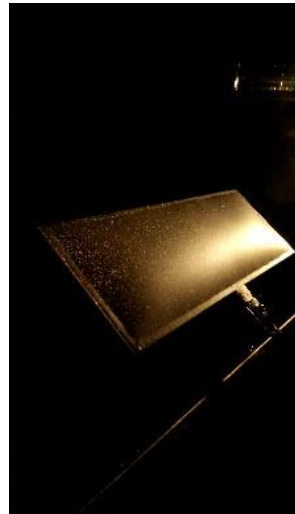
Şekil 15. DIC sisteminin ayarlanması



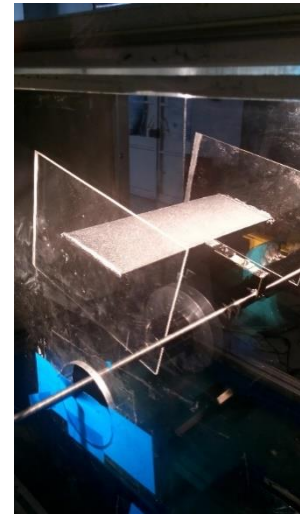
Şekil 16. DIC kalibrasyon işlemi



AR=1
Re=7.5x10⁴ $\alpha=36^\circ$



AR=3 [52]
Re=7.5x10⁴ $\alpha=36^\circ$



2D
Re=7.5x10⁴ $\alpha=10^\circ$

Şekil 17. DIC deneyi esnasında esnek kanatların deforme olmuş görüntüleri

2.4.4. Esnek Kanat Profili İçin Hız Dağılımlarının İncelenmesi

Kanat etrafındaki hız dağılımı Dantec® marka çok kanallı sabit sıcaklıklı sıcak tel anemometresi vasıtası ile (*Multichannel Constant Temperature Anemometer*) 2 boyutlu (*X-Wire*) 55P51 numaralı prob (Şekil 18) kullanılarak belirli bir hız alanı için yapılmıştır. Sıcak tel probu kanat yüzeyine yaklaştırılabildiği kadar yaklaştırılmış fakat esnek kanatta titreşim olmasından dolayı dikine daha yüksek noktalardan ölçüm alınmaya başlanmıştır. Esnek kanatta her bir deney durumu için sıcak-tel anemometresinde kanat üzerinde ölçüm yapılacak yatay ve dikey koordinatlar Microsoft Excel'de hesaplanarak tek tek belirlenmiş, bu belirlemeler yapılırken prob kırılmasın diye azami dikkat edilmiş, ayar yapıldıktan sonra her seferinde *X-wire* probun hem hız hem de açı kalibrasyonu yapılmıştır. Kanat üzerinde her x/c konumu için 2 kHz frekansta 20480 veri alınmış olup farklı Re sayısı ve farklı AR'lerde hem x-ekseninde hem de y-ekseninde değişen koordinatlarda ölçüm alınıyor olması deneyin zamanını çok arttırmaktadır. Bu nedenle hız deneyleri kanat üzerindeki akış, ayrılma kabarcığı, türbülansa geçiş gibi akış olaylarını görmek için kanat ortasında ve uç girdaplarının kanat üzerindeki akışa etkisini görebilmek için de kanat ucunda sadece 8° hücum açısı için yapılmıştır. Konum belirlenirken; kanat ortası olarak kullanılabilecek y/s=0.5'de kanat tutturma aparatı olduğu için y/s=0.4 ele alınmış, kanat ucu için ise biraz içeride kanat üstündeki bölge olarak y/s=0.1 ele alınmıştır. Sıcak tel anemometresi ile x ve y yönündeki çift eksenli prob ile ölçülen anlık u ve v hız bileşenleri kullanılarak DANTEC yazılımı ortalama hız ve türbülans yoğunluğu değerlerini 2 ve 4 nolu eşitlikleri kullanarak hesaplarken türbülans kinetik enerjisi ve Re gerilmeleri MATLAB yazılımı yardımıyla 5 ve 6 nolu eşitliklerden hesaplanmıştır. Çift eksenli prob ile ölçülen hızların ortalaması eşitlik 3, standart sapma ise eşitlik 4 ile hesaplanmaktadır.

Ortalama hız:

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u(i) \quad (3)$$

Hızların standart sapması, RMS (Root mean square):

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u(i) - \bar{u})^2} \quad (4)$$

Türbülans şiddeti: Çalkantı hızının karesinin ortalamasının karekökü olarak ifade edilen U_{rms} hızının ortalama hıza oranı şeklindedir. Bu durumda türbülans şiddeti;

$$Tu = \frac{u_{rms}}{\bar{u}} = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}} \quad (5)$$

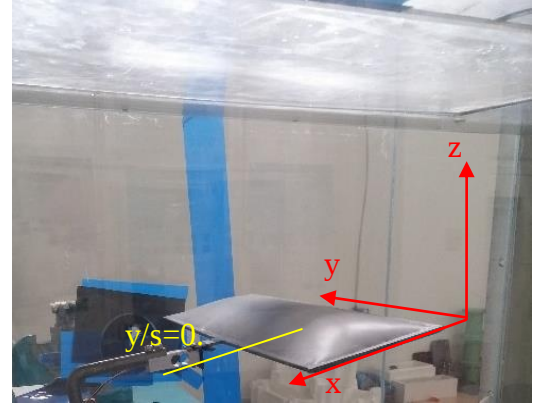
şeklinde elde edilir.

Türbülans kinetik enerji (TKE) ve Re gerilmesi (Re_{stress}) sırasıyla Eşitlik 6 ve 7 yardımı bulunur;

$$TKE = \frac{3}{4}(u'^2 + v'^2) \quad (6)$$

$$\overline{u'v'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u(i) - \bar{u})(v(i) - \bar{v}) \quad (7)$$

İki boyutlu akışta w yönündeki çalkantı hızı izotropik olduğu için diğer yöndekilerin toplamının yarısına eşit olduğundan TKE Eşitlik 6'daki gibi olur.



Şekil 18. Çift eksenli X-wire probunun test odasındaki görünümü

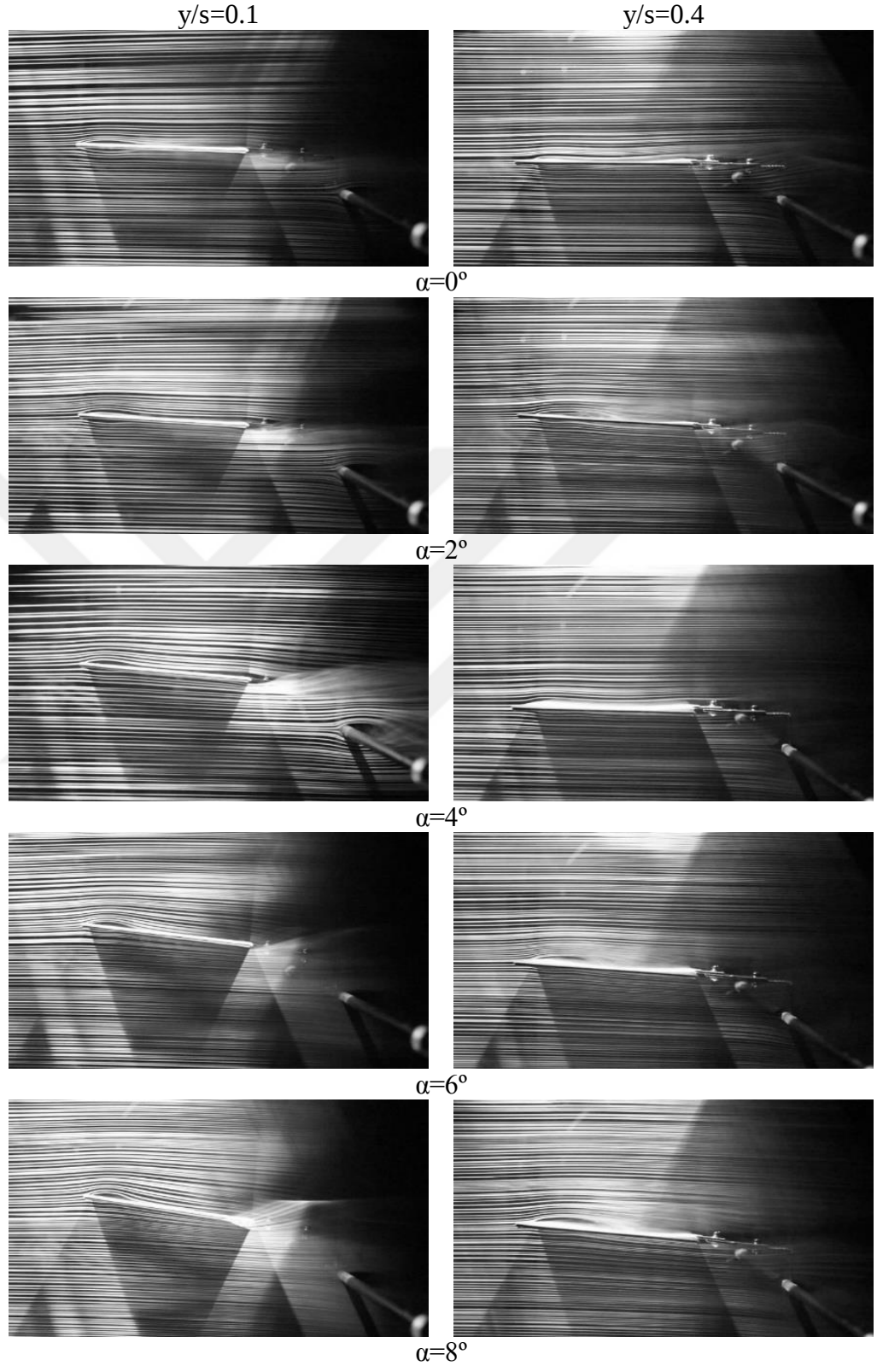
2.5. Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

2.5.1. AR=1 Esnek Kanat İçin Duman Teli Deneyi Sonuçları

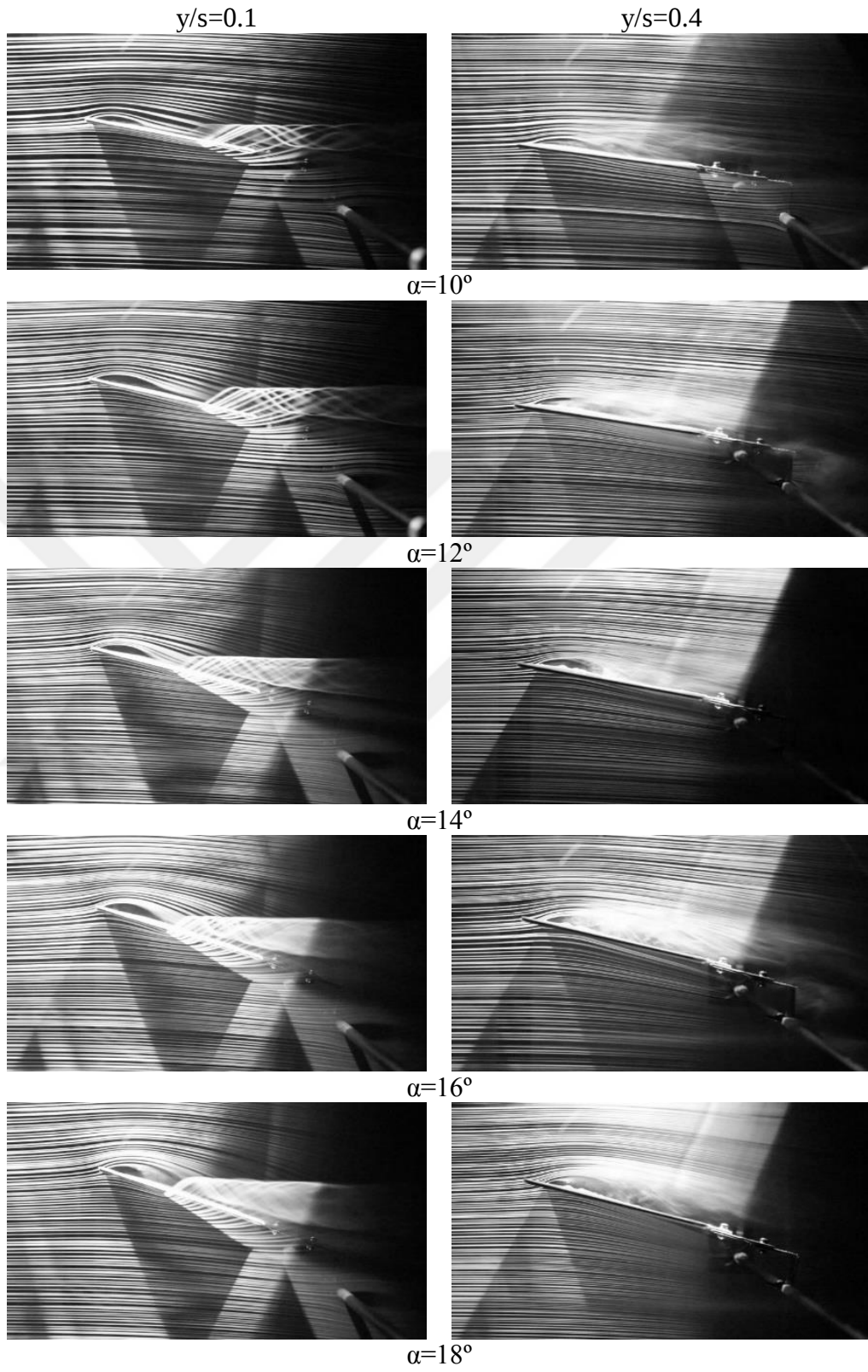
AR=1 esnek kanat profili üzerindeki akış olaylarının $y/s=0.1$ ve $y/s=0.4$ konumları için görselleştirilmesi ile elde edilen fotoğraflar Şekil 19-21 arasında verilmiştir. Uç girdaplarının etkisini incelemek için $y/s=0.1$ konumundaki sonuçlar incelendiğinde;

düşük hücum açılarında esnek kanadın uç bölgesinde kayda değer uç girdap oluşumu gözlenmezken hücum açısının artışı ile esnek kanat firar kenarına yakın bölgede uç girdapları spiral şekilde büyümekte ve iz bölgesini etkilemektedir. Aynı zamanda, hücum açısı artışıyla firar kenarındaki uç girdapları hem büyümekte hem de hücum kenarına doğru yaklaşmaktadır. Hücum açısı, $\alpha=30^\circ$ ve daha büyük açılarda uç girdabı hücum kenarından başlamakta ve spiral şekilde büyüyen bu uç girdabı kanat üstünde etkinliğini arttırmaktadır. Bunun yanında $y/s=0.1$ konumunda esnek kanat hücum kenarında, çerçeveden kaynaklanan akış ayrılması ve sonrasında kanat üstüne tutunması ile ayrılma kabarcığı oluşmaktadır. Bu kabarcık, düşük hücum açılarından orta derecede ($\alpha=0^\circ-12^\circ$) hücum açlarına kadar büyüme eğiliminde iken $\alpha=12^\circ$ hücum açısından sonra sabit kalmaktadır. Bunun sebebi uç girdaplarının $\alpha=12^\circ$ 'den sonra kanat üzerinde daha etkin olmasıdır. Kanat ucunda uç girdabı gelişimi Re sayısı arttıkça atalet kuvvetlerin artmasıyla birlikte kanat üstünde basınç azalması daha fazla olduğu için kanat altındaki daha yüksek basınç uç girdaplarını büyütmede ve uç girdaplarının kanat etrafındaki akışa etkisi artmaktadır.

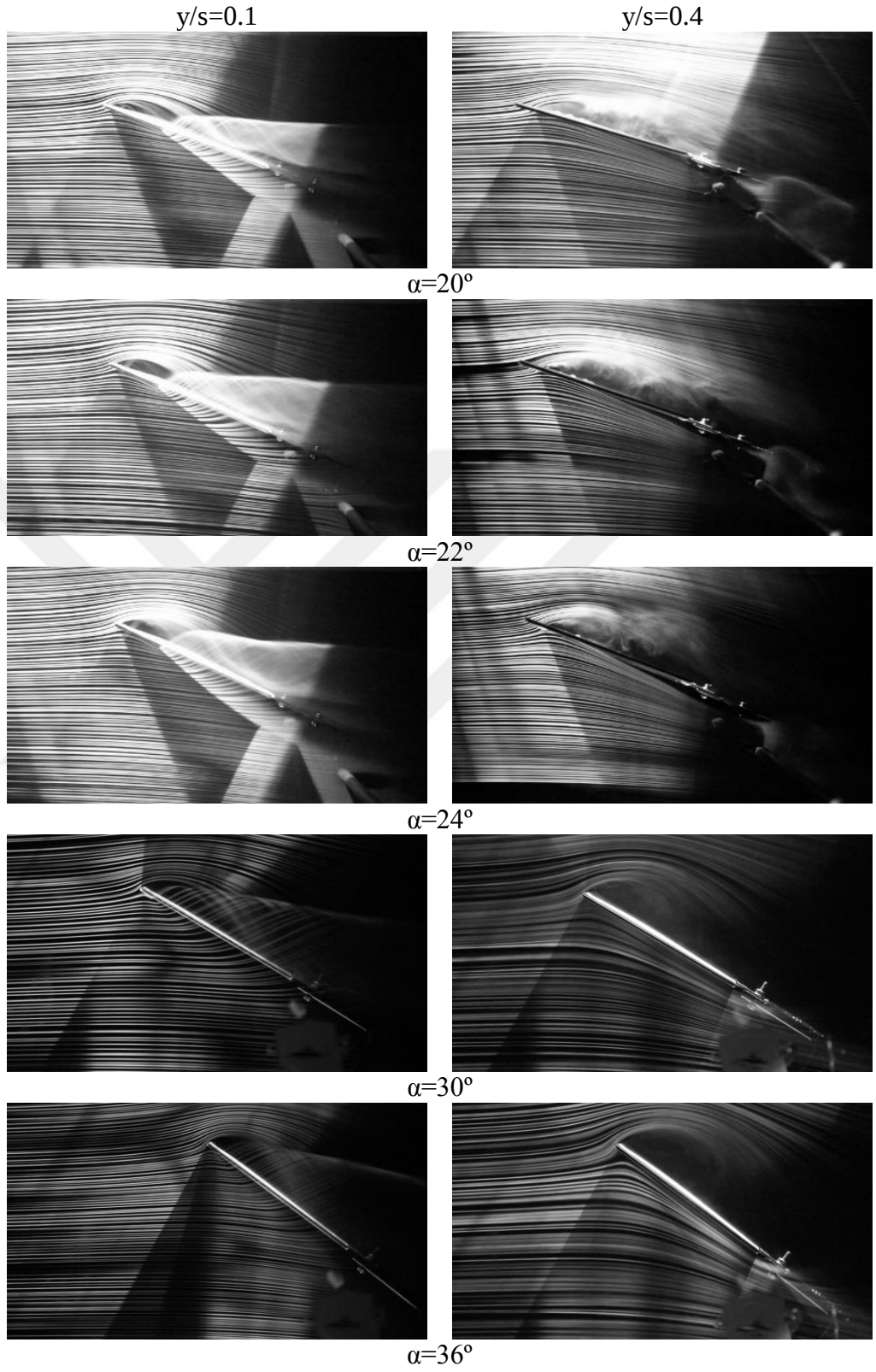
AR=1 esnek kanat üzerinde akış durumu ve LSB oluşumunu incelemek için $y/s=0.4$ konumundaki sonuçlar incelendiğinde; hücum kenarında meydana gelen ayrılma ve sonrasında tekrar yapışma dolayısıyla oluşan LSB, hücum açısının artışı ile büyümektedir. $\alpha=14^\circ$ 'ten sonra tutunan akış tekrar ayrılmaktadır. Bu ayrılmalar sonucunda oluşan girdaplar esnek kanada çarpmaktadır. $\alpha=24^\circ$ 'ten sonra ise akış ayrılmaları ve oluşan girdaplar büyümekte ve bu girdaplar esnek kanadın firar kenarına yakın yere çarpmaktadır. $\alpha=30^\circ$ 'den sonra akışın aslında tamamen ayrılmadığı kanat üzerine doğru bir miktar tutunmak istediği gözükmemektedir. Bunun nedeni yüksek basınçtan alçak basınca doğru hareket eden uç girdapları firar kenarına doğru hareket ve bu uç girdapları kanat firar kenarı bölgesinde birleşerek buradaki basıncı düşürür, vakum etkisi yapar ve kanat üstündeki akışı firara doğru çeker. Ayrıca, Re sayısı arttıkça kanat üzerinde oluşan hücum kenarındaki ayrılmalar küçülmemekte ve $\alpha=18^\circ$ 'den sonra tutunan akış tekrar ayrılmakta ve oluşan girdaplar kanada çarpmaktadır.



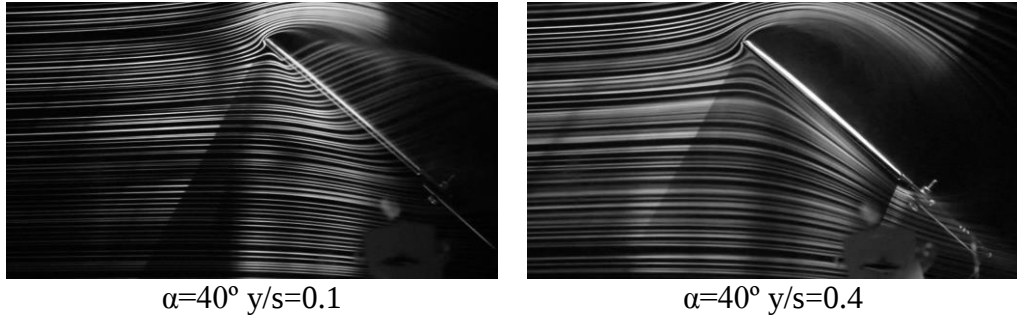
Şekil 19. Duman teli ile akış görselleştirme ($AR=1$ ve $Re=2.5 \times 10^4$)



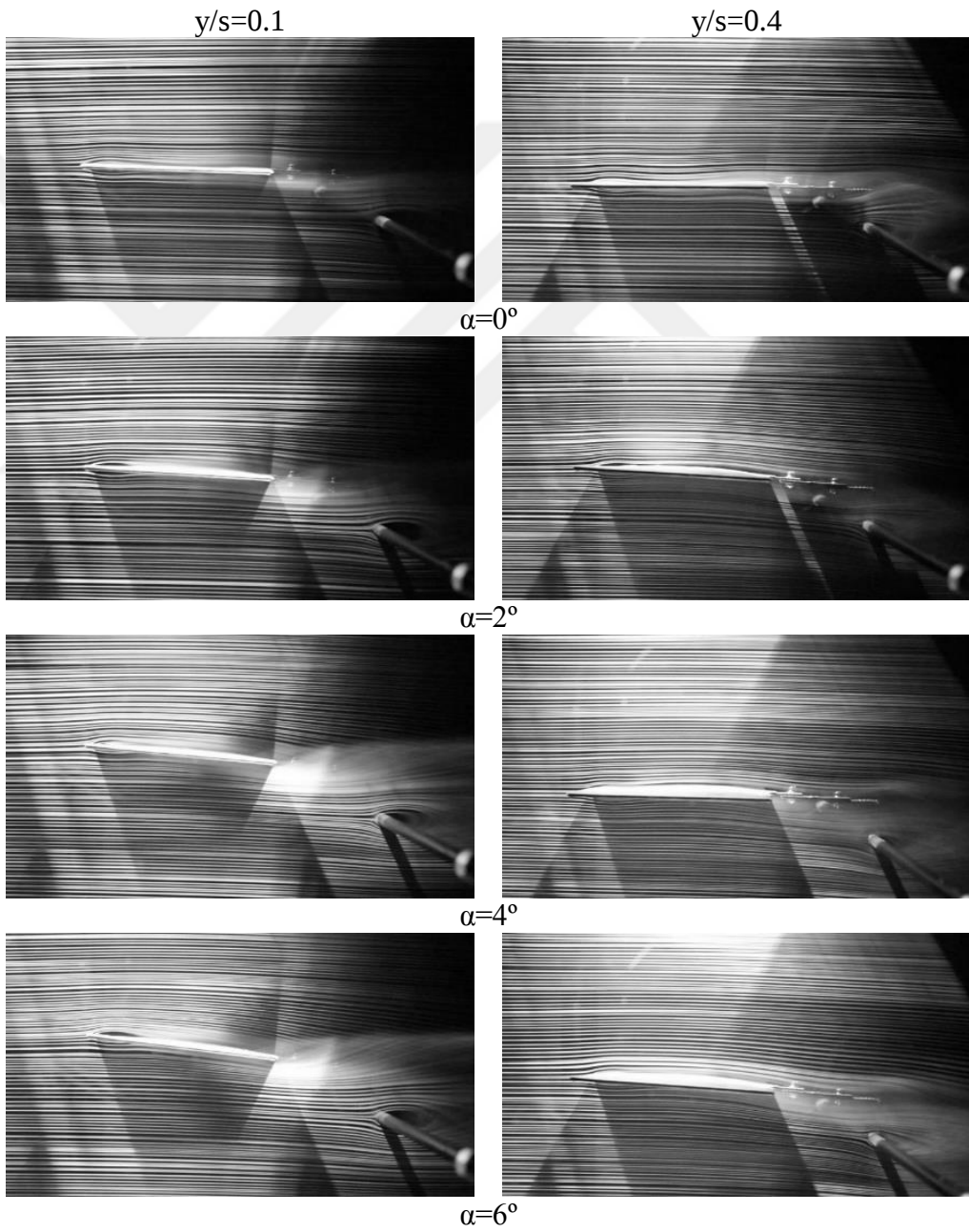
Şekil 19. Devamı

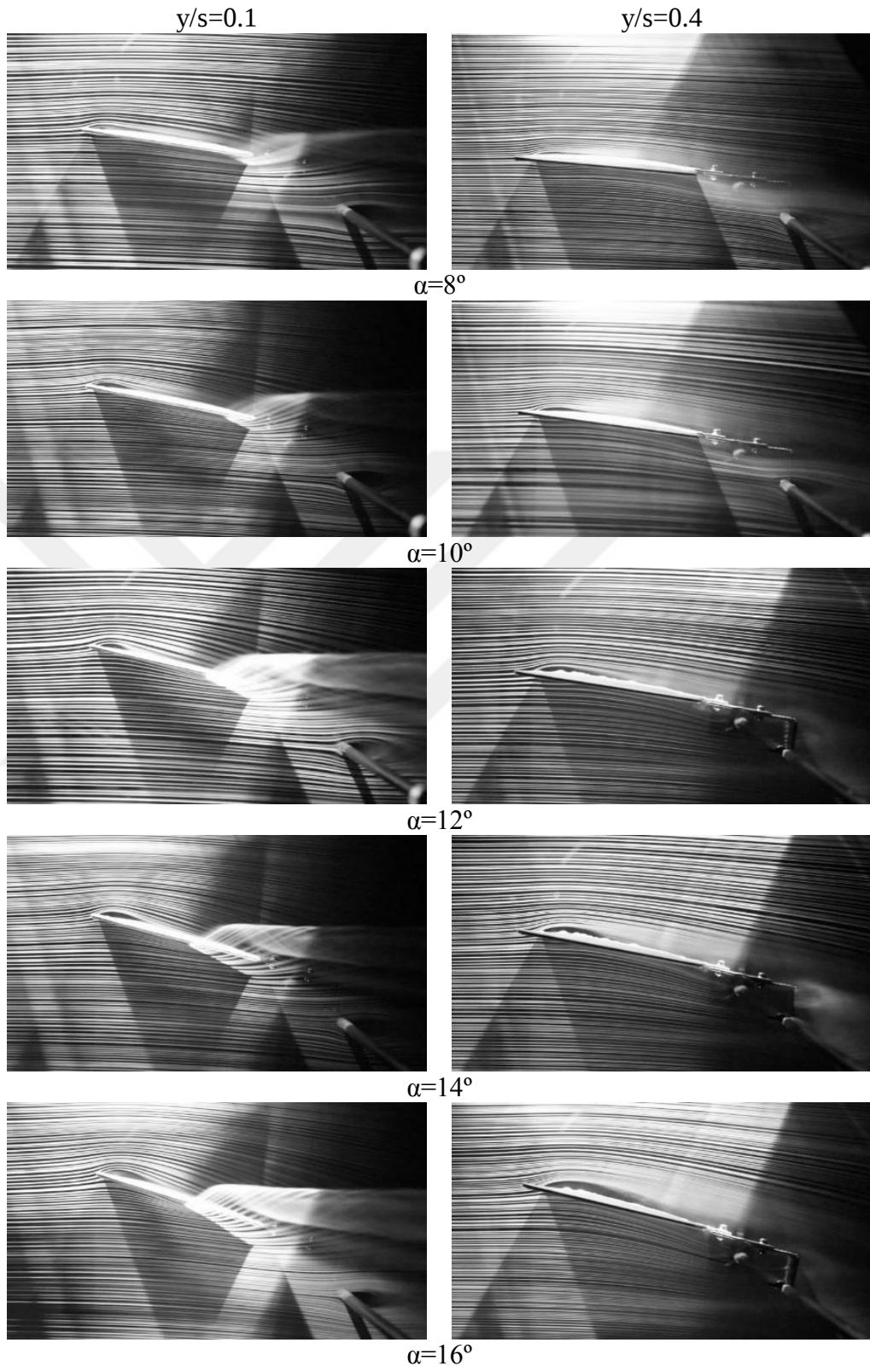


Şekil 19. Devamı

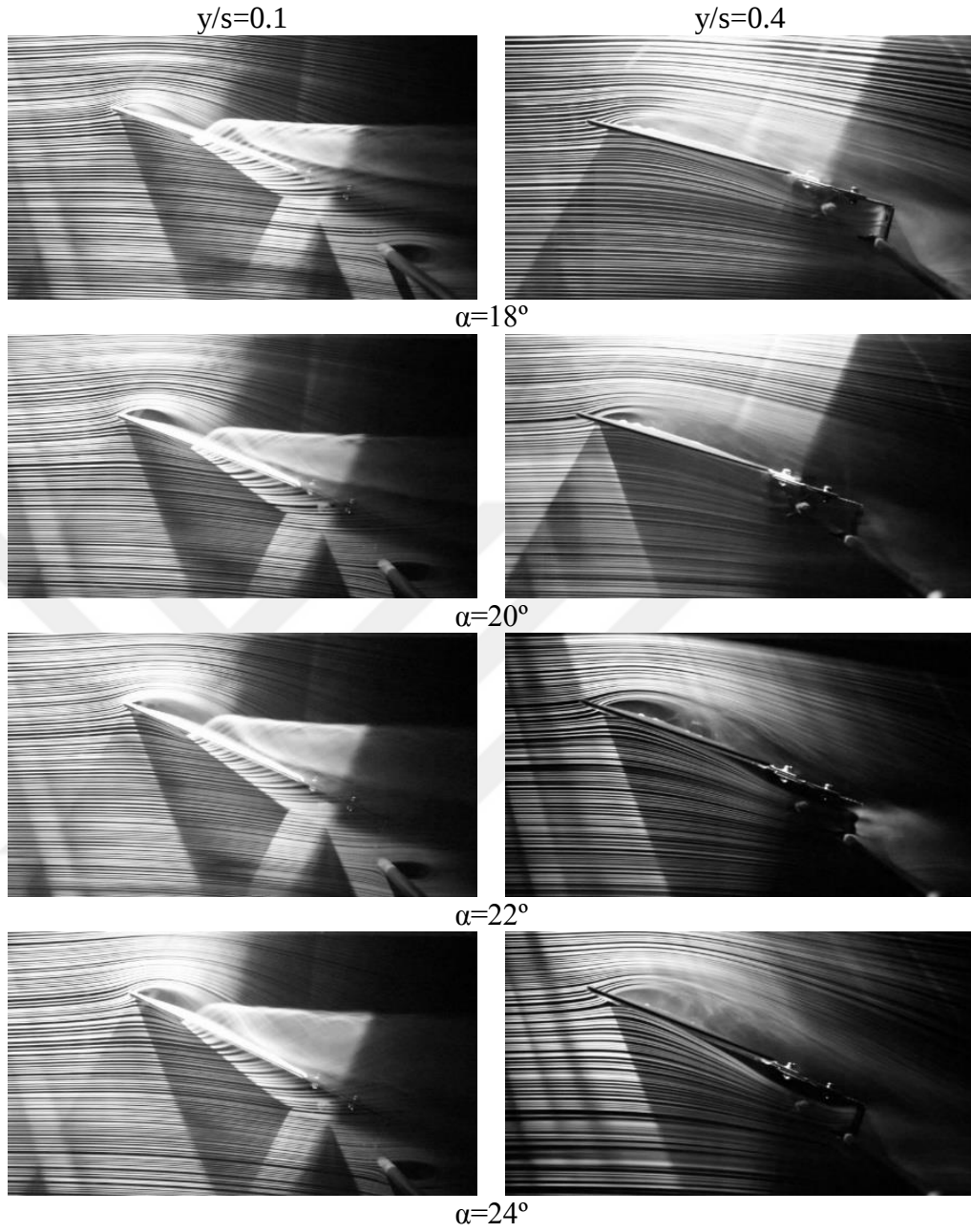


Şekil 19. Devamı

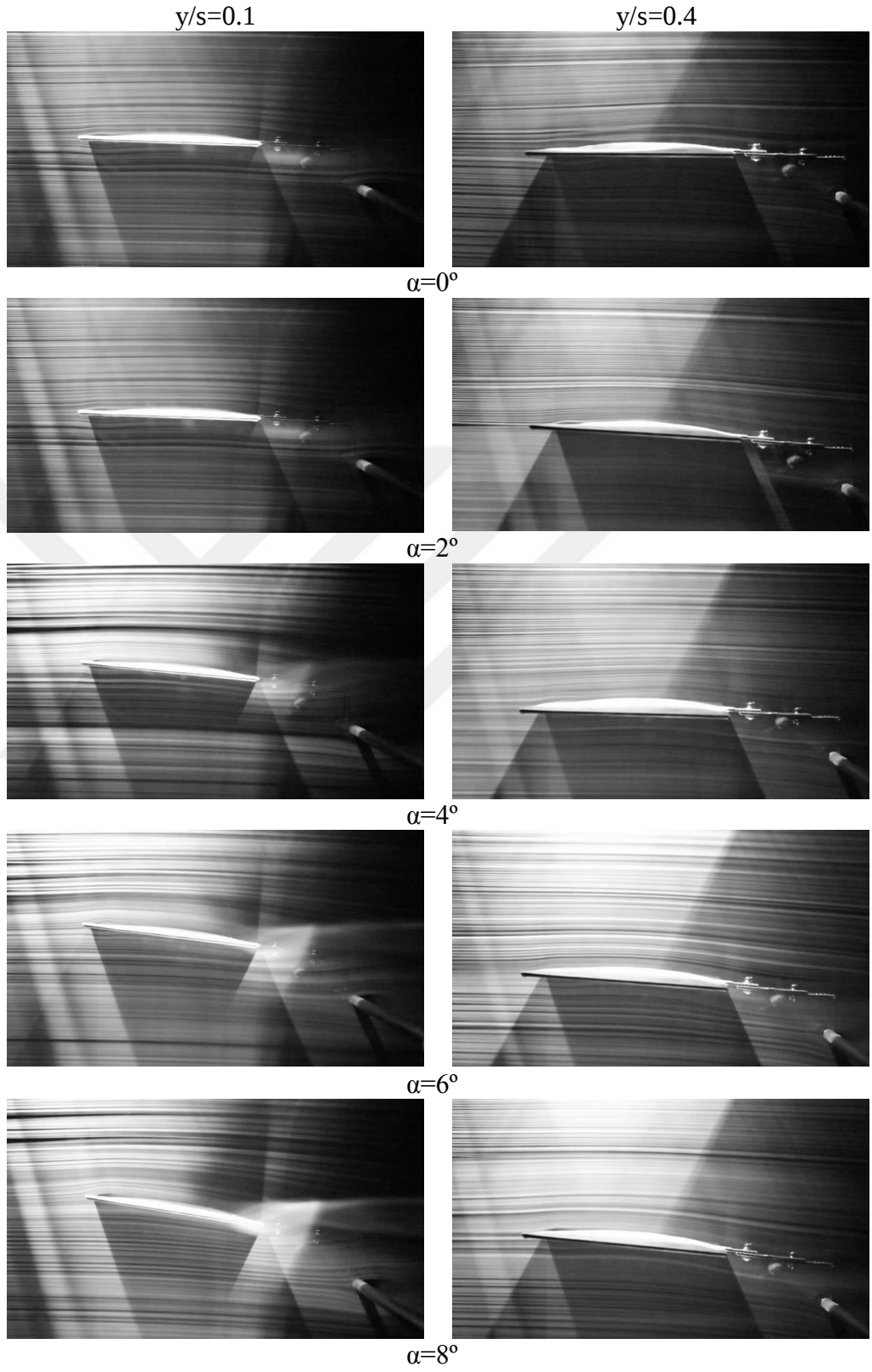
Şekil 20. Duman teli ile akış görselleştirme ($AR=1$, $Re=5.0 \times 10^4$)



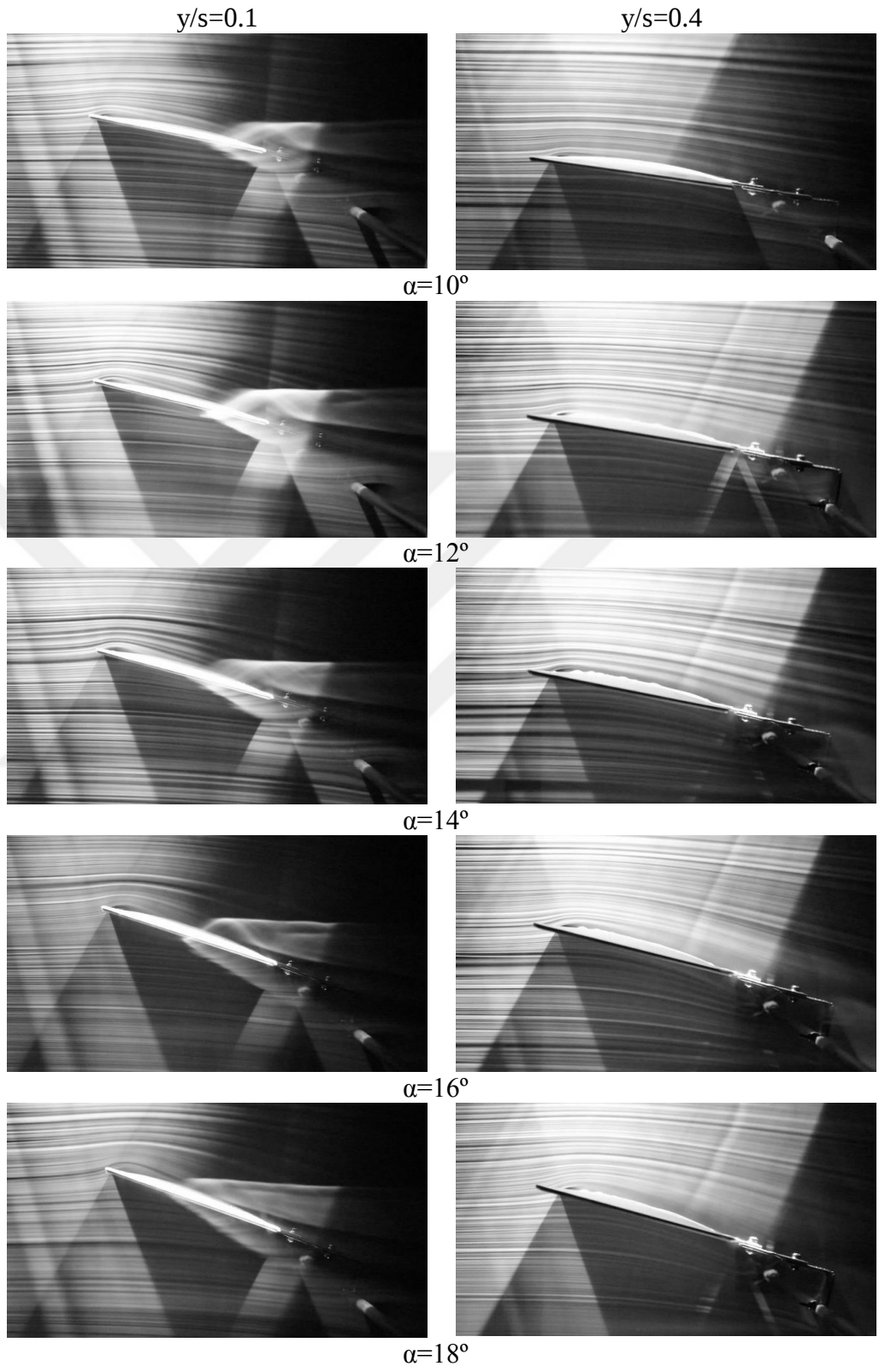
Şekil 20. Devamı



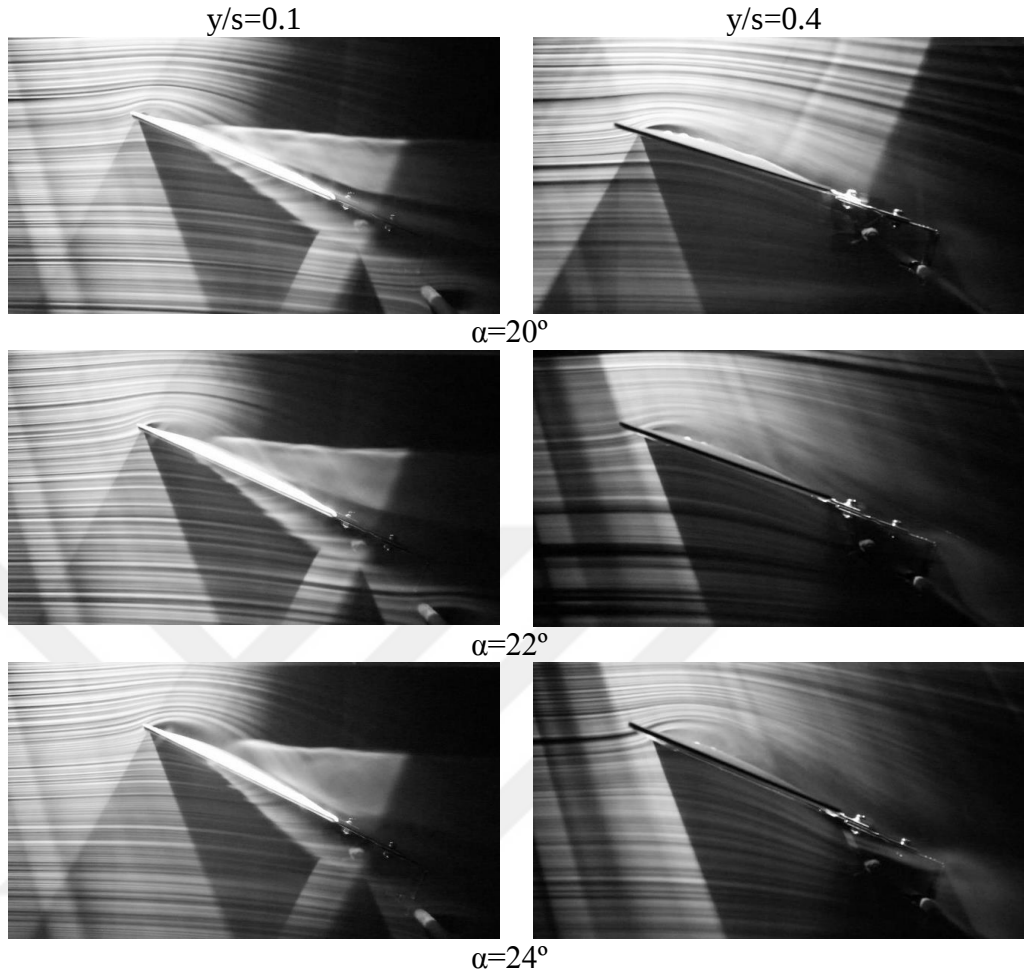
Şekil 20. Devamı



Şekil 21. Duman teli ile akış görselleştirme ($AR=1$, $Re=7.5 \times 10^4$)



Şekil 21. Devamı

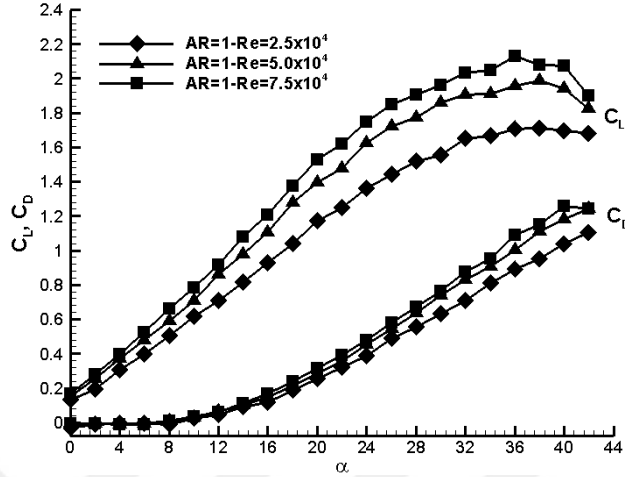


Şekil 21. Devamı

2.5.2. AR=1 Esnek Kanat İçin Kuvvet Deneyi Sonuçları

Şekil 22’de AR=1 esnek membran kanadın aerodinamik kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişiminin üç farklı Re sayısı ($Re=2.5 \times 10^4$, $Re=5.0 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$) için sonucu verilmiştir. Aşağıda verilen grafikte görüldüğü gibi tutunma kaybı (stol) açıları sırasıyla $Re=2.5 \times 10^4$, $Re=5.0 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ için $\alpha=36^\circ$, $\alpha=38^\circ$ ve $\alpha=40^\circ$ ’dir. Maksimum taşıma kuvveti katsayısı (C_{Lmax}) değeri $Re=2.5 \times 10^4$ için yaklaşık 1.7 iken $Re=5.0 \times 10^4$ ’de 1.9 ve $Re=7.5 \times 10^4$ ’de ise yaklaşık olarak 2.1’e denk gelmektedir. Re sayısı arttıkça hem tutunma kaybı (stol) açısı hem de C_{Lmax} değeri artmaktadır. Öte yandan, sürüklenme katsayısı (C_D) değişimi incelendiğinde hücum açısının artışı ile C_D değerinde artış görülmüştür. Kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi grafiği incelendiğinde, bazı hücum açısı değerlerinde kırılmaların olması, lineerliğin olmayışı

LSB kaynaklı kararsız akış durumundan kaynaklanmaktadır. Bu durum ilerleyen bölümde LSB'nin zamana bağlı değişiminden anlaşılabilir.

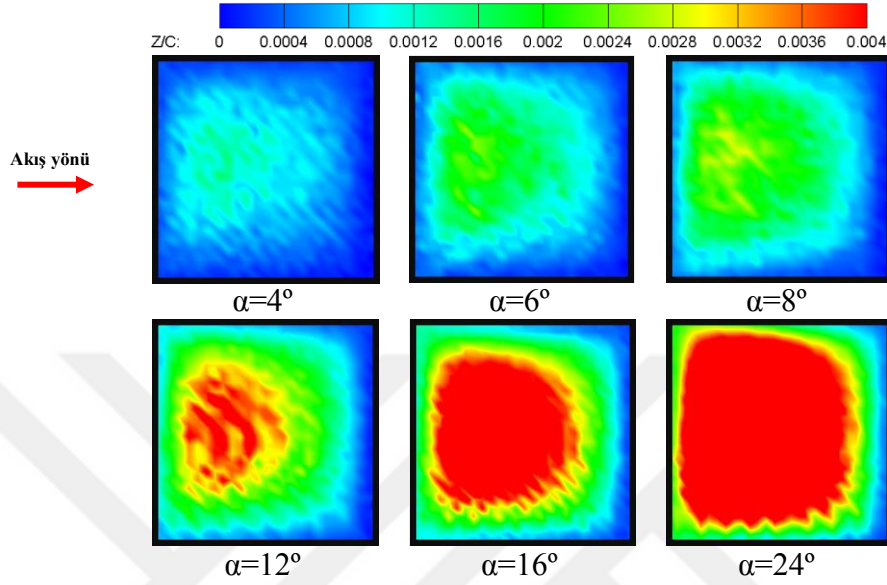


Şekil 22. Esnek kanat için farklı Re sayılarında aerodinamik kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi

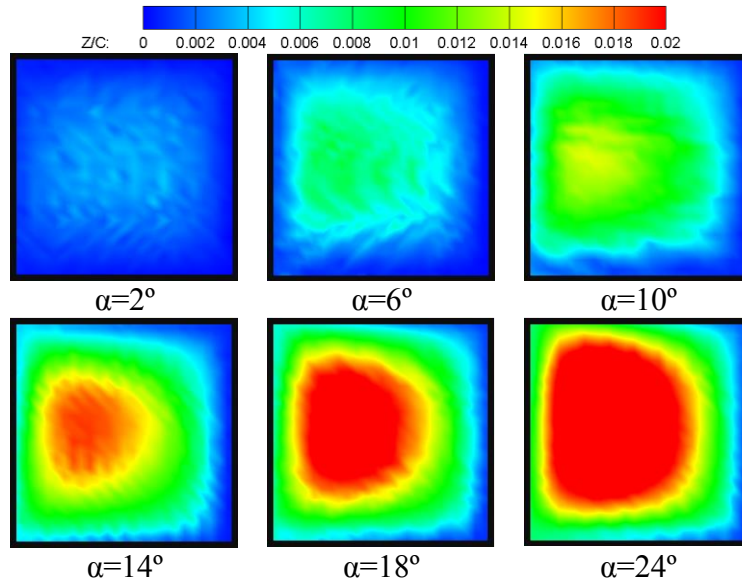
2.5.3. AR=1 Esnek Kanat İçin Deformasyon Ölçüm Deneyi Sonuçları

DIC sistemi ile AR=1 esnek kanat üzerinde oluşan kararsız (unsteady) akışın etkisi ile esnek membran kanat üzerinde oluşan deformasyon ölçüm sonuçları Şekil 23-25 arasında verilmiştir. Ayrıca AR=1 esnek kanat üzerinde $Re=5.0 \times 10^4$ ve $\alpha=24^\circ$ de oluşan deformasyonun 3 boyutlu örnek gösterimi Şekil 26'da verilmiştir. Hücum açısının artması ile esnek membran kanat üzerinde oluşan deformasyonun arttığı kırmızı renkli bölgenin genişlemesinden kolayca anlaşılmaktadır. AR=1 esnek kanatta meydana gelen uç girdapların etkisinden dolayı esnek kanat yanlarında meydana gelen deformasyonun daha az olduğu görülmektedir. Esnek kanat titreşimleri hakkında bilgi edinmek için esnek kanat üzerinde meydana gelen deformasyonların standart sapma sonuçları (Şekil 27-29) incelendiğinde; $Re=2.5 \times 10^4$ ve $Re=5.0 \times 10^4$ için tek modlu titreşimin hâkim olduğu görülmektedir. Öte yandan, $Re=7.5 \times 10^4$ de standart sapma değerlerine bakıldığında $\alpha=0^\circ$ iken kanadın kordu boyunca 3 modlu (standart sapmanın yüksek olduğu bölge sayısı=3) titreşimin olduğu göze çarpmaktadır. Ayrıca, $\alpha=2^\circ$ iken kanadın kordu boyunca meydana gelen titreşim modu sayısının 4'e çıktığı ve $\alpha=4^\circ$ de tekrar 3'e düştüğü görülmüştür. Hücum açısı $\alpha=6^\circ-12^\circ$ arasında 4 modlu titreşim gözlemlenirken hücum sayısının daha da artırılması ile kanat üzerinde tek modlu titreşimin baskın olduğu görülmektedir. Bu modların oluşma nedeni ayrılma

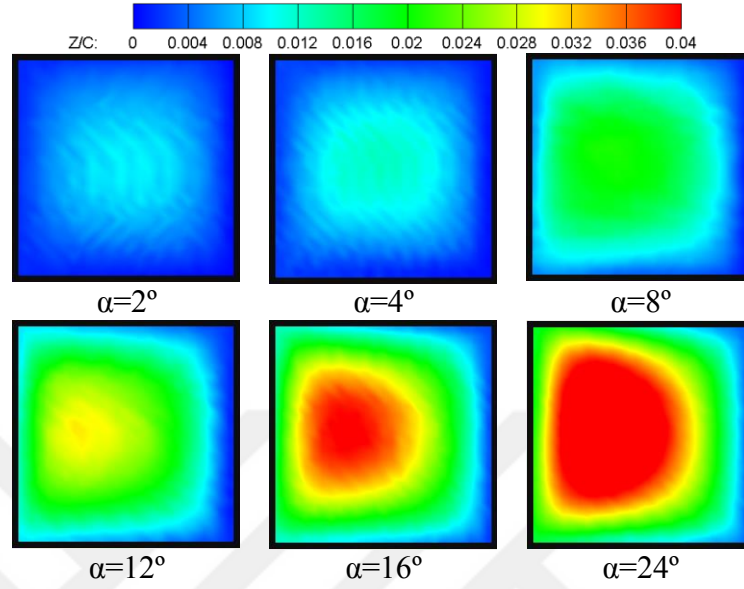
kabarcıdır. Ayrılma kabarcığından dolayı kopan girdaplar kanat üzerinde farklı modlarda titreşimlerin oluşmasına neden olur.



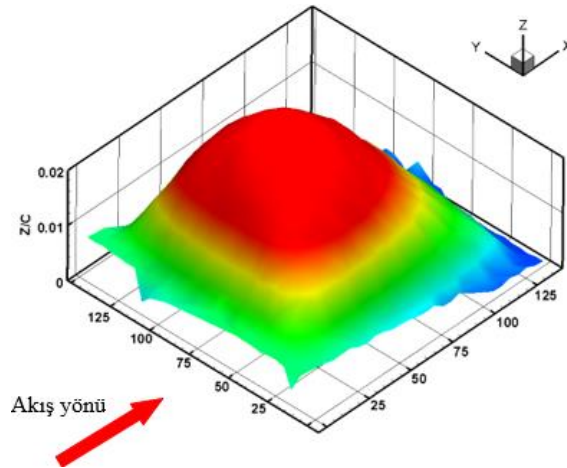
Şekil 23. AR=1 esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ de oluşan deformasyon sonuçları



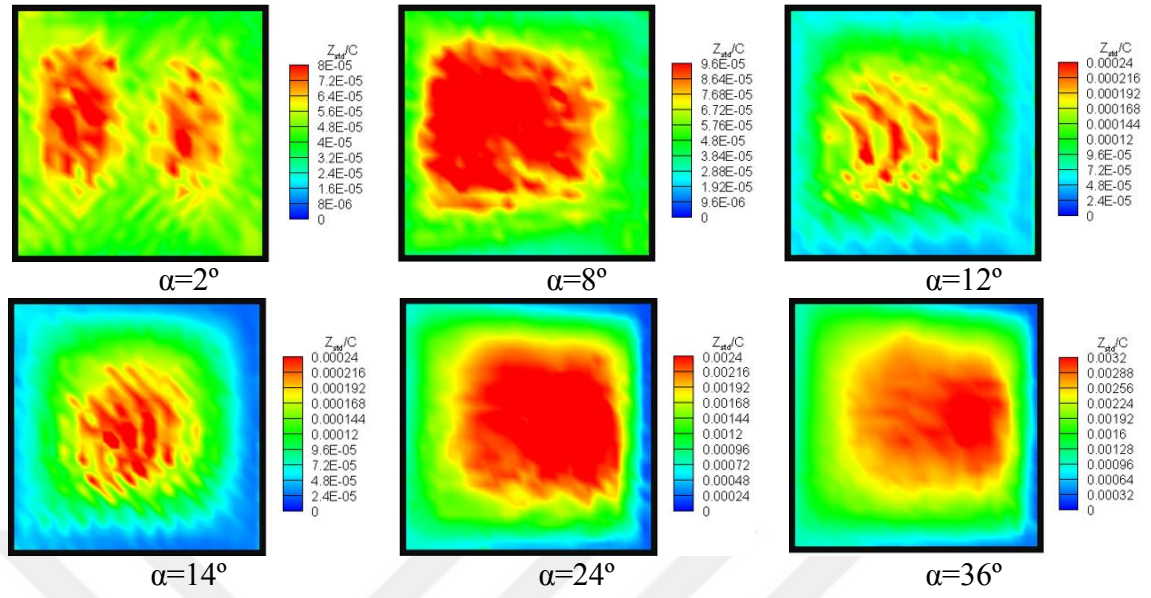
Şekil 24. AR=1 esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=5.0 \times 10^4$ de oluşan deformasyon sonuçları



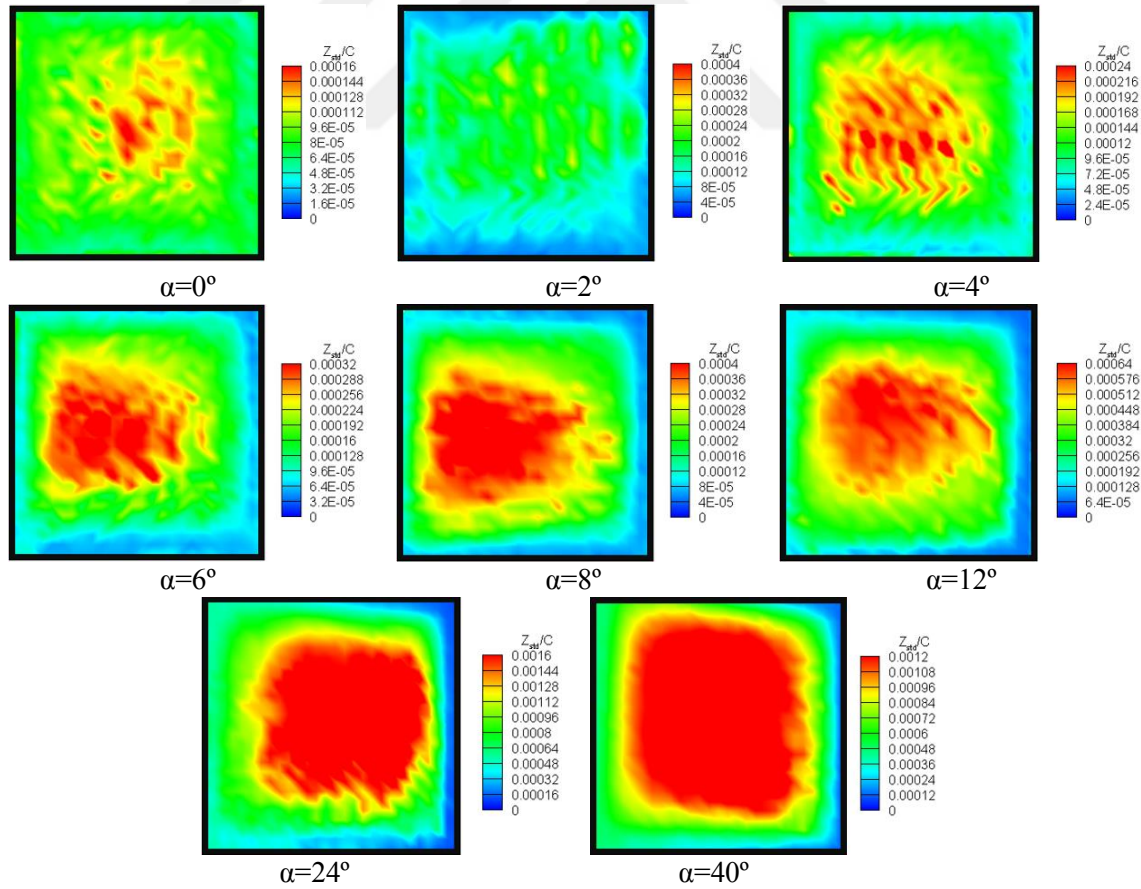
Şekil 25. AR=1 esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=7.5 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon sonuçları



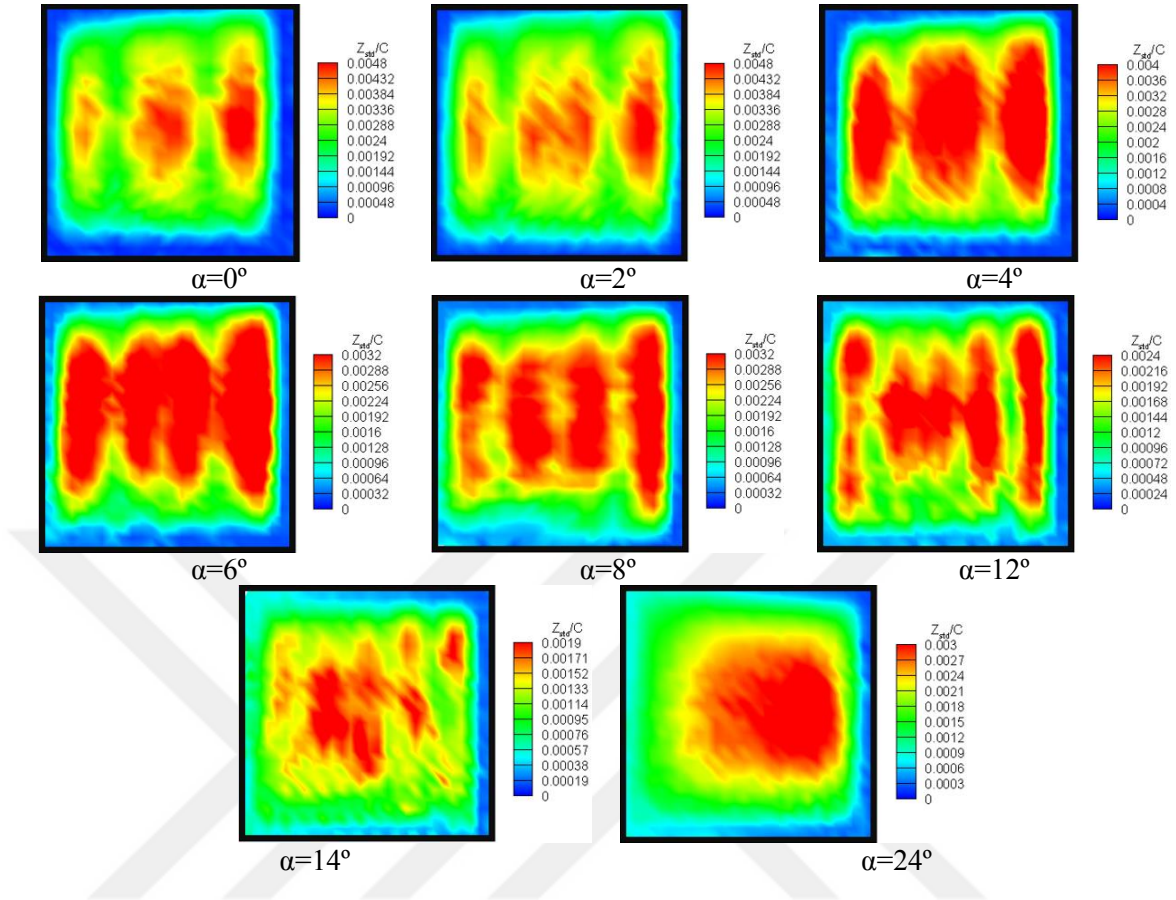
Şekil 26. AR=1 esnek membran kanatta $Re=5.0 \times 10^4$ 'de ve $\alpha=24^\circ$ 'de oluşan deformasyonun 3 boyutlu örnek gösterimi



Şekil 27. Farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ için AR=1 esnek kanadın deformasyonunun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları



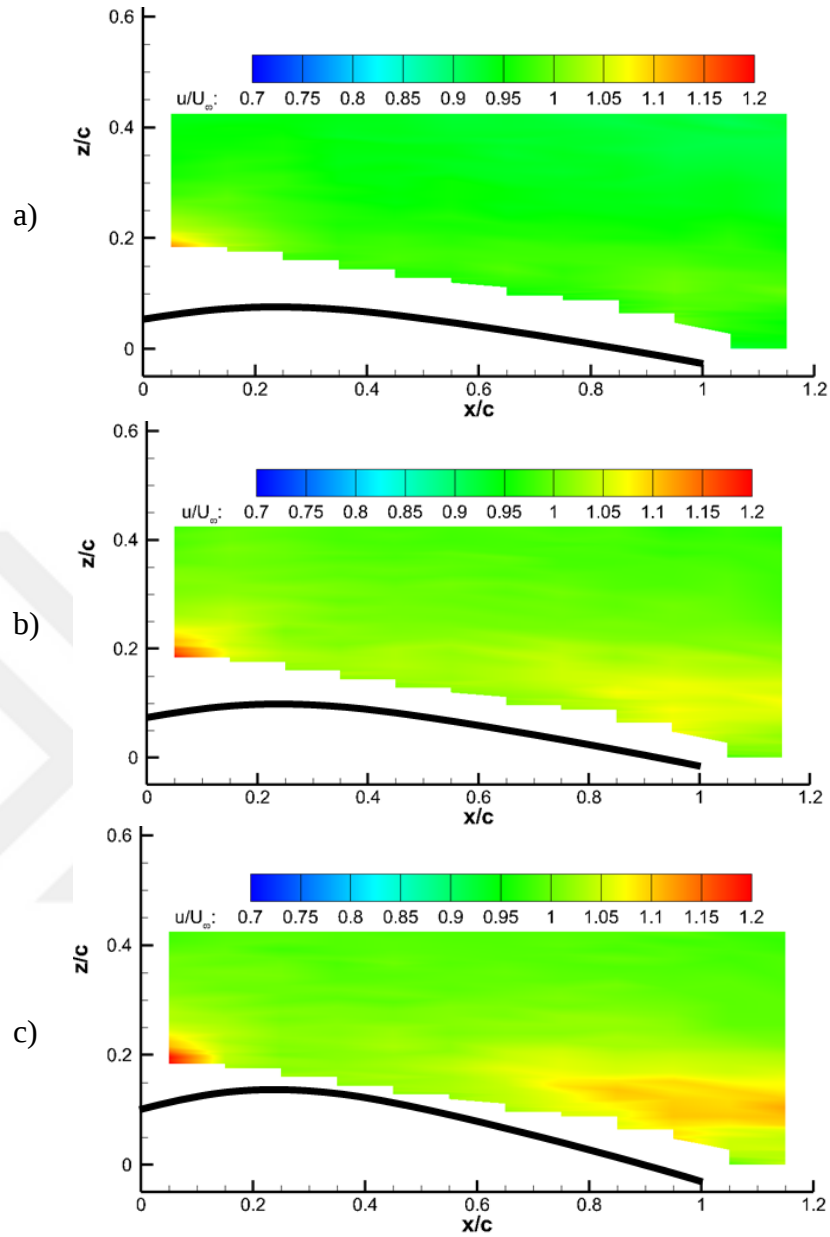
Şekil 28. Farklı hücum açılarında ve $Re=5.0 \times 10^4$ için AR=1 esnek kanadın deformasyonunun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları



Şekil 29. Farklı hücum açılarında ve $Re=7.5 \times 10^4$ için $AR=1$ esnek kanadın deformasyonunun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları

2.5.4. $AR=1$ Esnek Kanat İçin Hız Dağılımı Ölçüm Deneyi Sonuçları

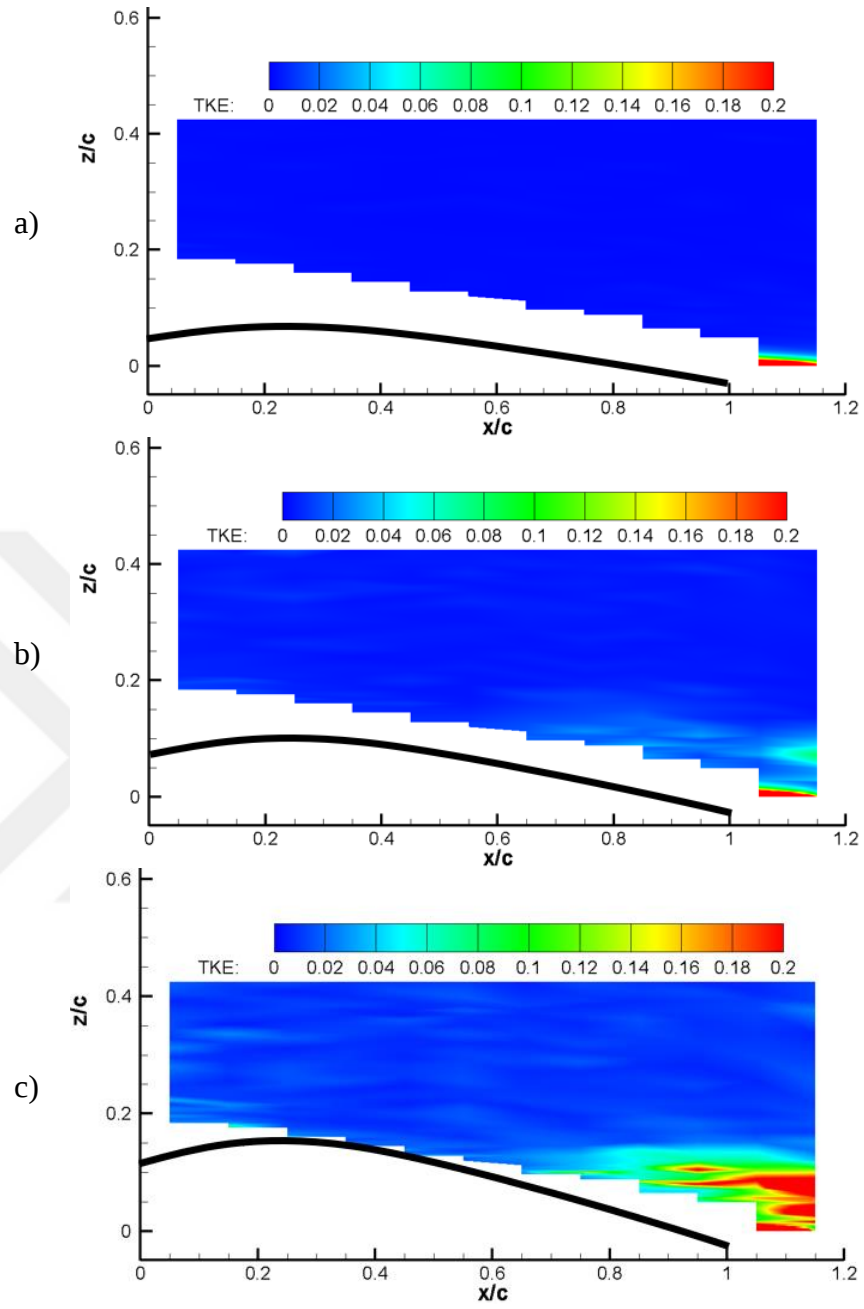
Şekil 30-31'de, $AR=1$ esnek membran kanat için üç farklı Re sayısında $\alpha=8^\circ$ iken $y/s=0.1$ konumunda zaman ortalamalı hız ve türbülans kinetik enerji (TKE) dağılımı sonuçları görülmektedir. Grafikler incelendiğinde esnek membran kanadın üst kısmındaki görüntünün basamak şeklinde olmasının nedeni kanat üstünde ölçümün farklı noktalarda yapılıp daha sonra hız dağılımlarına çevrilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu grafiklerde kanat uç kenarındaki hız alanında uç girdaplarının etkisi özellikle Re sayısı artışı ile belirgin hale gelmektedir. Bu belirginlik TKE dağılımlarında da hızdaki çalkantı artışları ile kendini göstermektedir. Tu ve Re gerilme değerleri daha sonraki bölümde dumanlarla birleştirilerek verilecek ve anlatılacaktır.



Şekil 30. AR=1 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.1$ konumunda hız dağılımı

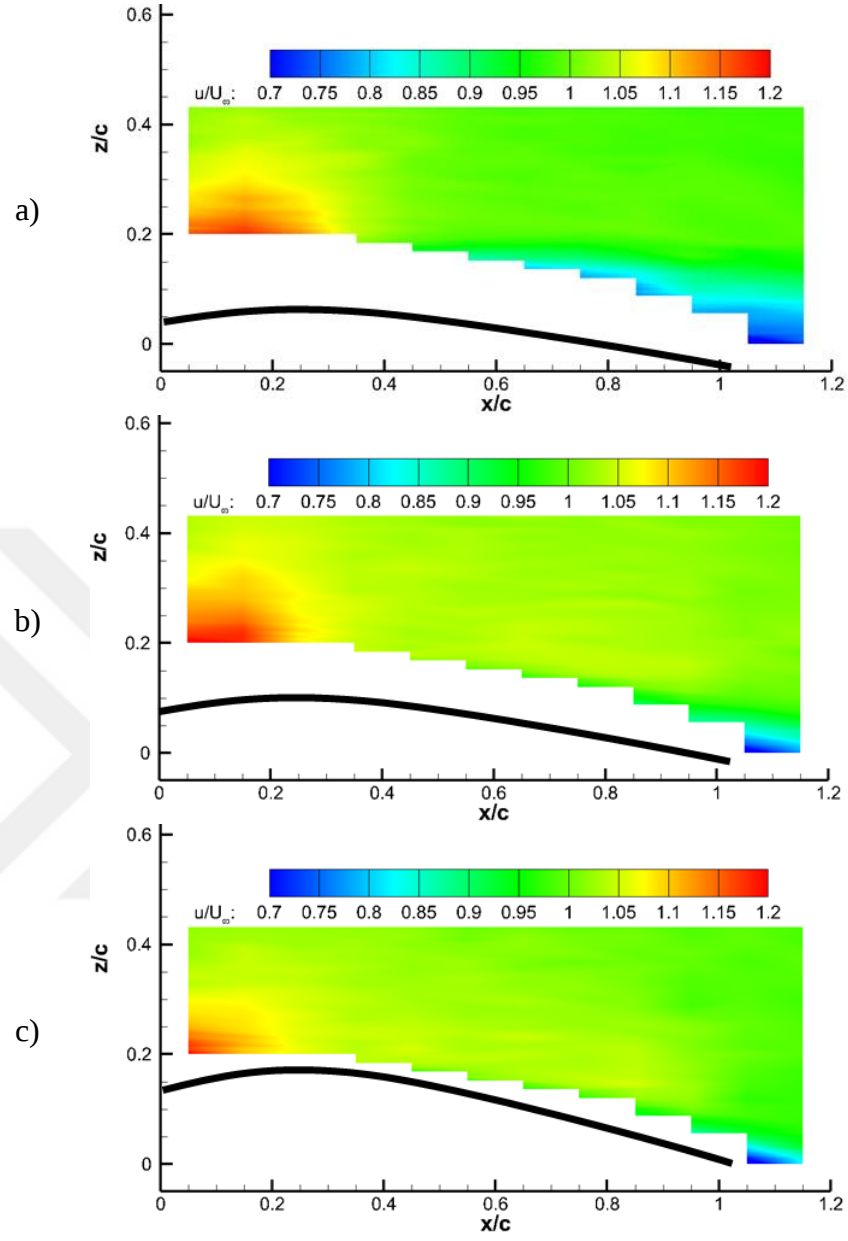
a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$ c) $Re=7.5 \times 10^4$

Şekil 32'de, AR=1 esnek membran kanat için üç farklı Re sayısında $\alpha=8^\circ$ iken $y/s=0.4$ konumunda zaman ortalamalı hız dağılımı sonuçları verilmiştir. Düşük Re sayılarında atalet kuvvetleri, daha büyük Re sayılarına göre az olduğundan düşük hızlı ayrılmış akış bölgeleri (mavi renkli bölge) daha geniş iken Re sayısı arttıkça ayrılmış akış bölgesi daralmaktadır. $Re=5.0 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ 'de atalet kuvvetleri düşük Re sayılarına göre fazla olduğundan oluşan hücum kenarı ayrılmaları küçüktür ve atalet kuvvetleri dolayısıyla bastırılmıştır.



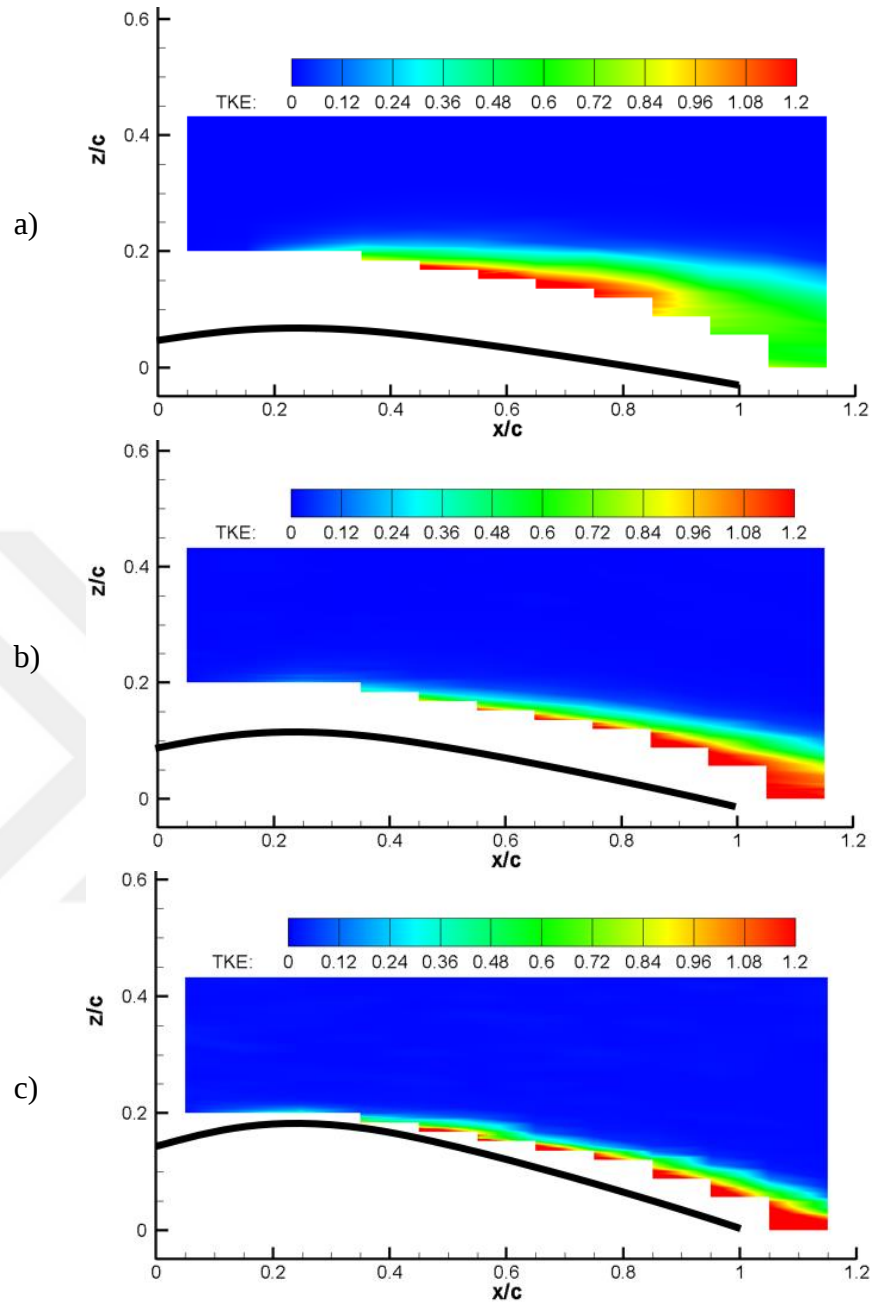
Şekil 31. AR=1 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ de $y/s=0.1$ konumunda TKE dağılımı

a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$ c) $Re=7.5 \times 10^4$



Şekil 32. AR=1 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.4$ konumunda hız dağılımı

a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$ c) $Re=7.5 \times 10^4$



Şekil 33. AR=1 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.4$ konumunda TKE dağılımı

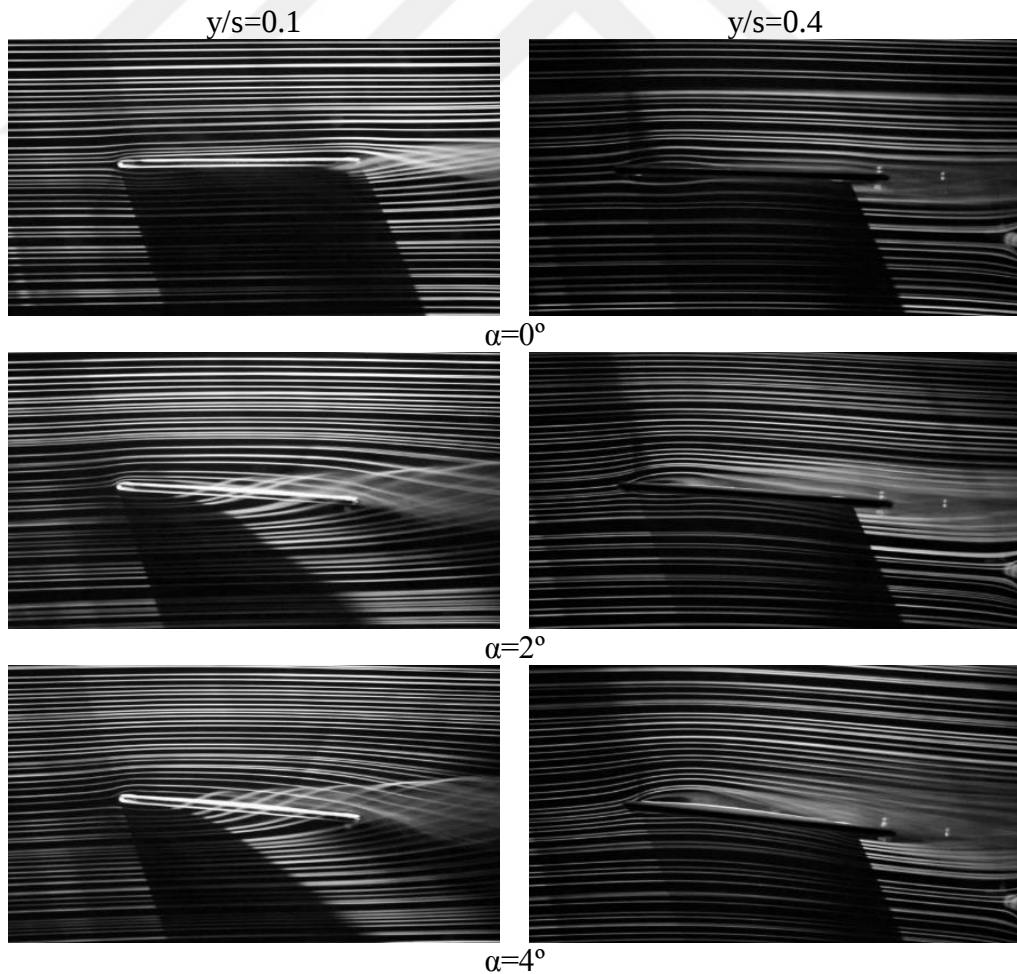
a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$ c) $Re=7.5 \times 10^4$

Şekil 33'te verilen TKE dağılımlarında hızdaki çalkantı artışı dolayısıyla kırmızı bölgede TKE değeri artmış olup bu da bu kırmızı bölgenin başlangıcı ile türbülansa geçişin meydana geldiğini göstermekte ve bu geçiş olayının gerçekleşmesi ile de ayrılmış akış kanat üzerine tutunmaktadır. Ayrıca Re sayısının artışı ile kırmızı bölgenin başlangıcı yaklaşmış yani türbülansa geçiş noktası hücum kenarına yaklaşmaktadır.

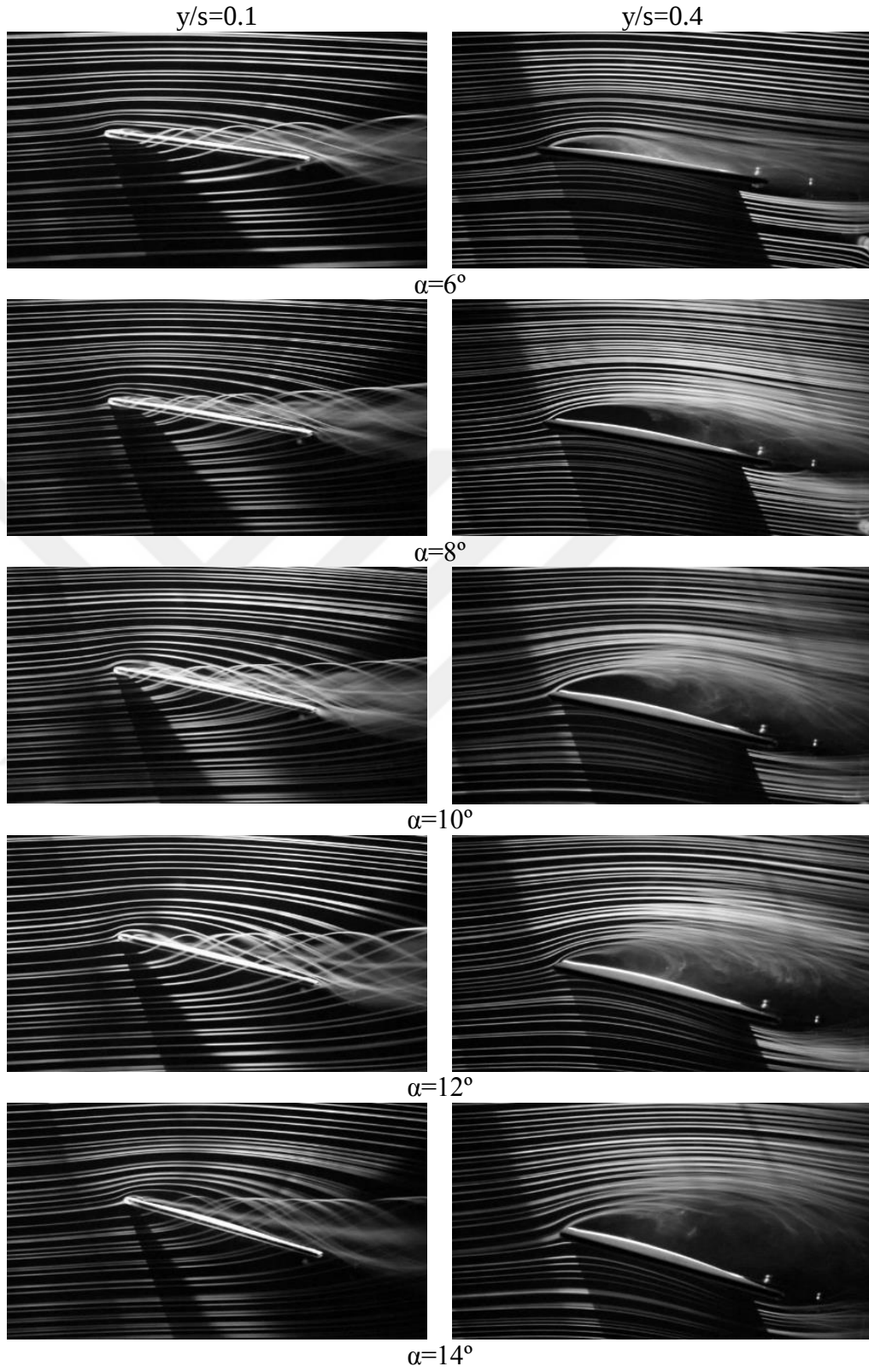
2.5.5. AR=3 Esnek Kanat İçin Duman Teli Deneyi Sonuçları

Şekil 34-36'da AR=3 esnek membran kanat için $y/s=0.1$ ve $y/s=0.4$ konumlarında farklı Re sayılarında yapılan duman teli deneyi sonuçları verilmiştir. $y/s=0.1$ konumunda elde edilen görüntüler incelendiğinde hücum açısının artması ile uç girdapları görünür hale gelirken, özellikle Re sayısının artması ile daha da belirginleşmiştir.

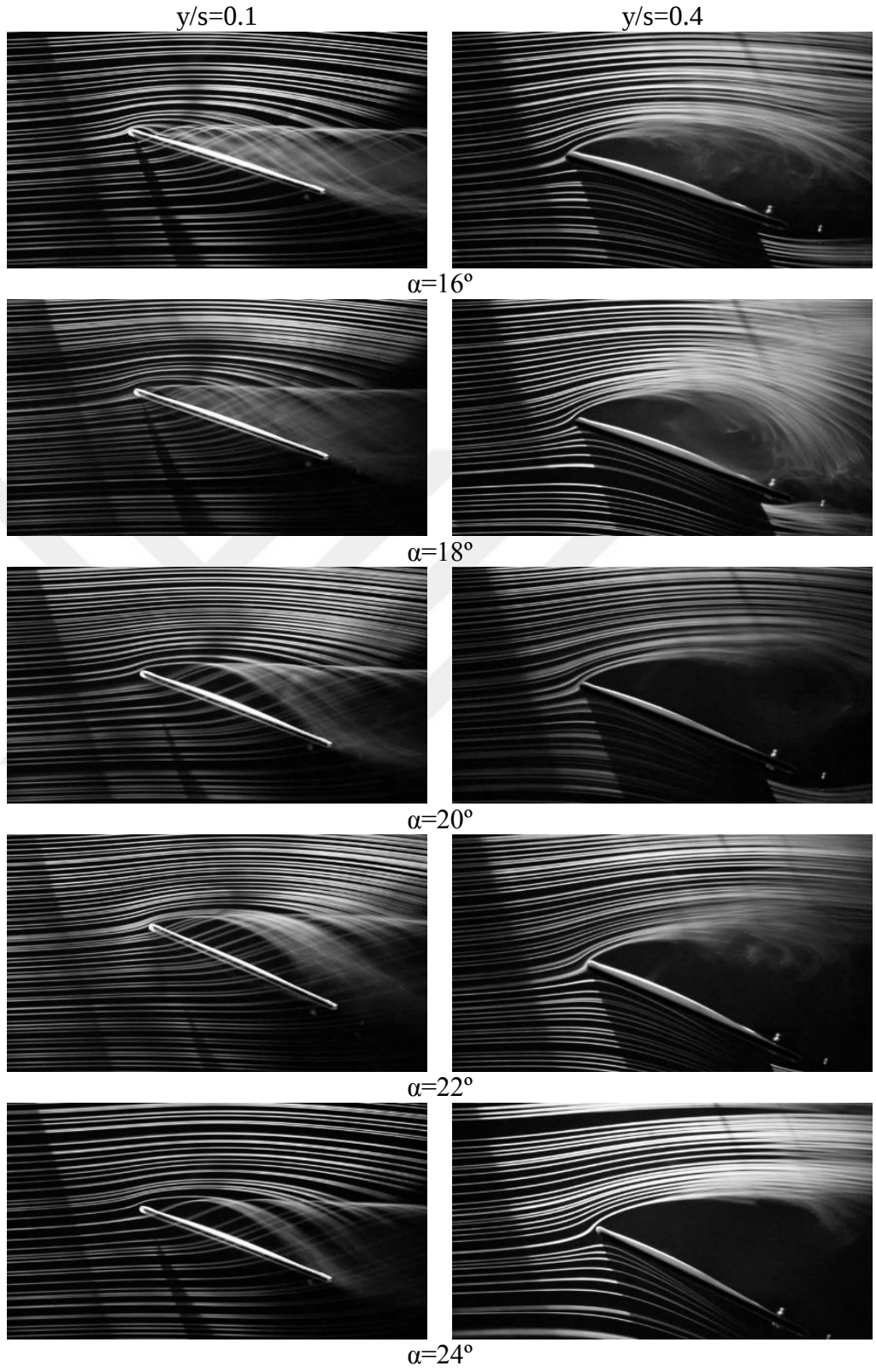
$y/s=0.4$ konumundaki sonuçlar incelendiğinde, $Re=2.5 \times 10^4$ için $\alpha=2^\circ$ 'de kısa kabarcık meydana gelirken, $\alpha=6^\circ$ 'de uzun kabarcık oluşmaktadır. Hücum açısının $\alpha=12^\circ$ 'ye yükselmesi ile kabarcık patlayarak tüm kanat yüzeyini etkilemiştir. $Re=5 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ 'de oluşan LSB'nin $Re=2.5 \times 10^4$ 'ye kıyasla daha küçük olduğu görülmektedir çünkü Re sayısının artması ile momentum artmıştır ve bu LSB atalet kuvvetlerin etkisinden dolayı sonra patlamıştır. $\alpha=24^\circ$ 'ten sonra akışın tamamen ayrıldığı görülmektedir.



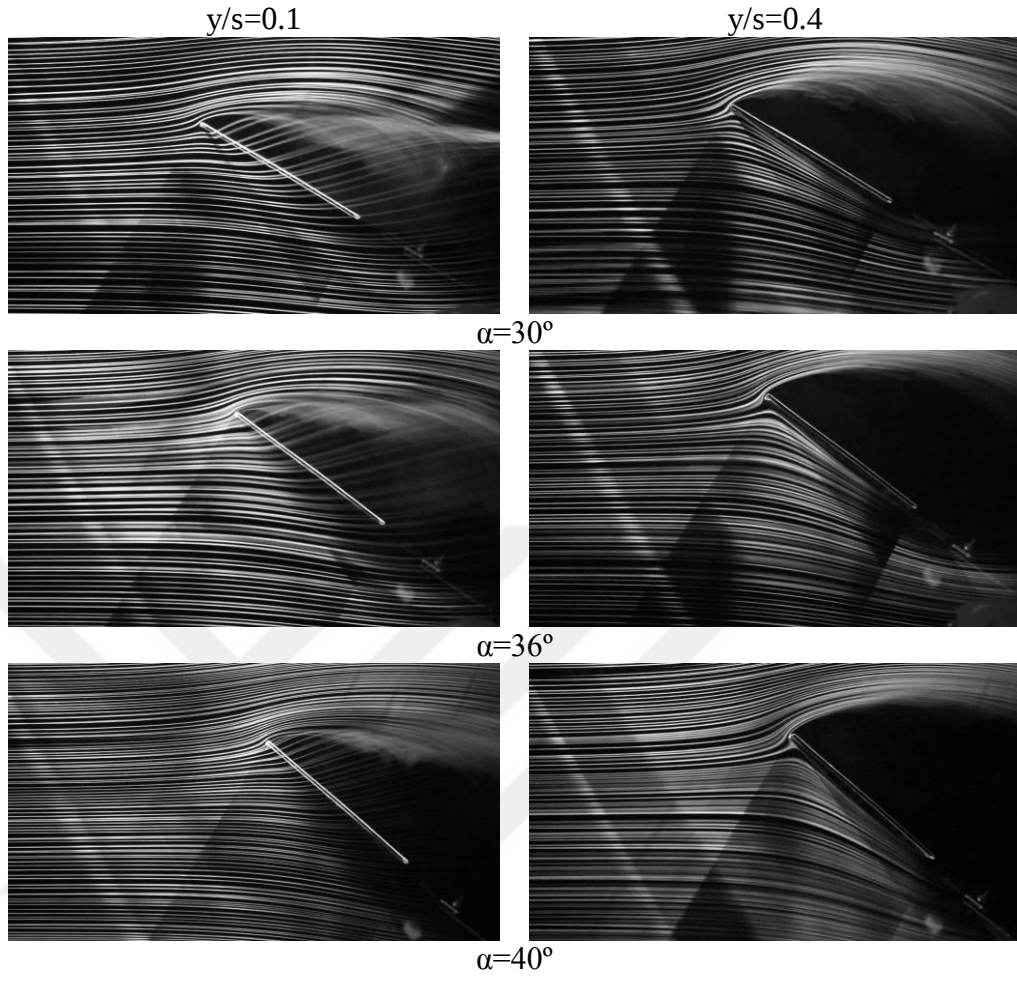
Şekil 34. Duman teli ile akış görselleştirme (AR=3, $Re=2.5 \times 10^4$)



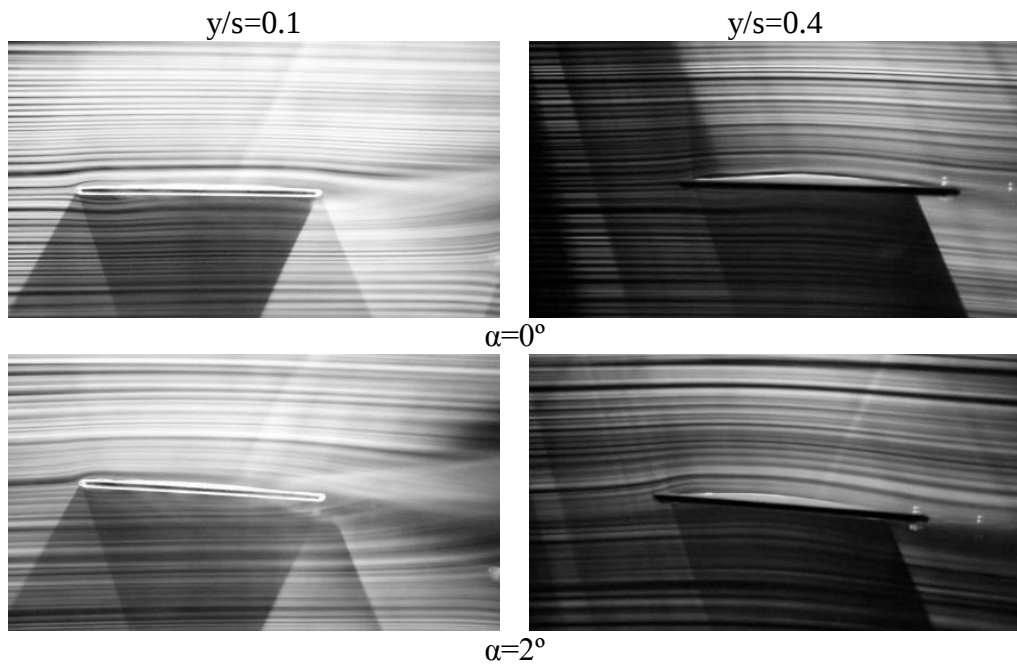
Şekil 34. Devamı



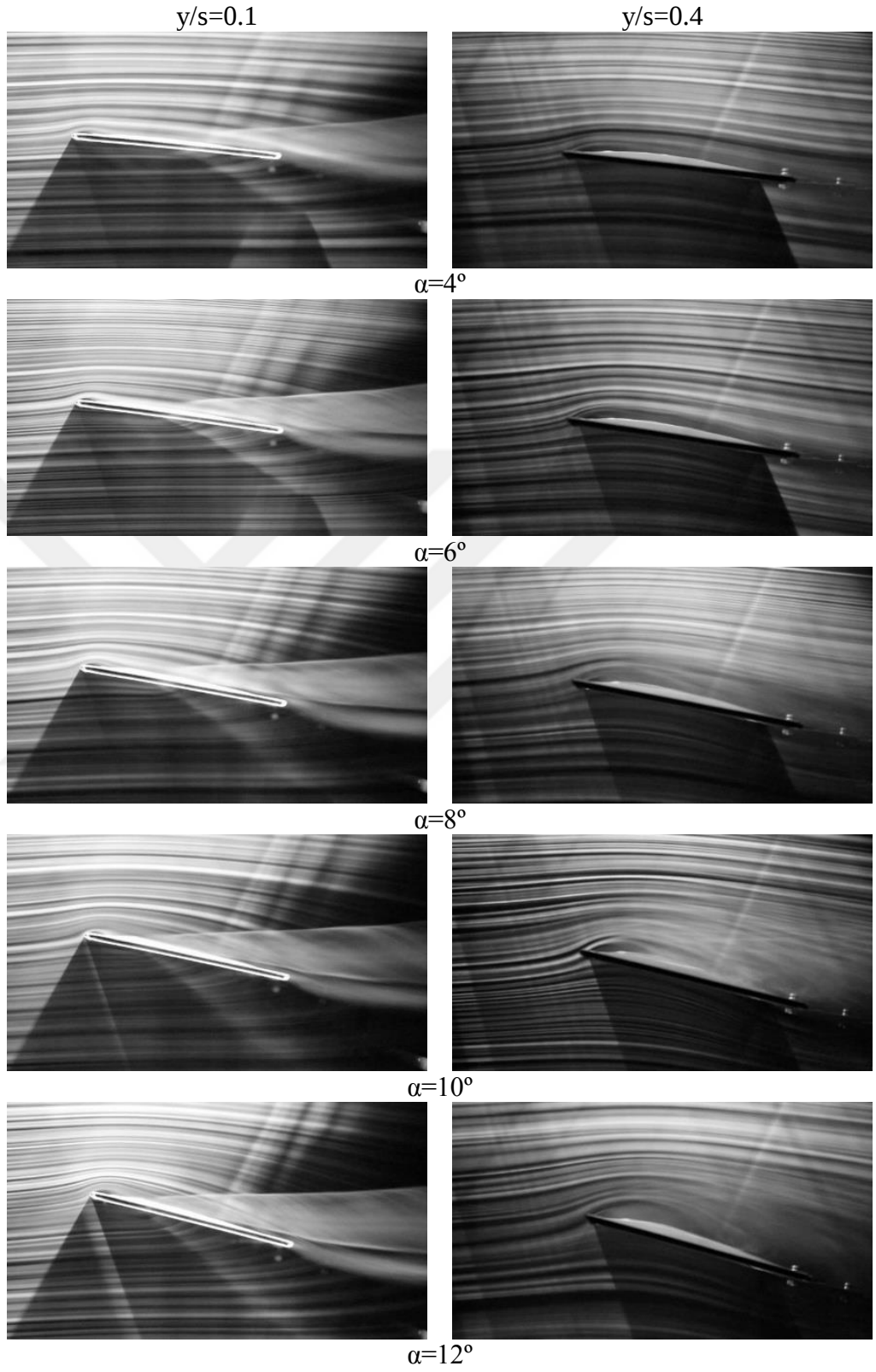
Şekil 34. Devamı



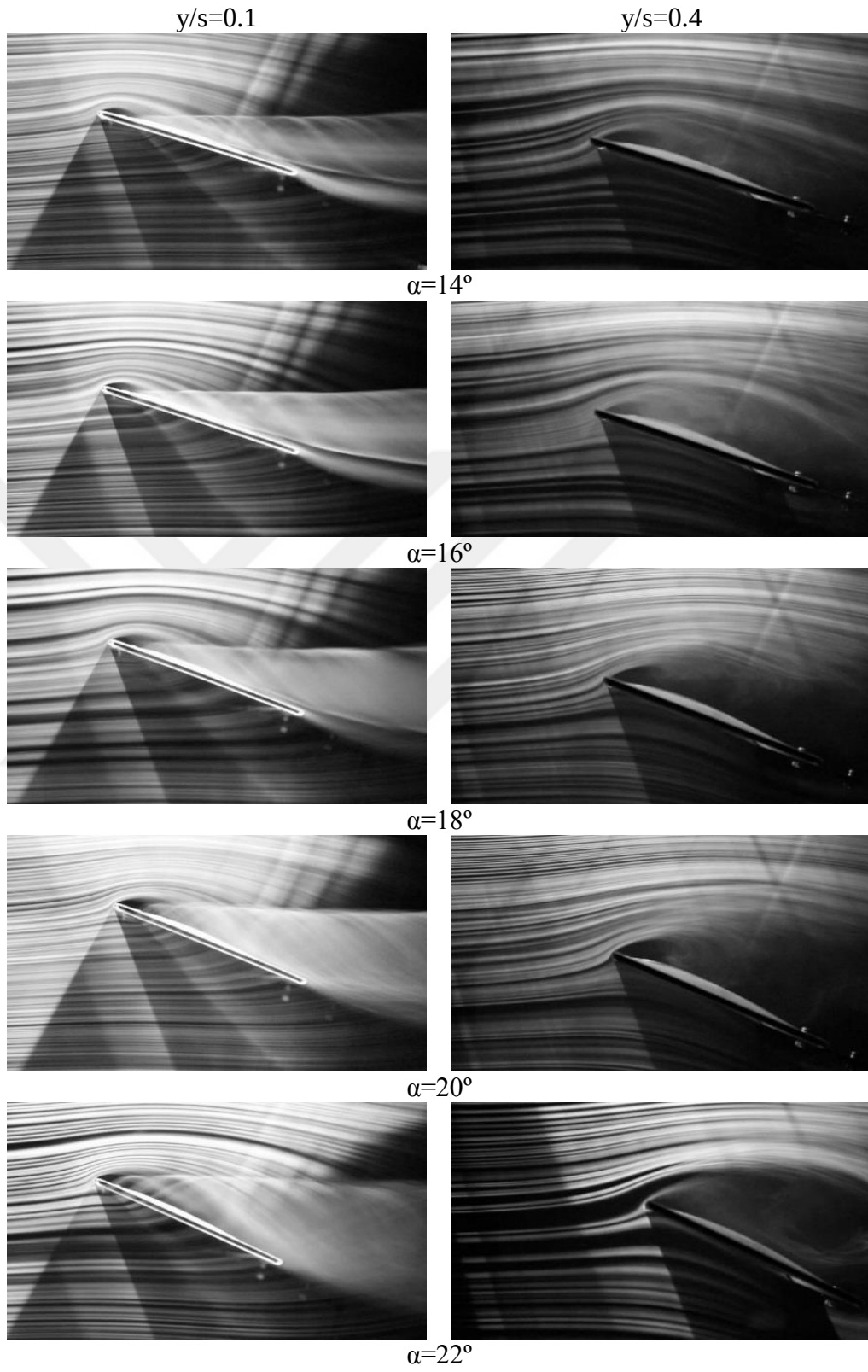
Şekil 34. Devamı



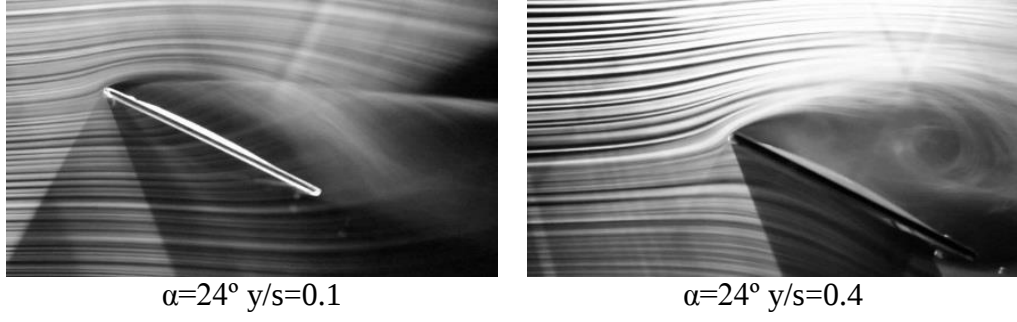
Şekil 35. Duman teli ile akış görselleştirme ($AR=3$, $Re=5.0 \times 10^4$)



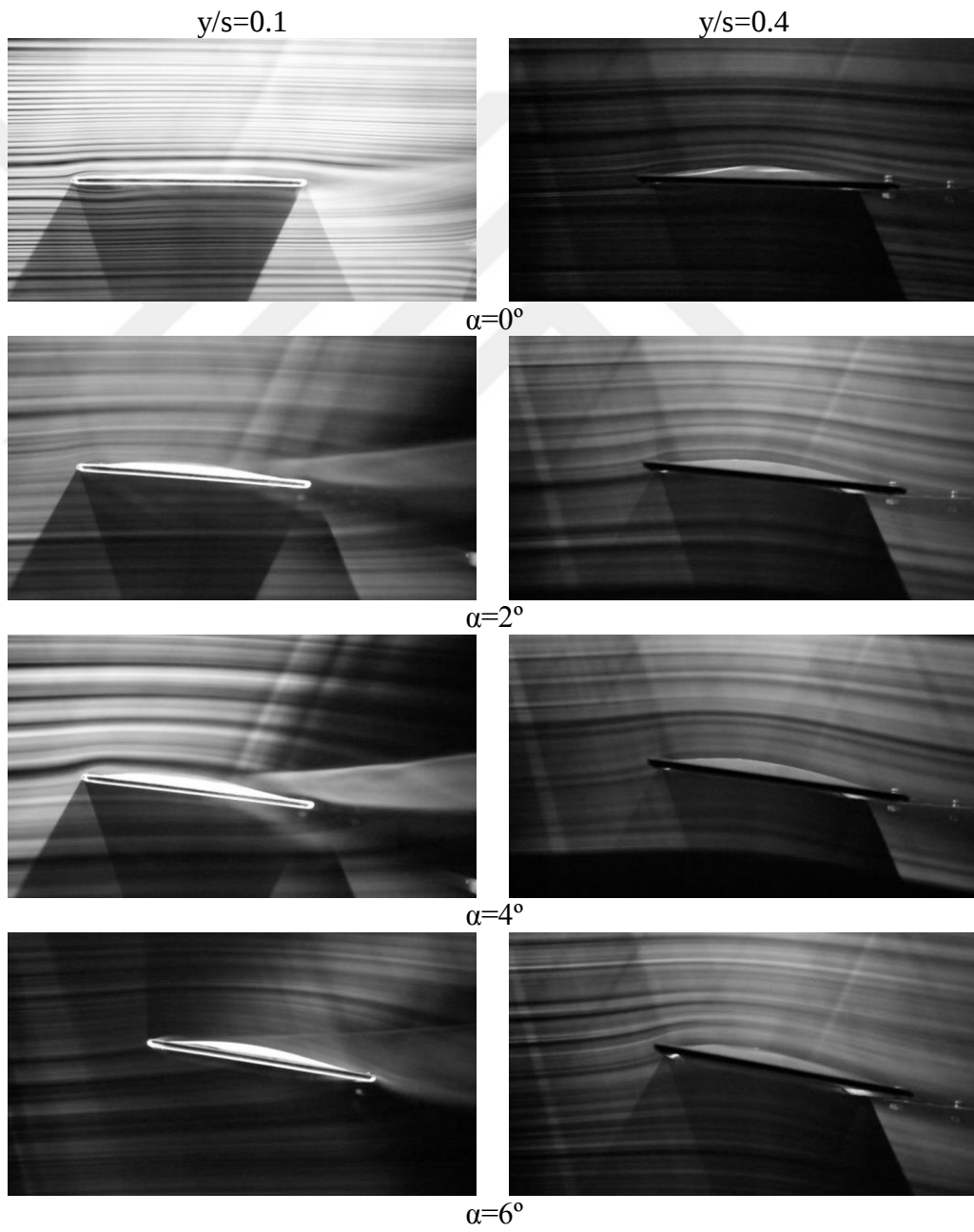
Şekil 35. Devamı

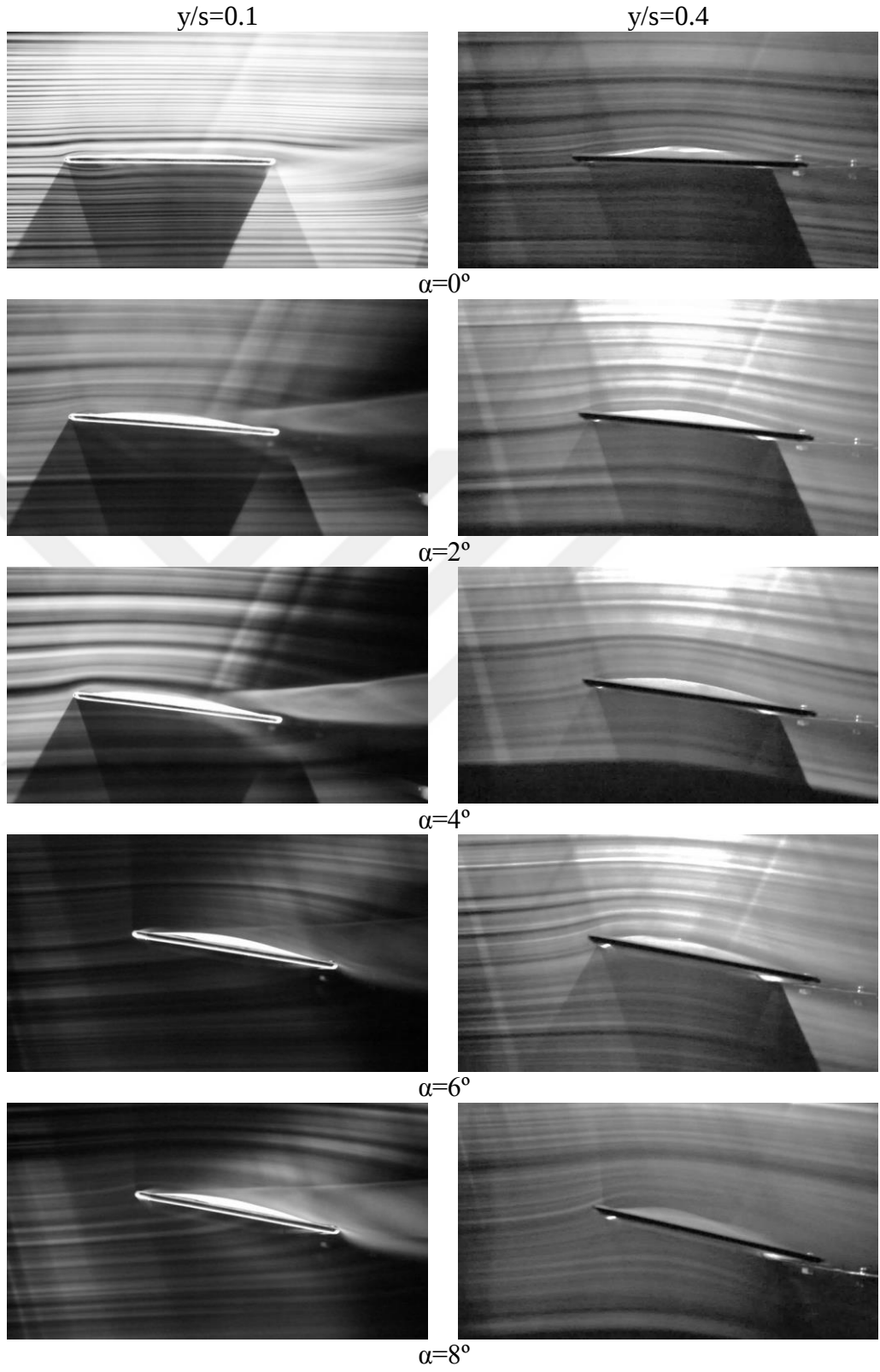


Şekil 35. Devamı

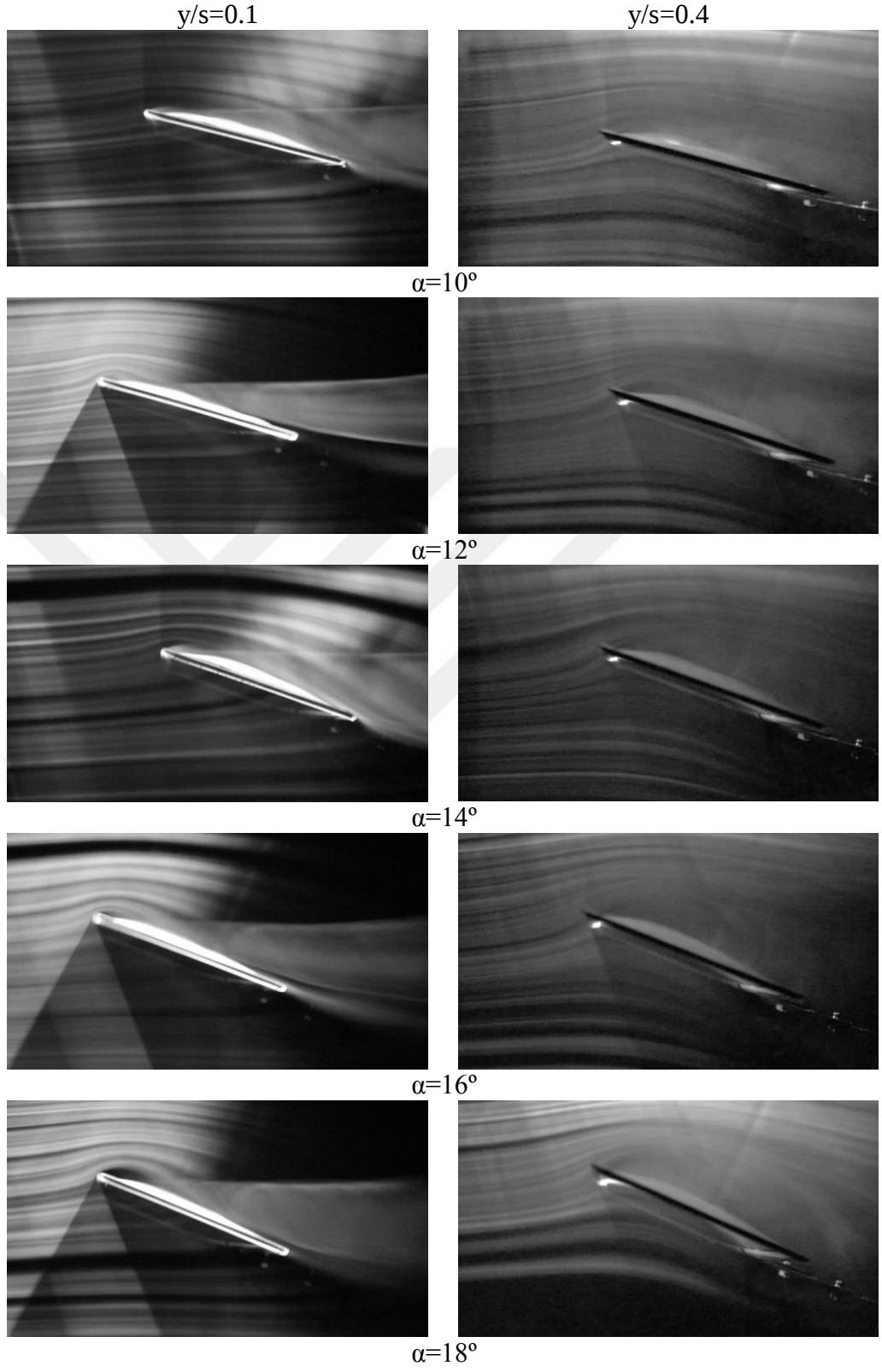


Şekil 35. Devamı

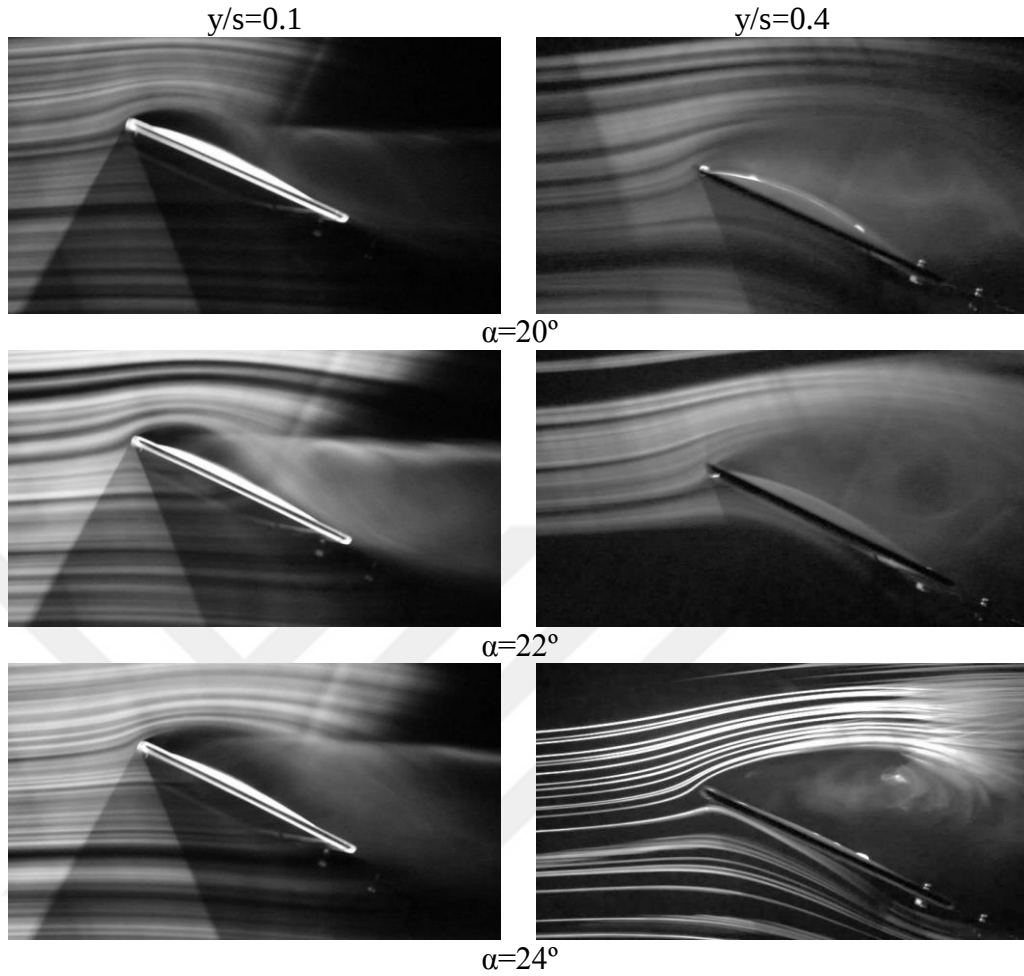
Şekil 36. Duman teli ile akış görselleştirme ($AR=3$, $Re=7.5 \times 10^4$)



Şekil 36. Devamı



Şekil 36. Devamı



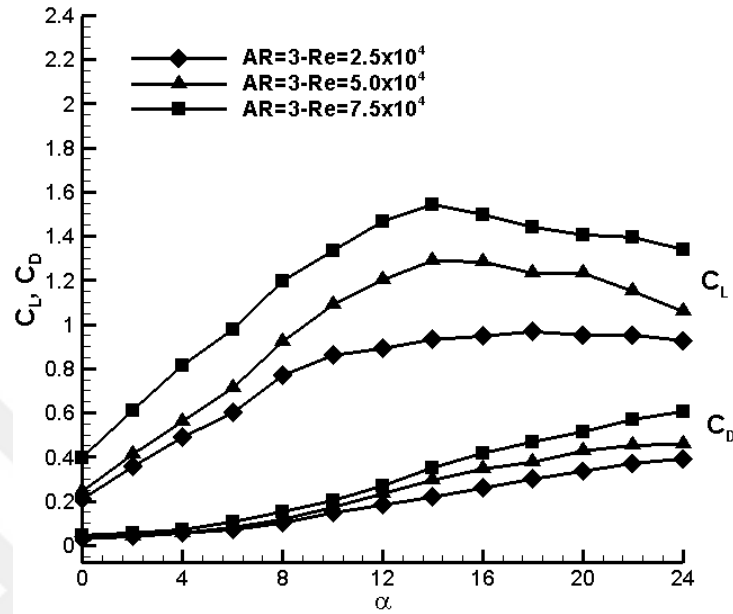
Şekil 36. Devamı

2.5.6. AR=3 Esnek Kanat İçin Kuvvet Deneyi Sonuçları

AR=3 esnek membran kanadın $Re=2.5 \times 10^4$, $Re=5.0 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ için aerodinamik kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi Şekil 37’de görülmektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, $Re=2.5 \times 10^4$, $Re=5.0 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ iken AR=3 esnek membran kanat için tutunma kaybı açıları sırasıyla 18° , 14° ve 14° iken maksimum taşıma kuvveti katsayıları ise sırasıyla 1.05, 1.29 ve 1.43’tür.

AR=1 esnek kanat ile kıyasladığımızda tutunma kaybı açıları ve maksimum taşıma kuvvet katsayıları azalmıştır. Bu azalmaların sebebi, kanat en/boy oranı artınca uç girdabı etkileri azalmakta ve kanat üzerindeki akışta hücum kenarı ayrılımları ve LSB daha baskın hale gelmektedir. Hücum kenarı ayrılımlarının büyümesi ve daha baskın

olması ile kanat daha erken tutunma kaybına maruz kalmakta ve dolayısıyla taşıma kuvveti düşüp sürükleme kuvveti azalmaktadır.

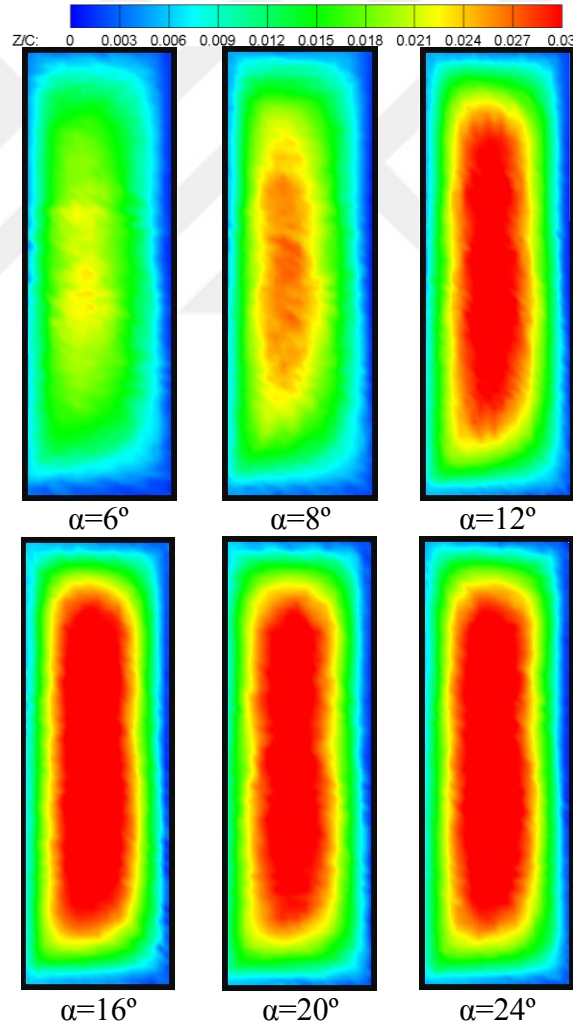


Şekil 37. Esnek kanat için farklı Re sayılarında aerodinamik kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi

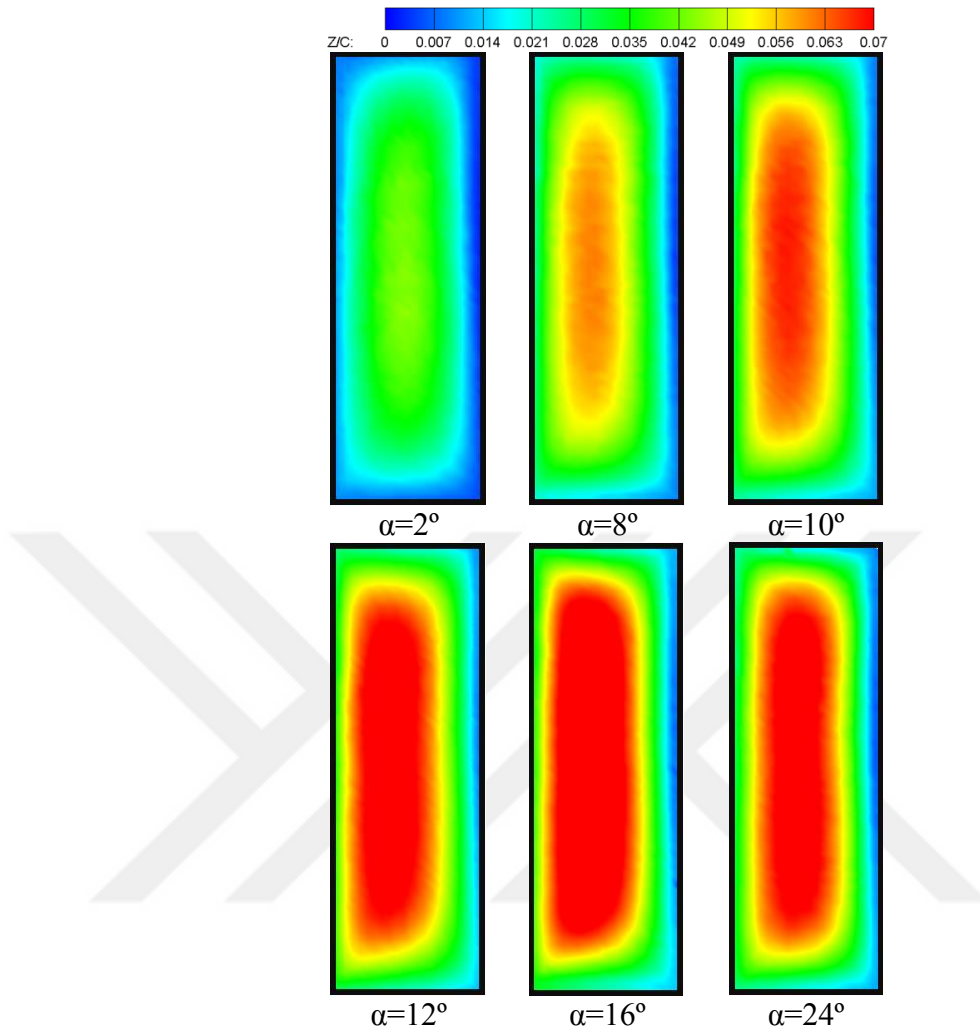
2.5.7. AR=3 Esnek Kanat İçin Deformasyon Ölçüm Deneyi Sonuçları

AR=3 esnek kanat için değişen Re sayılarında ($Re=2.5 \times 10^4$, 5.0×10^4 ve 7.5×10^4) elde edilen deformasyon sonuçları Şekil 38-40 arasında verilmiştir. DIC sonuçları incelendiğinde hücum sayısının artmasına rağmen kanat üzerinde kanat açıklığı boyunca meydana gelen maksimum deformasyon bölgesinin geometrik olarak benzer olduğu görülmektedir. Hücum açısı ve Re sayısı arttıkça esnek kanatta yer değiştirme artmakta fakat bazı açılarda kanat üzeri akış ayrılmaları dolayısıyla deformasyon düşmektedir. Şekil 42-44'te verilen standart sapma sonuç grafikleri incelendiğinde, $Re=2.5 \times 10^4$ sonuçlarında titreşim modları düşük hücum açılarında çok net belli olmaz iken kanat kordu boyunca genel olarak tek modlu titreşim görülmektedir. Hücum açısı $\alpha=16^\circ$ 'ye yükselirken girdapların etkisi ile iki modlu titreşimler oluşmakta ve bu etki $\alpha=22^\circ$ 'ye kadar devam etmektedir. $\alpha=24^\circ$ olduğunda tek modlu titreşimlerin olduğu ve $\alpha=40^\circ$ 'ye kadar devam ettiği görülmektedir. Re sayısının $Re=2.5 \times 10^4$ 'den $Re=5.0 \times 10^4$ 'e çıkarılması ile oluşan titreşim modu sayısı artmıştır. Standart sapma sonuçlarında, düşük hücum açılarında ($\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=2^\circ$) maksimum standart sapmanın

kanadın uç kısımlarında daha yoğun olduğu ve hem kort boyunca hem de kanat açıklığı boyunca üç modlu titreşimler görülmektedir. $\alpha=6^\circ$ ve $\alpha=8^\circ$ 'de kanat kordu boyunca dörtlü titreşim modları oluşurken kanat açıklığı boyunca hücum kenarına yakın yerde dörtlü, firar kenarına yaklaştıkça da üçlü modlar kendini göstermektedir. $\alpha=6^\circ$ ve $\alpha=8^\circ$ 'de esnek kanadın uç kısımlarında oluşan modların sebebi uç girdaplarıdır. Hücum sayısı $\alpha=10^\circ$ iken ayrılma kabarcığının etkisi ile titreşim modlarının orta kısımdan azalarak uçlarda birleştiği ve $\alpha=12^\circ$ olduğunda bu titreşim modlarının kanat kordu boyunca iki mod haline geldiği ve $\alpha=24^\circ$ 'ye kadar iki modlu titreşimlerin devam ettiği görülmektedir. Bunun yanında $\alpha=12^\circ$ 'den sonra uç girdaplarının büyümesi ile hücum kenarındaki titreşim modu uçlarda eğik şekilde (hafif C harfi gibi) oluşmaktadır.

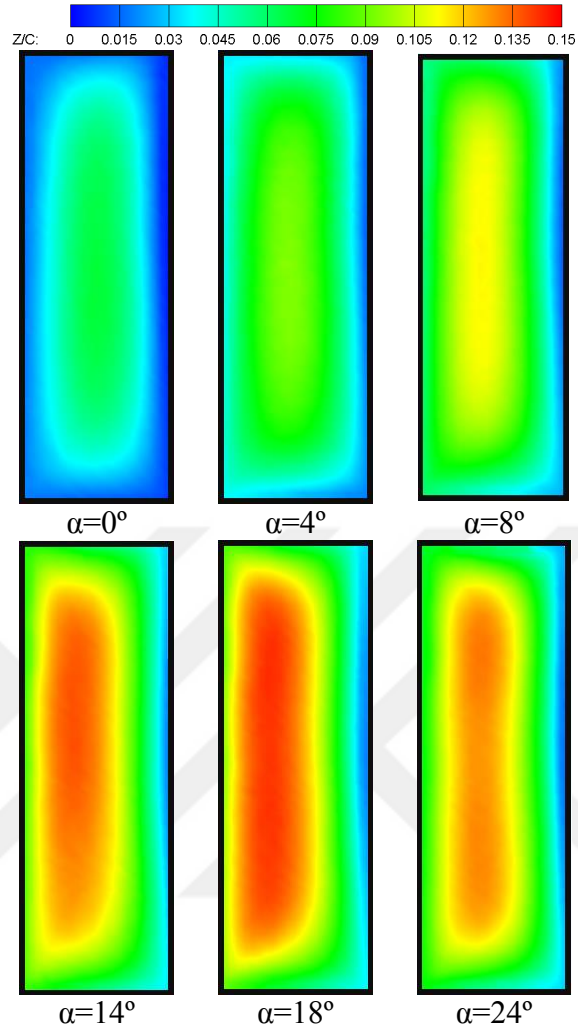


Şekil 38. Esnek AR=3 esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon

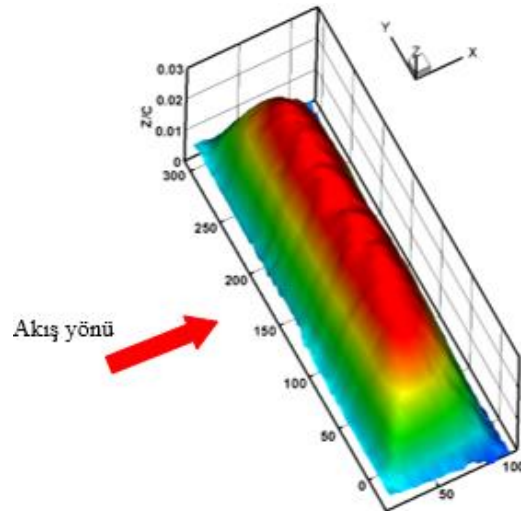


Şekil 39. Esnek AR=3 esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=5.0 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon

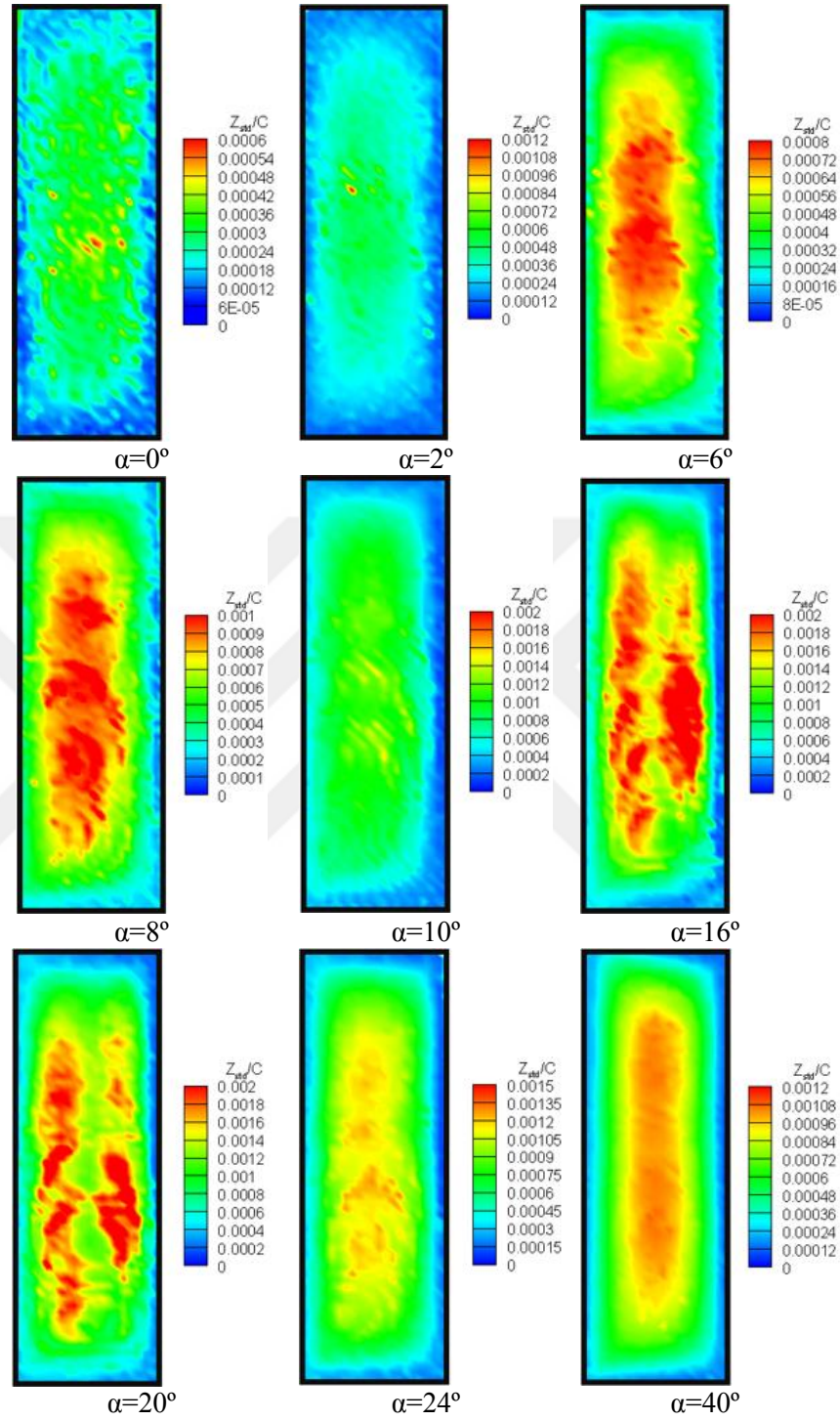
Ayrıca $\alpha=12^\circ$ ile $\alpha=24^\circ$ oluşan ikili titreşim modunun firar kenarına yakın olanın uç girdaplarının etkisi ile kanat açıklığı boyunca azaldığı görülmektedir. $\alpha=30^\circ$ ile $\alpha=40^\circ$ arasında akış ayrılmaları dolayısıyla tek modlu titreşimler gözlemlenirken, hücum sayısının artması ile maksimum standart sapma bölgesinin değerini azalmaktadır. Öte yandan, Şekil 44'te $Re=7.5 \times 10^4$ için standart sapma sonuçlarına bakıldığında, $Re=5 \times 10^4$ sonuçlarına benzer sonuçlar olduğu fakat ataletin artışı ile titreşim modlarının daha belirgin olduğu ve üçlü moddan daha fazla mod oluşmadığı gözlemlenmiştir.



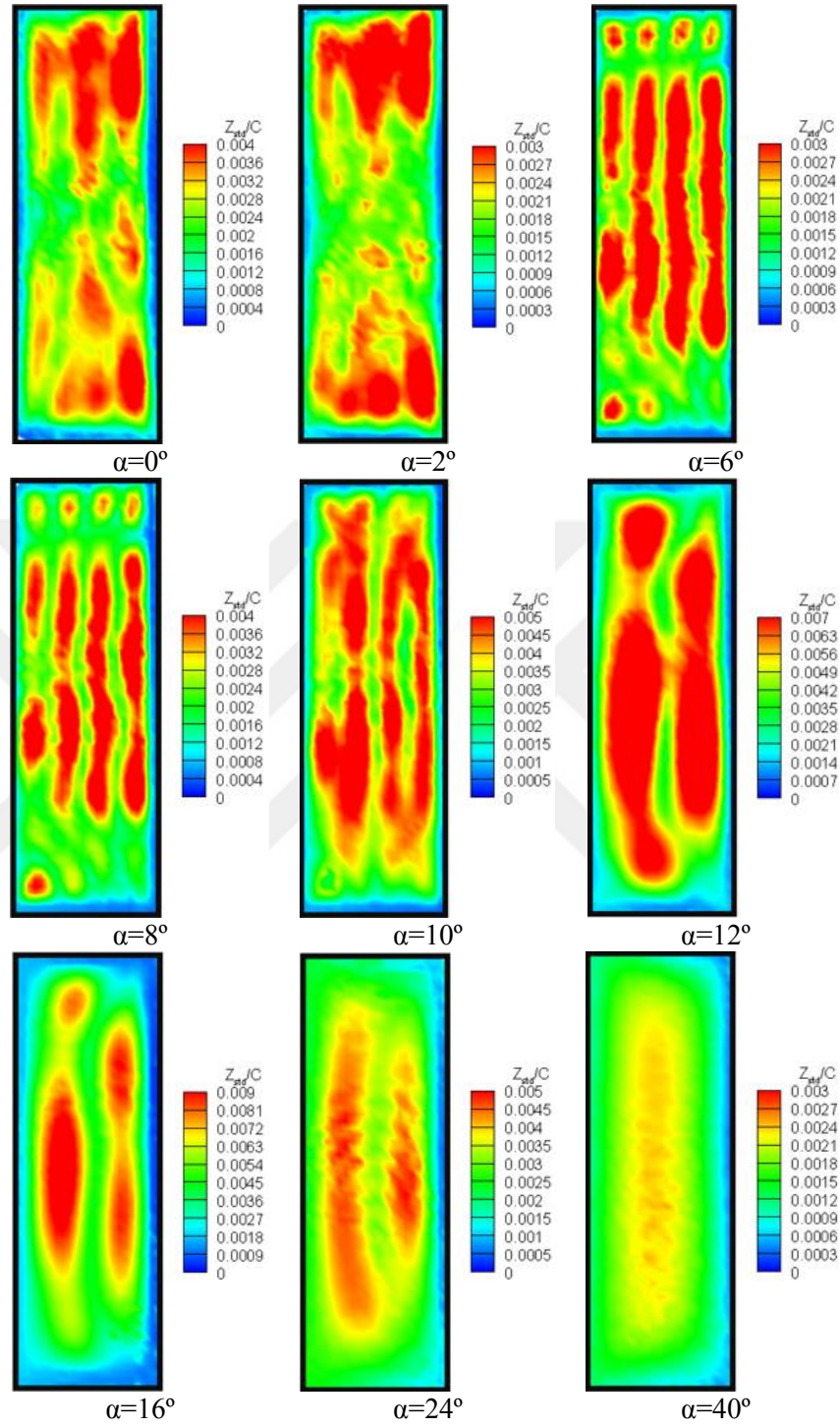
Şekil 40. Esnek AR=3 esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=7.5 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon



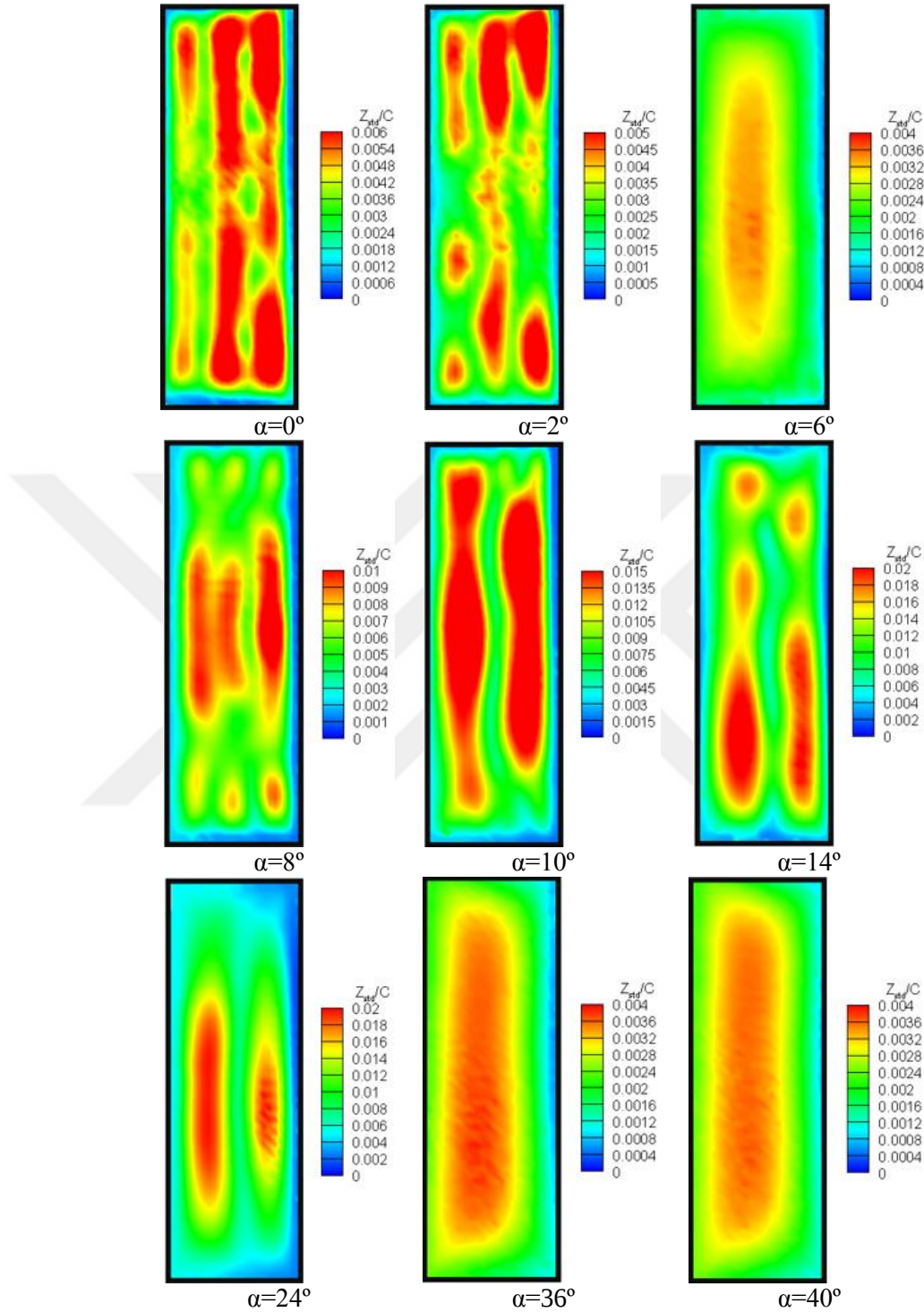
Şekil 41. AR=3 esnek membran kanatta $Re=2.5 \times 10^4$ 'de ve $\alpha=16^\circ$ 'de oluşan deformasyonun 3 boyutlu örnek gösterimi



Şekil 42. Farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ için AR=3 esnek kanadın deformasyonunun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları



Şekil 43. Farklı hücum açılarında ve $Re=5.0 \times 10^4$ için AR=3 esnek kanadın deformasyonunun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları

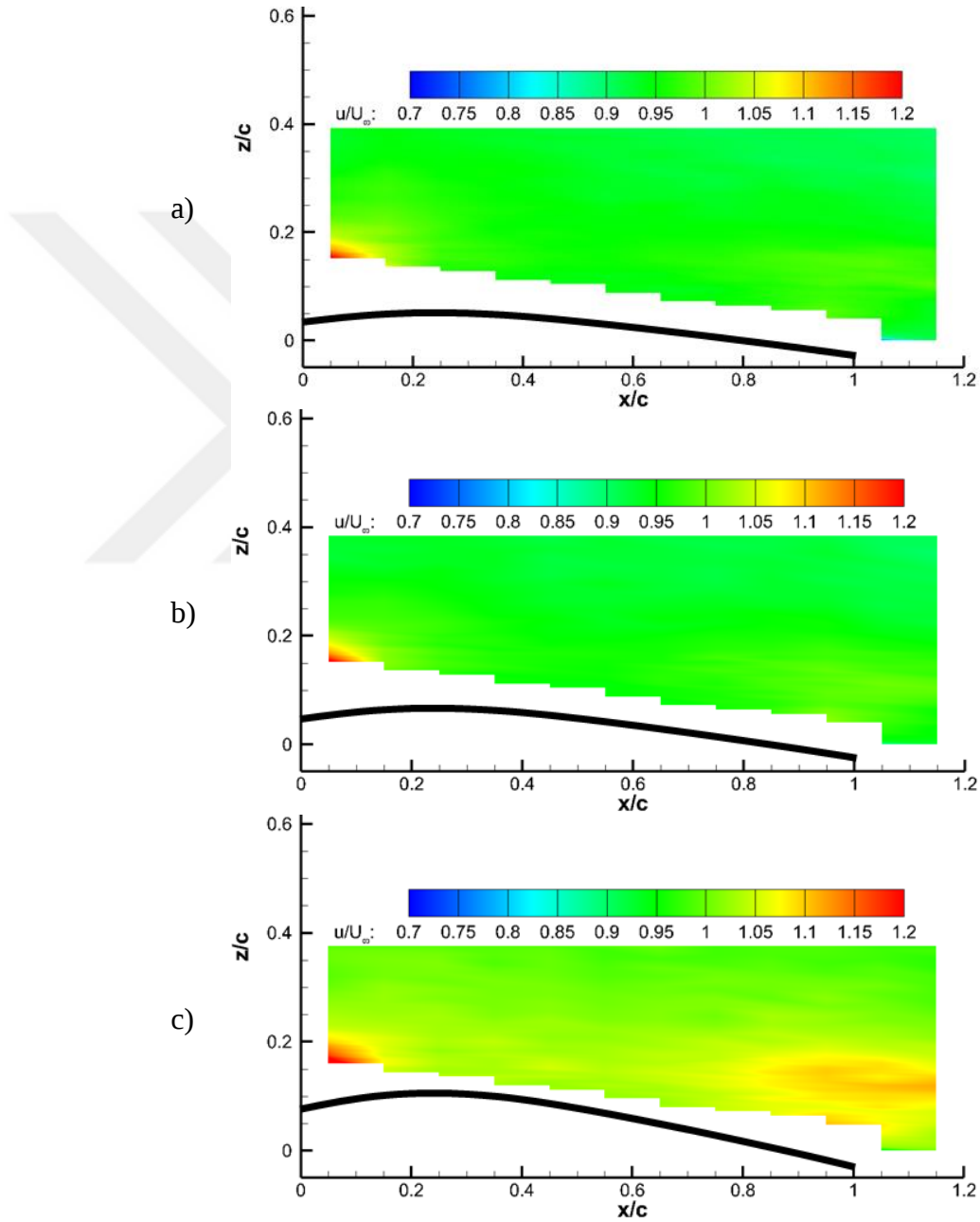


Şekil 44. Farklı hücum açılarında ve $Re=7.5 \times 10^4$ için $AR=3$ esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları

2.5.8. $AR=3$ Esnek Kanat İçin Hız Dağılımı Ölçüm Deneyi Sonuçları

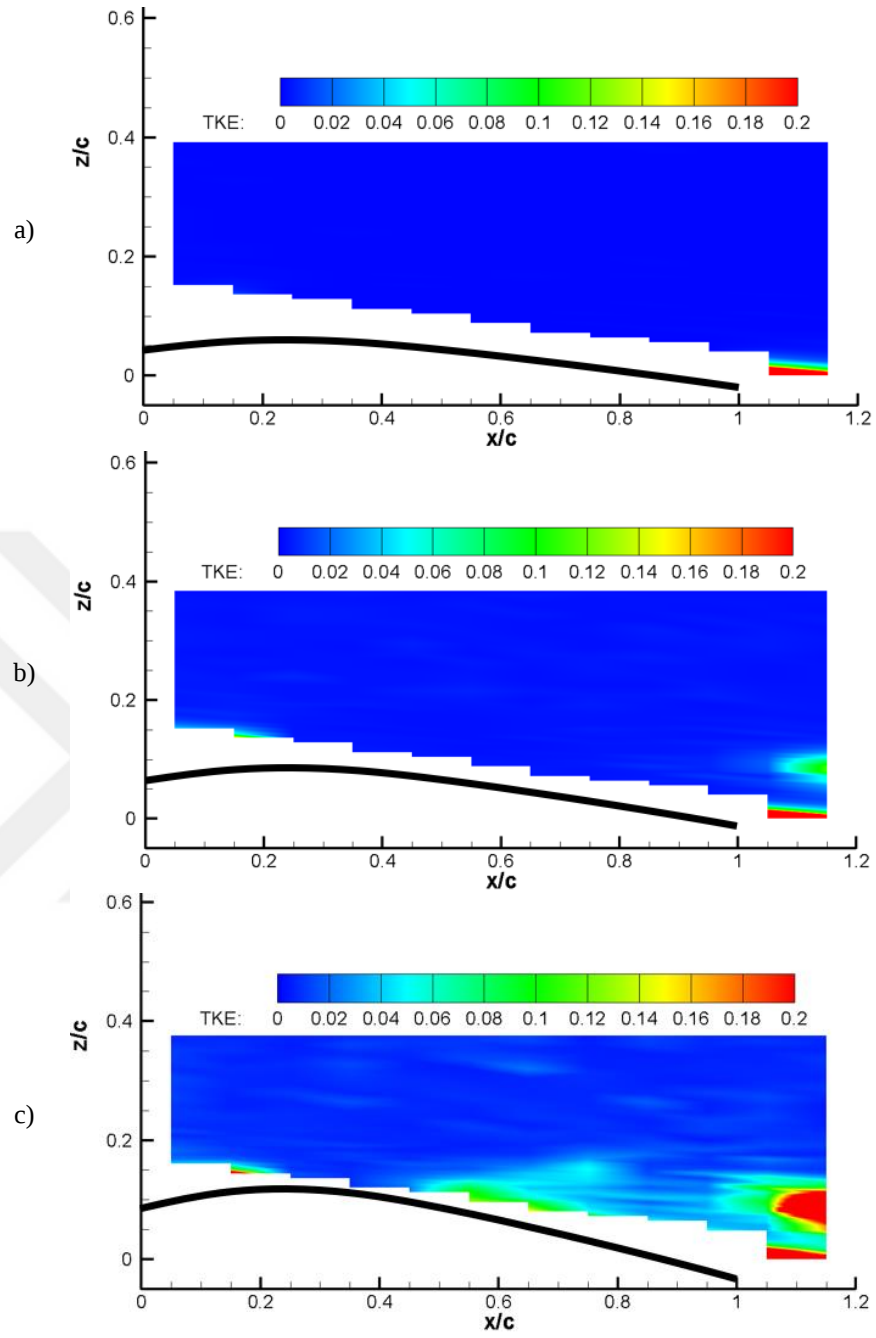
Şekil 45-46'da, $AR=3$ esnek kanadın değişik Re sayılarında hız ve TKE dağılımları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, düşük Re sayılarında atalet kuvvetleri, daha büyük

Re sayılarına göre az olduğundan düşük hızlı akış bölgesi daha geniş iken Re sayısı artması ile düşük hızlı akış bölgesinin daraldığı görülmektedir. Şekil 46’da verilen TKE dağılımlarına bakıldığında TKE değerlerinin yüksek olduğu bölgede çalkantıların artmış olduğu anlaşılmakta ve bu bölgelerde duman deneyi ve hız dağılımı sonuçlarında da görüldüğü gibi hücum kenarı ayrılmalarına denk gelmektedir.



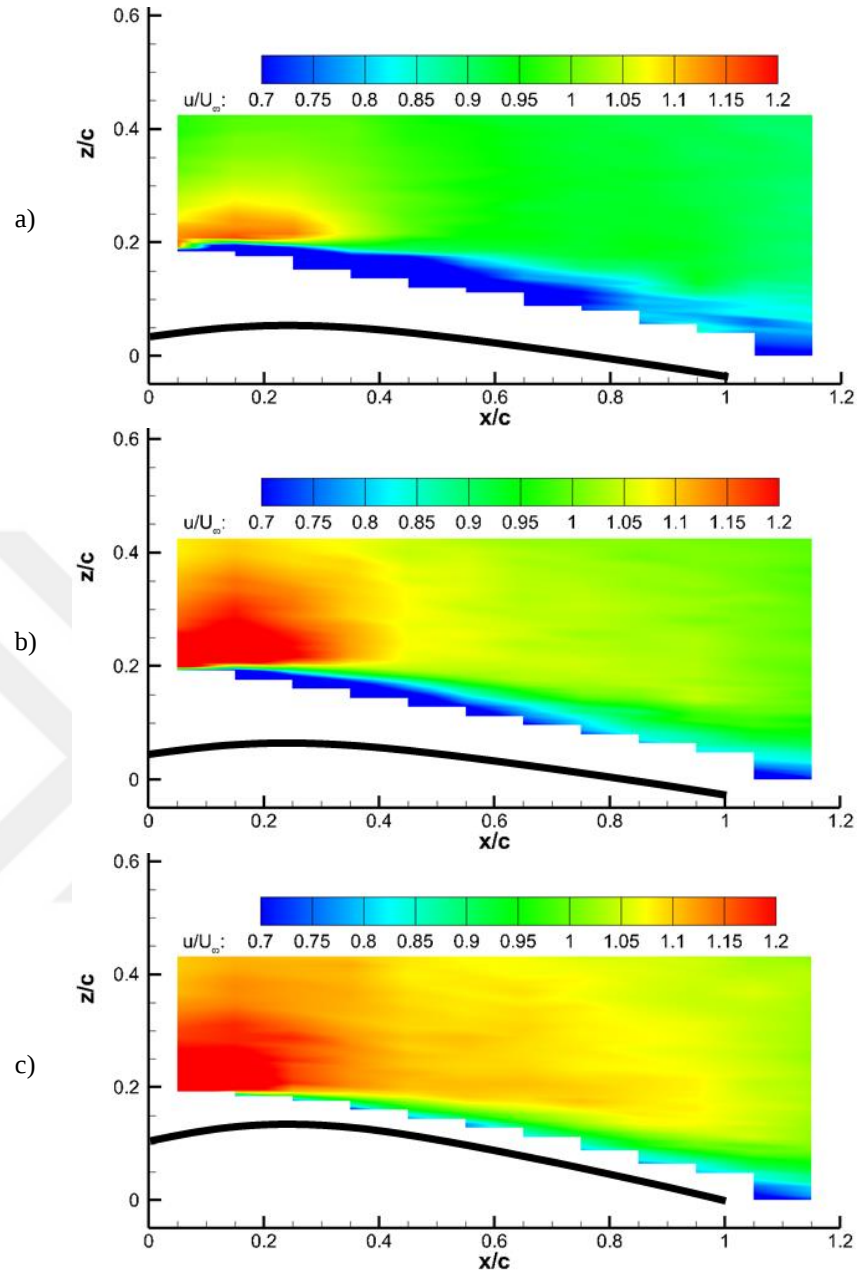
Şekil 45. AR=3 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ de $y/s=0.1$ konumunda hız dağılımı

a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$ c) $Re=7.5 \times 10^4$



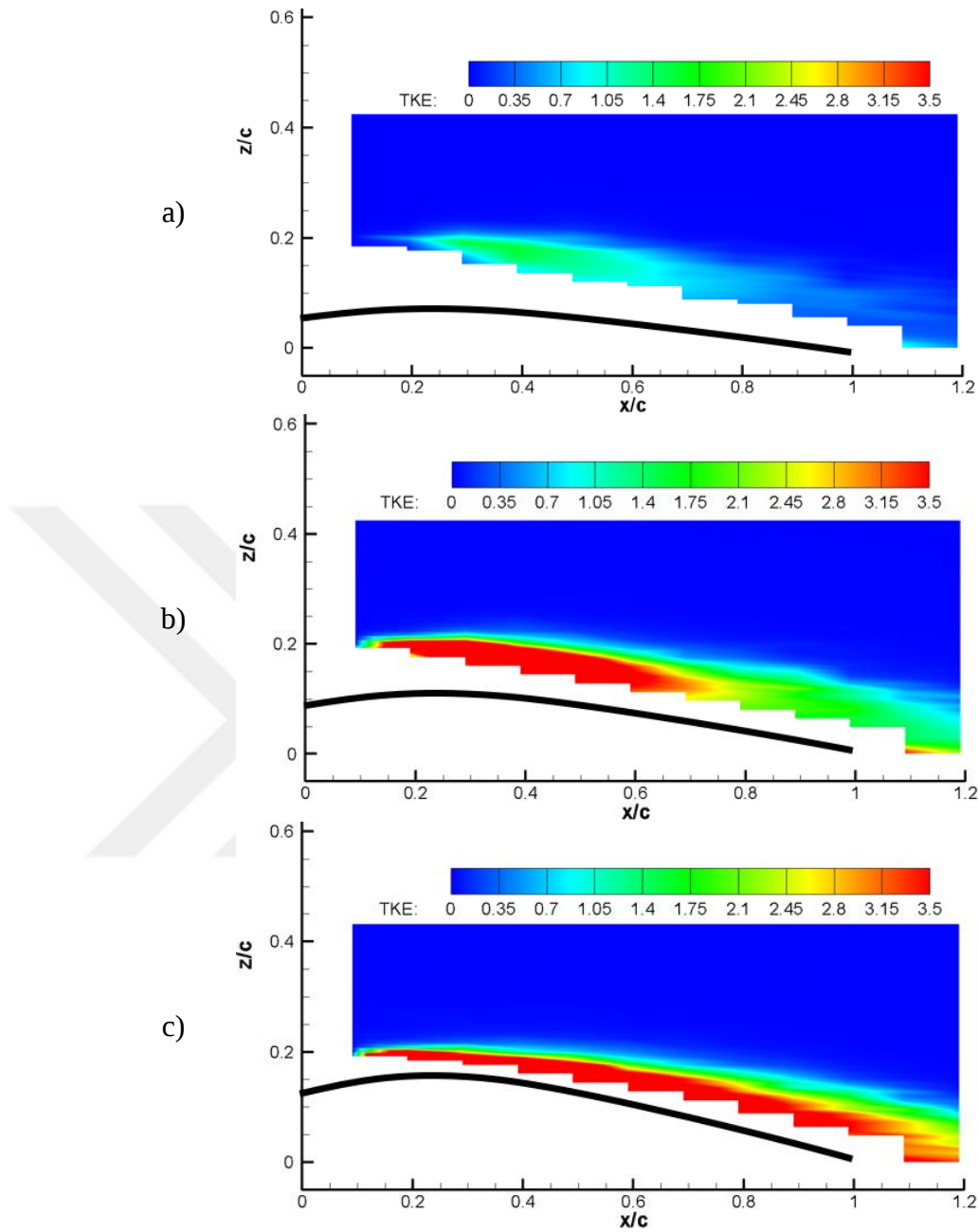
Şekil 46. AR=3 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ de $y/s=0.1$ konumunda TKE dağılımı

a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$ c) $Re=7.5 \times 10^4$



Şekil 47. AR=3 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.4$ konumunda hız dağılımı

a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$ c) $Re=7.5 \times 10^4$



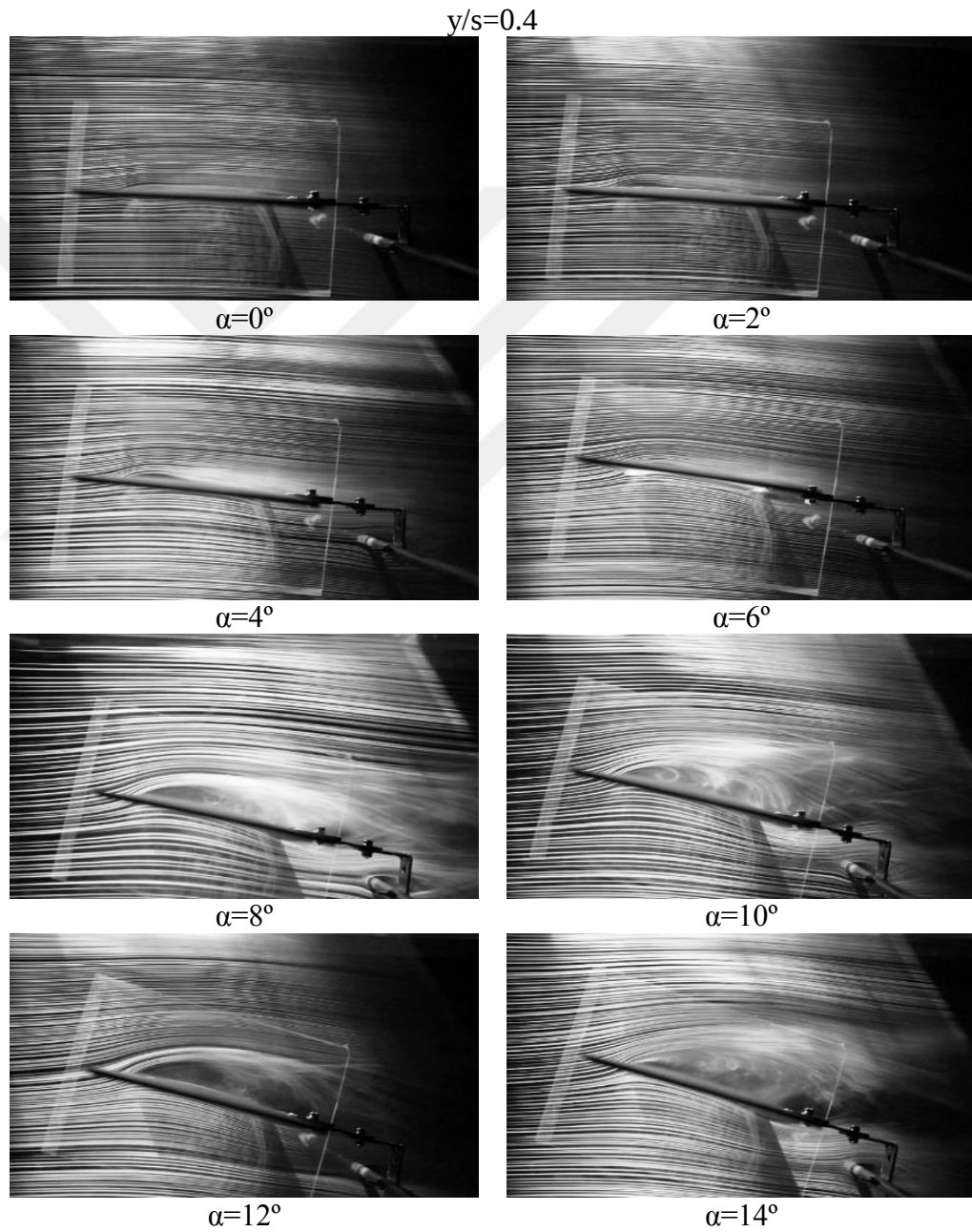
Şekil 48. AR=3 esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.4$ konumunda TKE dağılımı

a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$ c) $Re=7.5 \times 10^4$

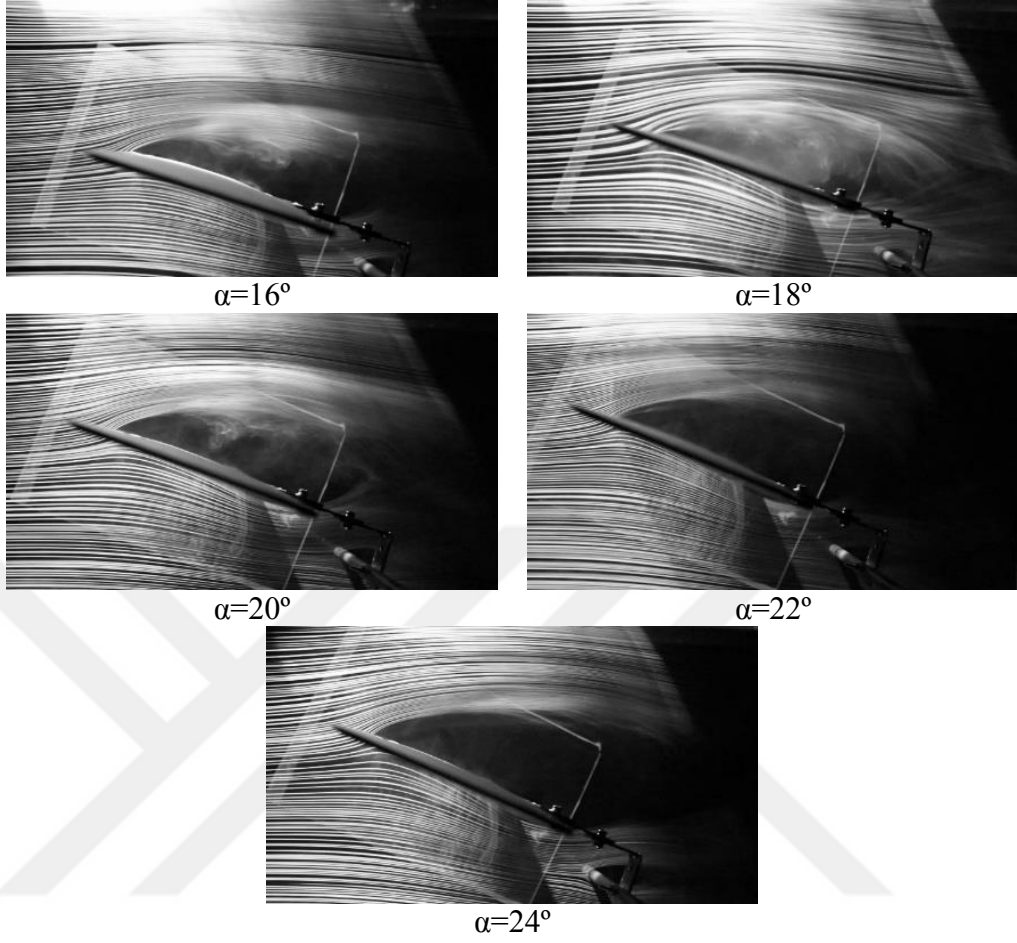
2.5.9. 2D Esnek Kanat İçin Duman Teli Deneyi Sonuçları

Şekil 49-50'de 2D esnek kanadın farklı hücum açıları ve Re sayılarındaki duman teli deneyi sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlarda kanat üzerindeki akışta düşük hücum açılarındaki oluşan hücum kenarı ayrışmaları ve LSB'nin AR=1 ve AR=3 esnek kanada göre daha büyük ve belirgin olduğu, $\alpha=10^\circ$ - 12° 'den sonra kanadın tutunma kaybına

girdiği ve $\alpha=20^\circ$ 'den sonra ise kanat üzerindeki akışın tamamen ayrıldığı görülmektedir. 2D kanatta uç girdapları oluşmadığından ayrılma kabarcıkları daha etkin ve performans daha düşük olmakta, Re sayısı arttıkça kanat üzerindeki atalet fazla olduğundan akış biraz daha kararlı hale gelmektedir. Ayrıca 2D kanatta hücum kenarı ayrılmaları büyümekte ve ayrılmaların daha belirgin ve büyük olduğu görülmektedir.

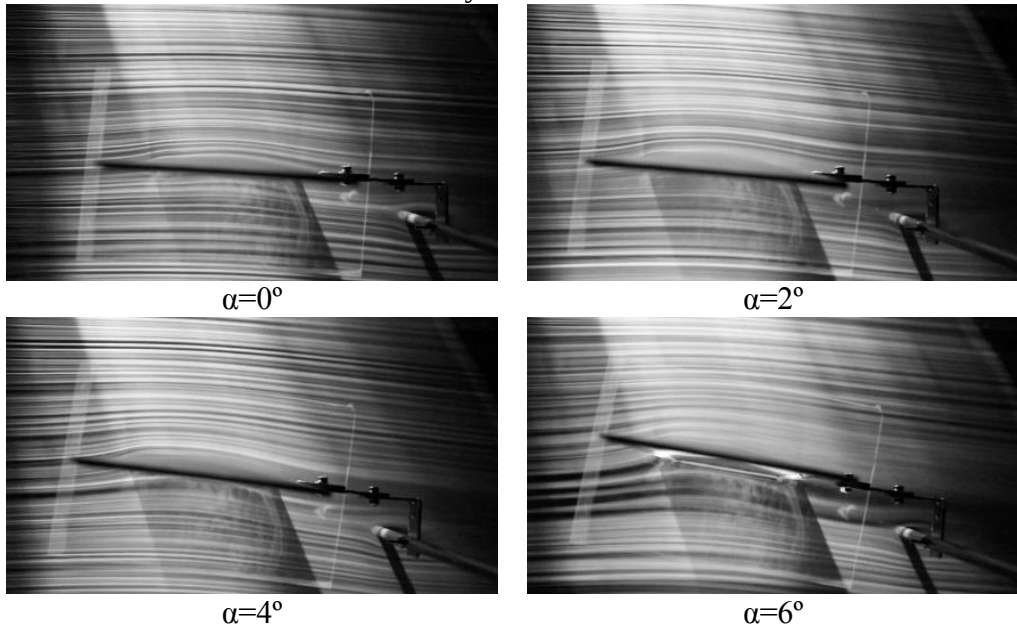


Şekil 49. Duman teli ile akış görselleştirme (2D, $Re=2.5 \times 10^4$)

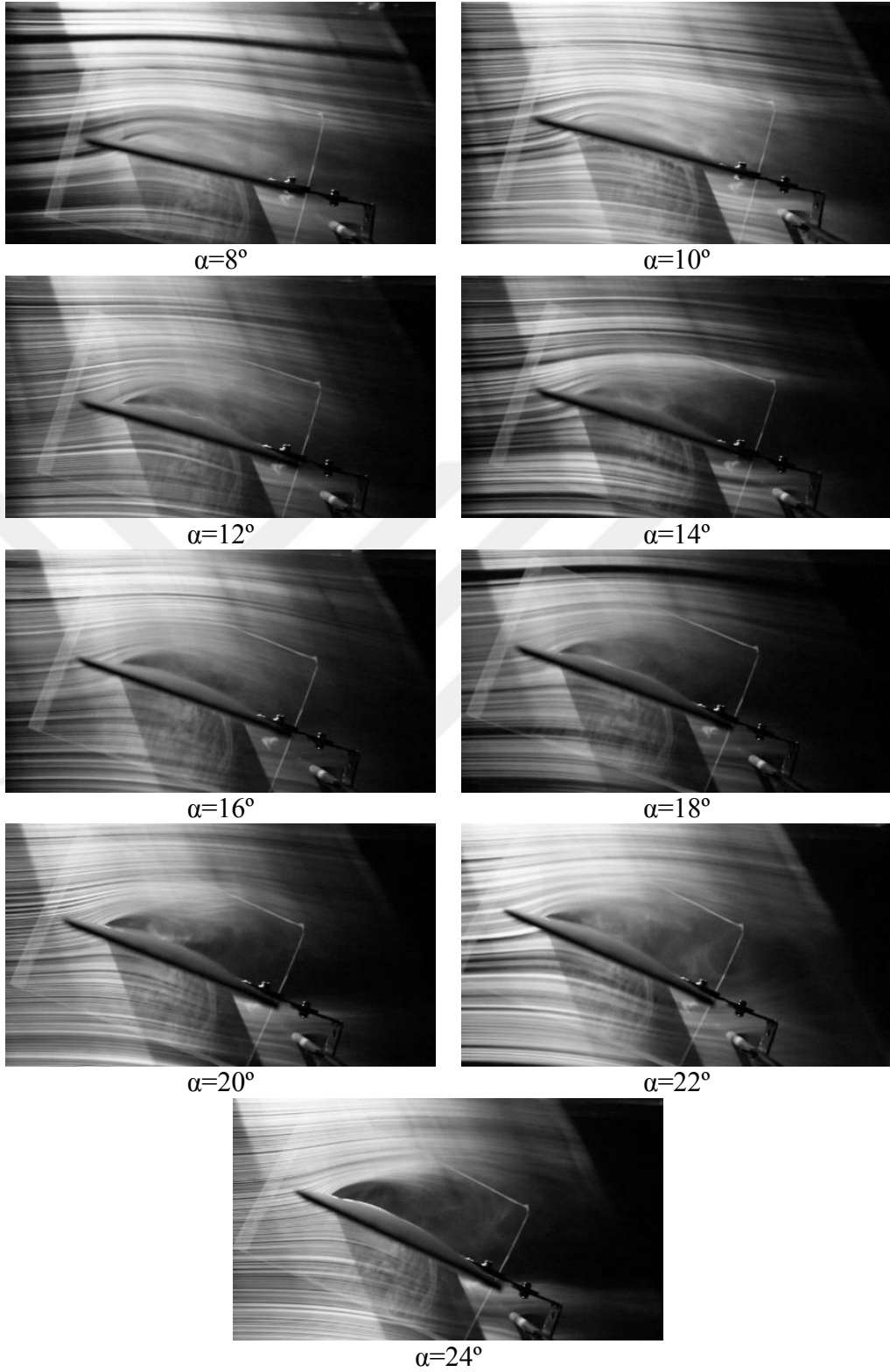


Şekil 49. Devamı

$y/s=0.4$



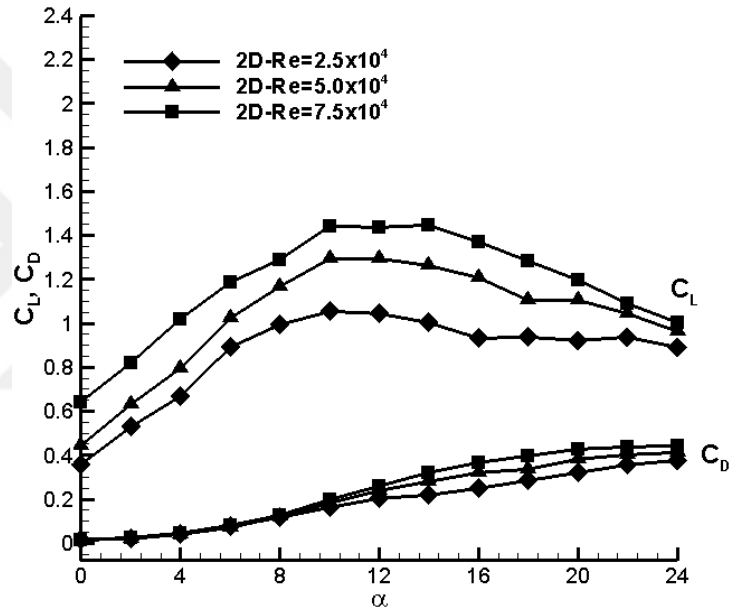
Şekil 50. Duman teli ile akış görselleştirme (2D, $Re=5.0 \times 10^4$)



Şekil 50. Devamı

2.5.10. 2D Esnek Kanat İçin Kuvvet Deneyi Sonuçları

Şekil 51’de üç farklı Re sayısında ve değişen hücum açılarında 2D esnek membran kanat için kuvvet deneyi sonuçları görülmektedir. 2D esnek kanat için tutunma kaybı açısı bütün Re sayıları için 10° iken maksimum taşıma kuvveti katsayıları $Re=2.5 \times 10^4$, $Re=5 \times 10^4$, $Re=7.5 \times 10^4$ için sırasıyla yaklaşık 1.05, 1.25 ve 1.45’dir. Diğer en/boy oranlı esnek kanatlara göre tutunma kaybı açıları ve aerodinamik performans daha düşüktür. Bunun yanında sürüklenme kuvveti uç girdapları oluşumu olmadığından diğer esnek kanat sonuçlarına göre daha azdır.

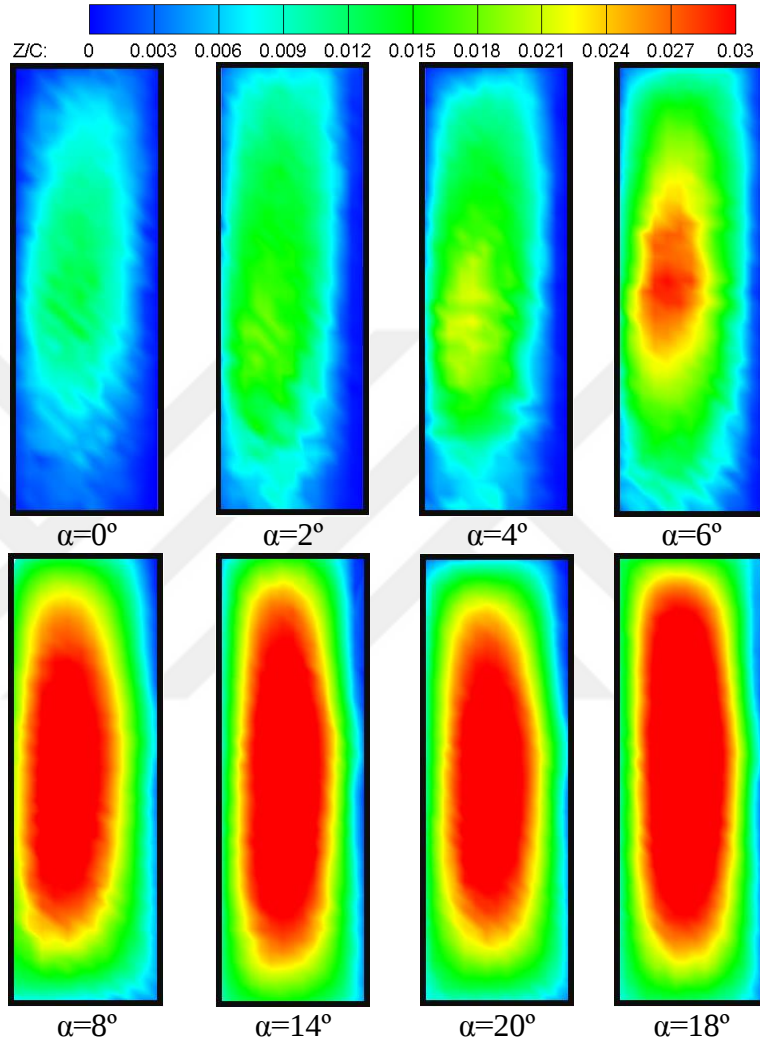


Şekil 51. Esnek kanat için farklı Re sayılarında aerodinamik kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi

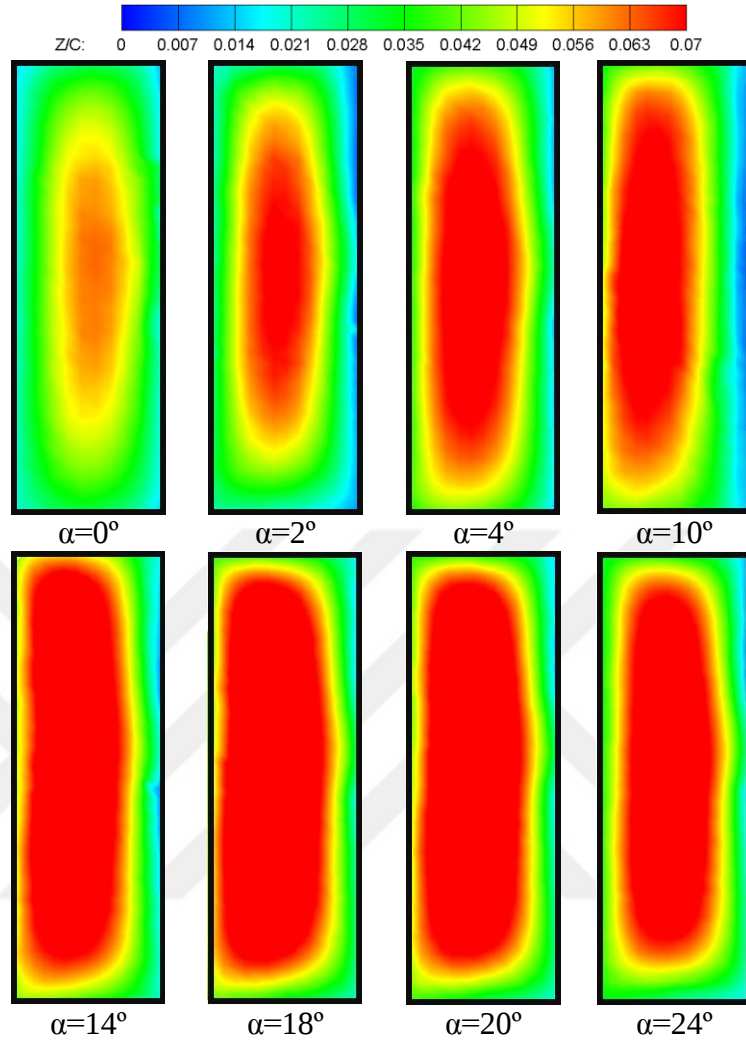
2.5.11. 2D Esnek Kanat İçin Deformasyon Ölçüm Deneyi Sonuçları

Şekil 52-54’te 2D esnek membran kanat için değişen Re sayılarında deformasyon sonuçları verilirken, Şekil 55-57’de standart sapma sonuçları verilmiştir. $Re=2.5 \times 10^4$ için düşük hücum açılarında tek modlu titreşim göze çarparken, hücum açısının $\alpha=10^\circ$ olması ile kanat açıklığı ve kordu boyunca iki modlu titreşimler gözlemlenmekte ve bu etki $\alpha=22^\circ$ ’ye kadar devam etmektedir. $\alpha=24^\circ$ ’den sonra tek modlu titreşim tekrar oluşmaktadır. $Re=5.0 \times 10^4$ iken düşük hücum açılarında küçük girdaplar nedeniyle ($\alpha=0^\circ-6^\circ$) çok modlu titreşim görülmüş ve hücum açısının artması ile ($\alpha=8^\circ$ ’den sonra) esnek kanat üzerindeki ayrılmaların ve girdapların büyümesi ile ikili mod titreşimler

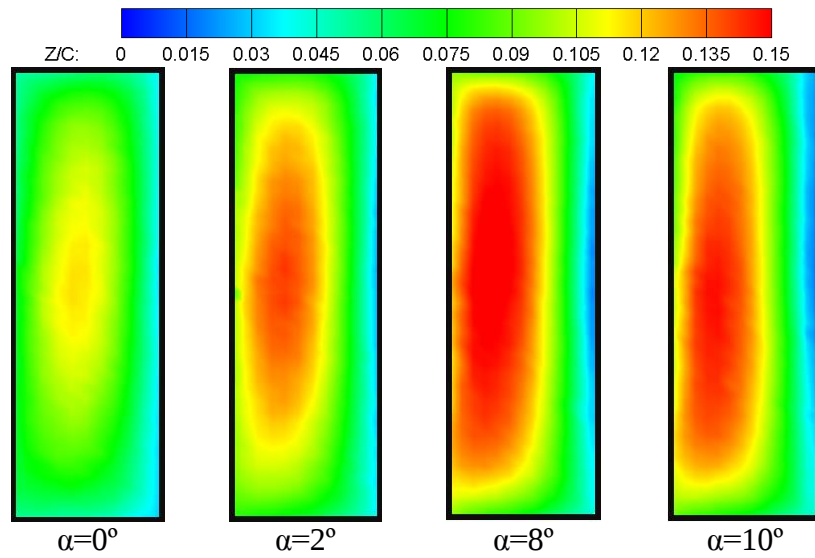
hakim olmuştur. 2D esnek kanadın $Re=7.5 \times 10^4$ iken deformasyon ölçüm sonuçlarında esnek kanadın çerçevesinde titreşim arttığından deney sonucu almak zorlaşmış olup elde edilebilen sonuçlardan genelde iki modlu titreşimin olduğu görülmektedir.



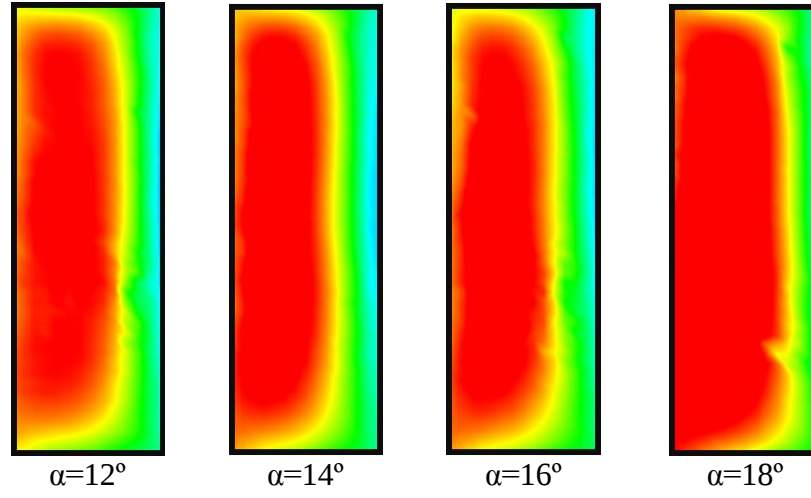
Şekil 52. 2D esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon sonuçları



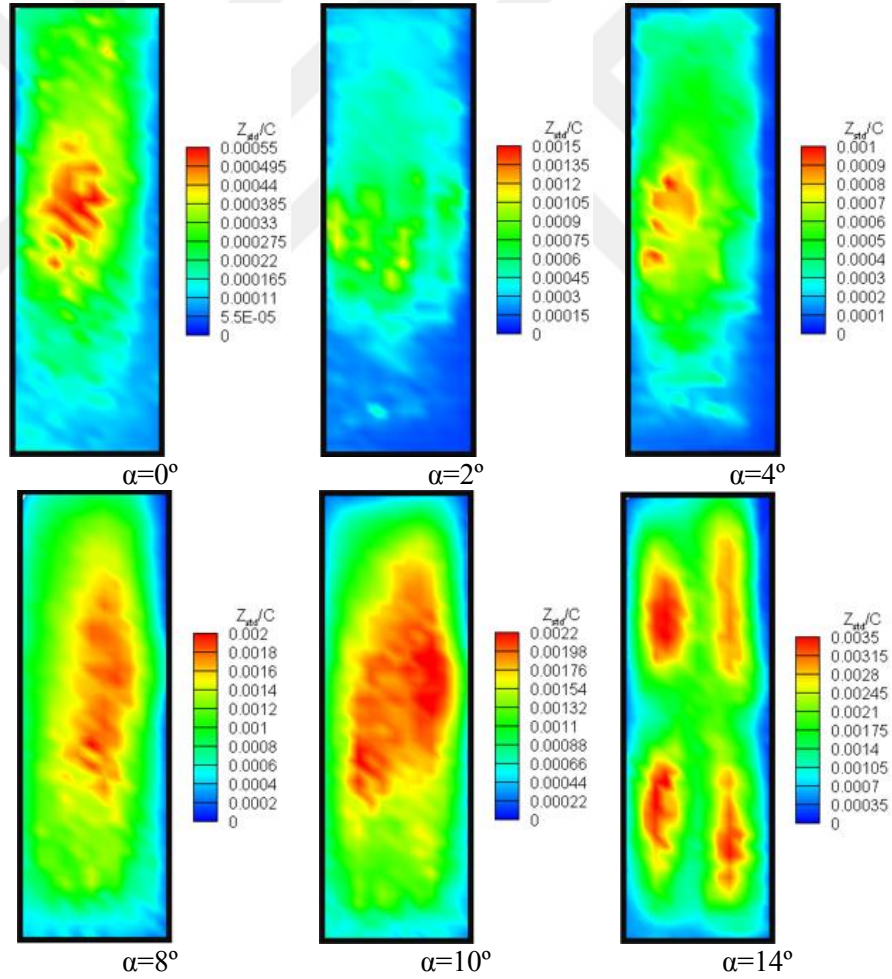
Şekil 53. 2D esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=5.0 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon sonuçları



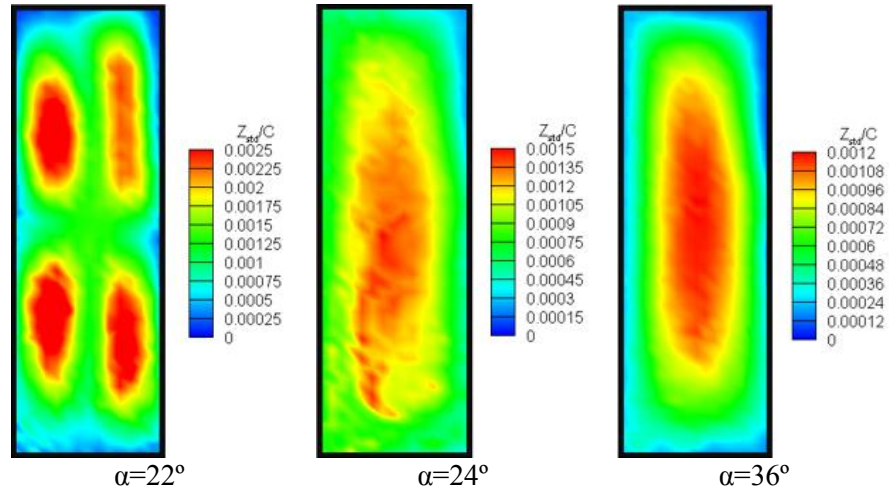
Şekil 54. 2D esnek membran kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=7.5 \times 10^4$ 'de oluşan deformasyon sonuçları



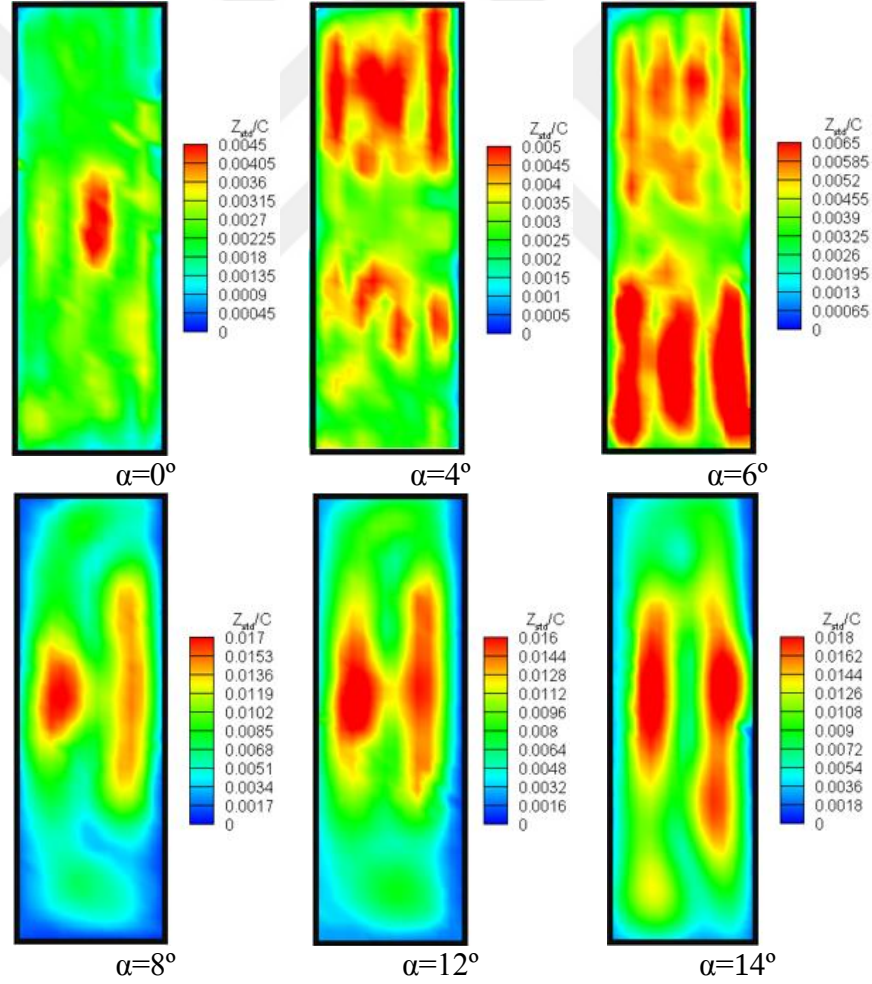
Şekil 54. Devamı



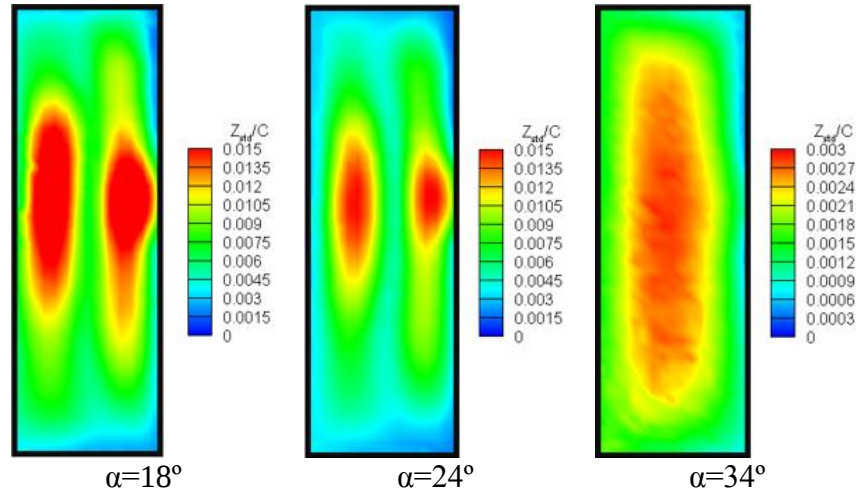
Şekil 55. Farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ için 2D esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları



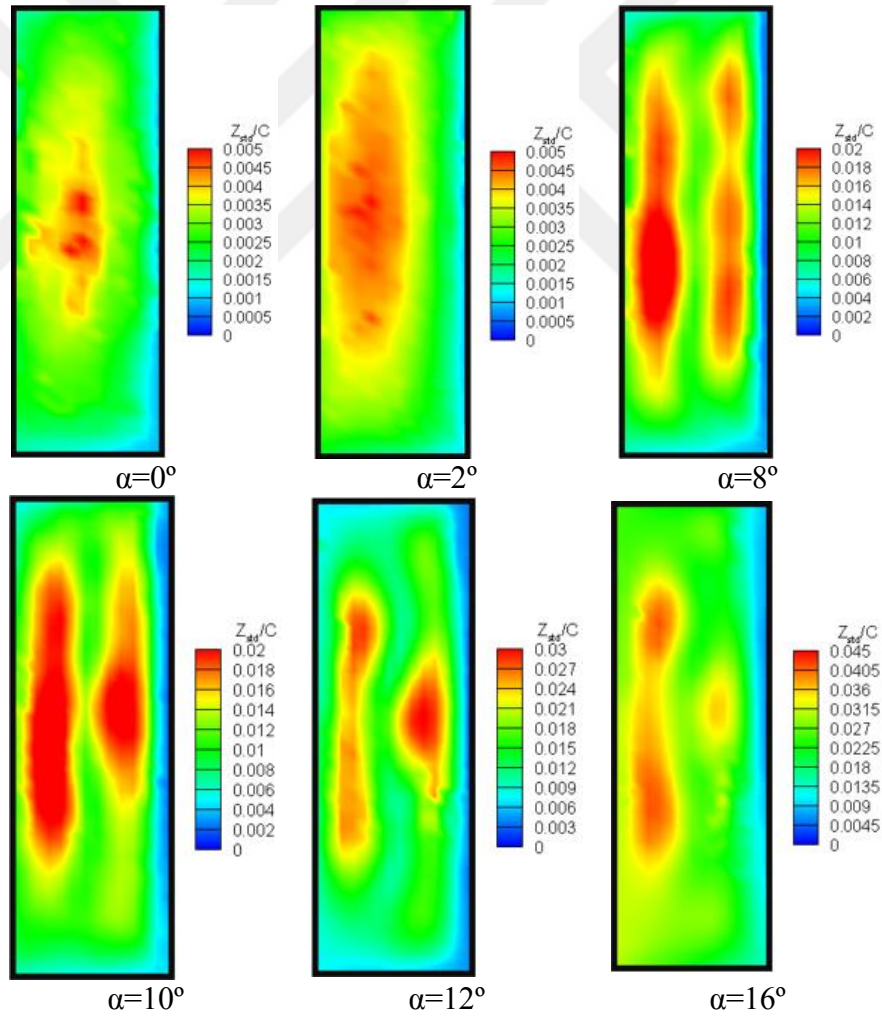
Şekil 55. Devamı



Şekil 56. Farklı hücum açılarında ve $Re=5.0 \times 10^4$ için 2D esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları



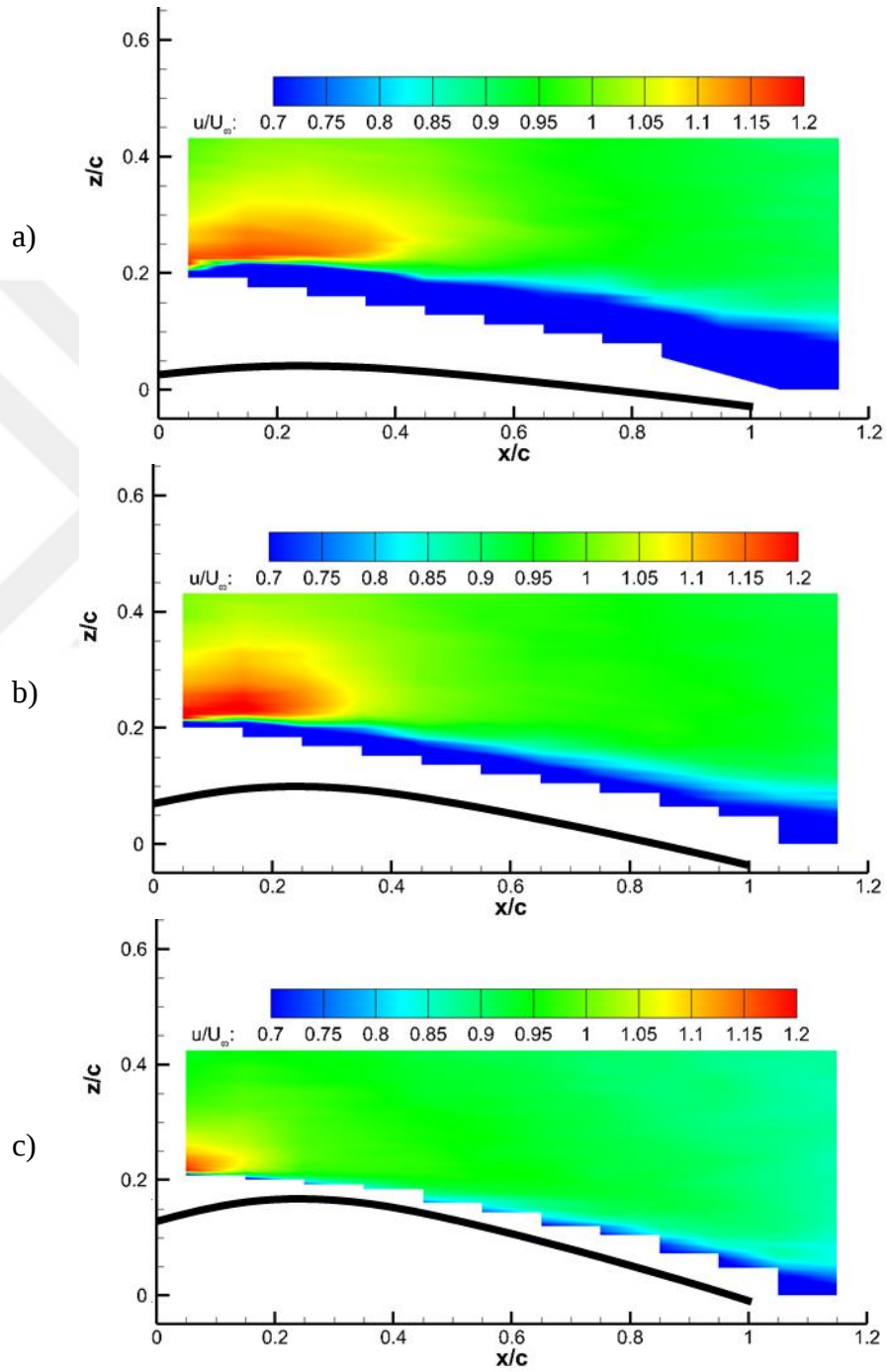
Şekil 56. Devamı



Şekil 57. Farklı hücum açılarında ve $Re=7.5 \times 10^4$ için 2D esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları

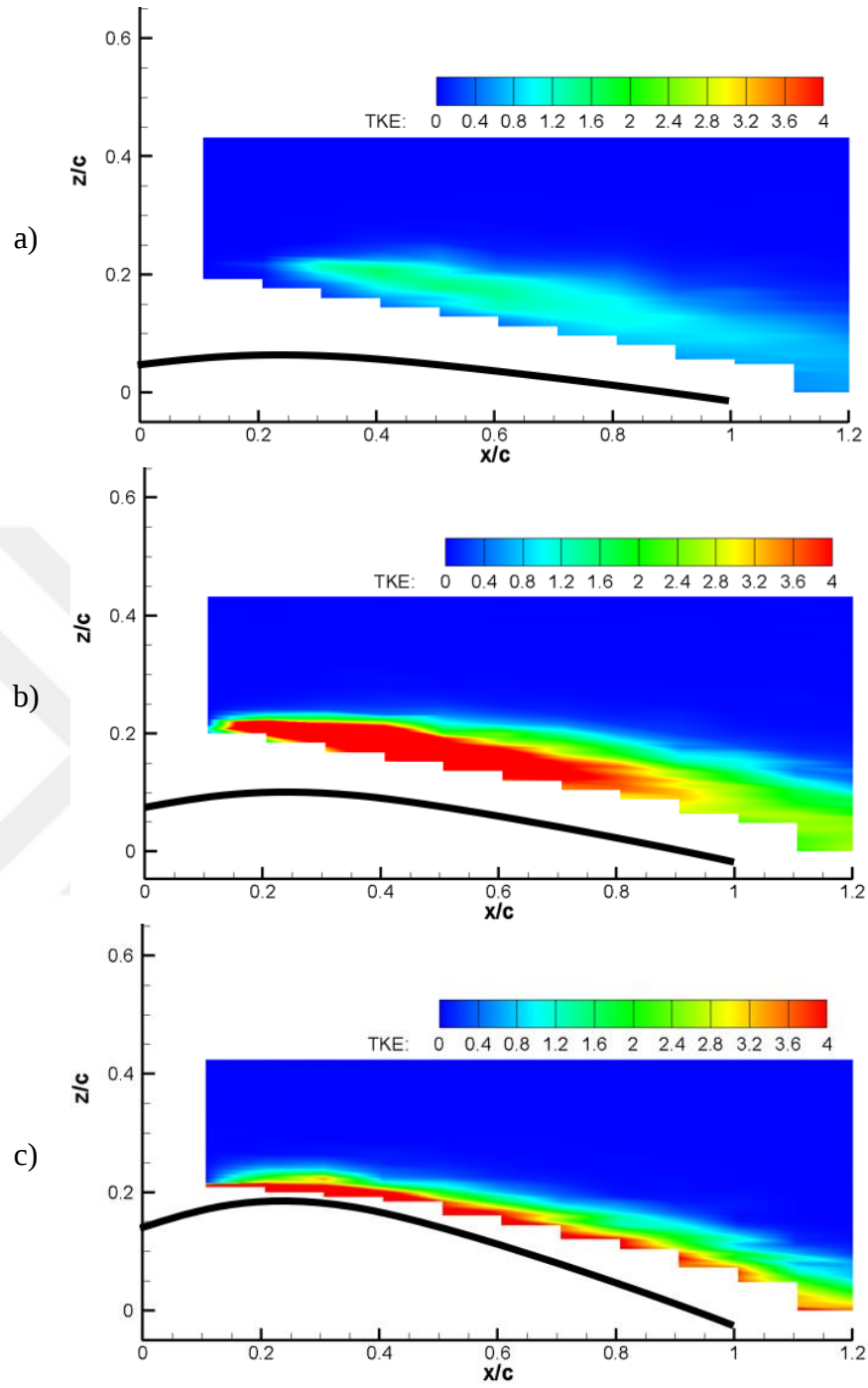
2.5.12. 2D Esnek Kanat İçin Hız Dağılımı Ölçüm Deneyi Sonuçları

2D esnek kanadın $Re=2.5 \times 10^4$, $Re=5.0 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ 'de hız dağılımları ve TKE dağılımları sırasıyla Şekil 58 ve Şekil 59'da verilmiştir.



Şekil 58. 2D esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.4$ konumunda hız dağılımı

a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$ c) $Re=7.5 \times 10^4$



Şekil 59. 2D esnek kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de $y/s=0.4$ konumunda TKE dağılımı

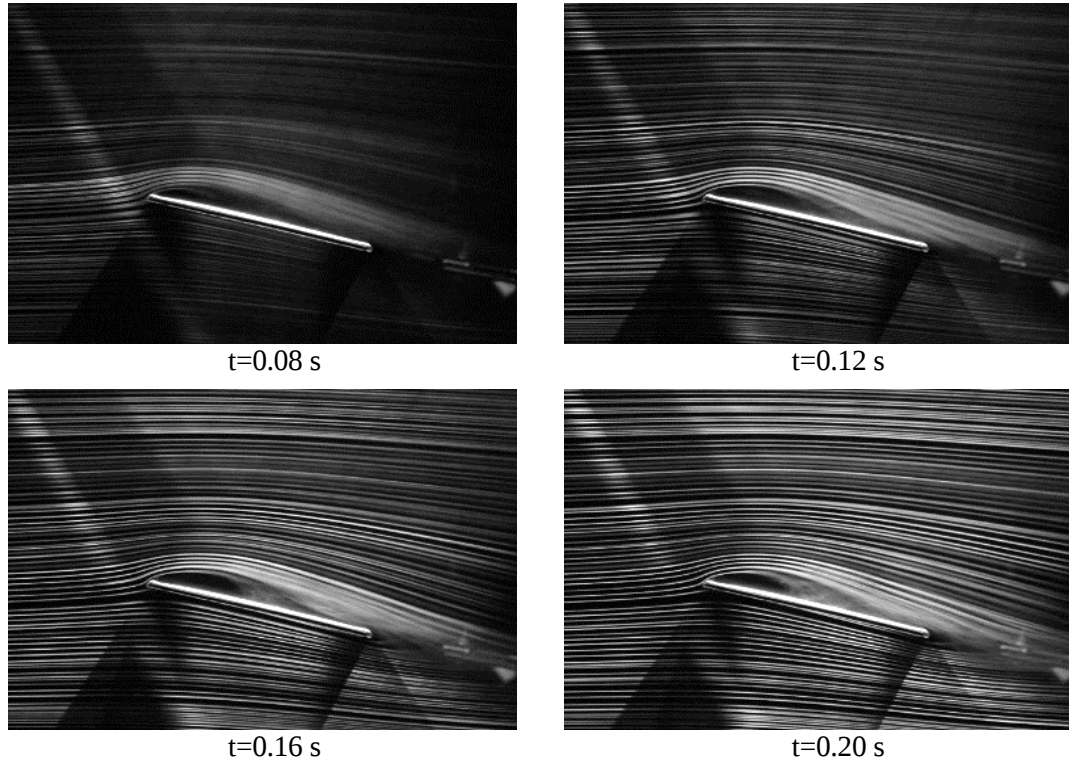
a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$ c) $Re=7.5 \times 10^4$

Şekil 58'de düşük Re sayılarında atalet kuvvetleri, daha büyük Re sayılarına göre az olduğundan ayrılmış akış ve düşük hız bölgesi daha geniş iken Re sayısı artması ile düşük hız bölgesinin küçüldüğü görülmektedir. Bu düşük hız bölgeleri duman deneyi sonuçlarında hücum kenarı ayrılmaları ve LSB kaynaklı girdap oluşum bölgelerine denk

gelmekte olup Şekil 59'daki TKE dağılımlarına baktığımızda da bu bölgelerde akış çalkantılarının arttığı anlaşılmaktadır.

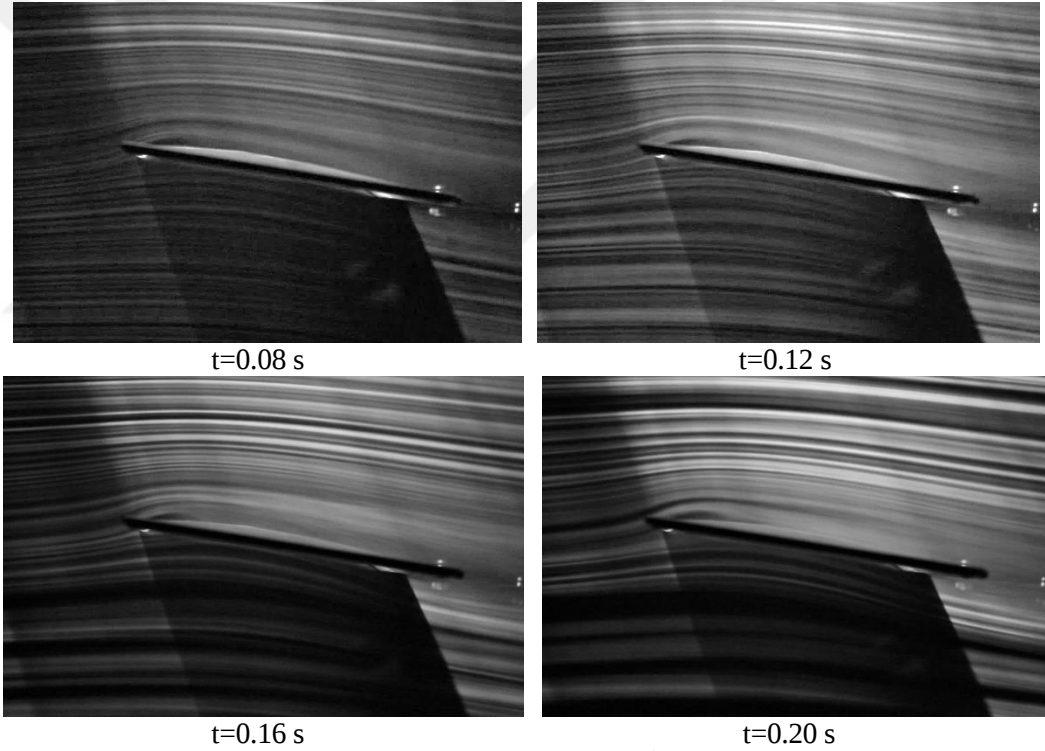
3. Esnek Kanat Üzerindeki LSB Oluşumunun Zamana Bağlı İncelenmesi

Esnek kanat üzerindeki akışın ve LSB oluşumunun Re sayısı değişimi ve akıştaki anlık değişimlerin esnek kanat üzerindeki akışkan-yapı etkileşimi üzerine etkisi daha fazla deneysel veri olan $AR=3$ esnek kanat için bu bölümde ele alınmıştır. Kanat üzerinde oluşan akış olaylarının anlık görüntülerinin duman teli deneylerinden elde edilmesinden sonra, belirli açılarda elde edilen video görüntüleri tek tek incelenmiş ve zamana bağlı LSB oluşumu incelenmiştir. Şekil 60-62 $\alpha=6^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=12^\circ$ hücum açılarında farklı zaman aralıklarında $y/s=0.4$ konumunda zamana bağlı duman teli deneyi ile akış görselleştirme sonuçlarını göstermektedir. $t=0.08s$ ve $t=0.20s$ arasında farklı zamanlarda elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında LSB'nin zamana bağlı davranışı açıkça görülmektedir. Şekil 60'da $Re=2.5 \times 10^4$ için $\alpha=12^\circ$ sabit hücum açısında, kabarcığın büyüklüğü $t=0.16s$ 'de daha büyük hale gelmiştir ve $t=0.20s$ 'de küçülmüştür. Öte yandan, $Re=5 \times 10^4$ ve $\alpha=6^\circ$ 'de LSB'nin boyutu $t=0.08s$ 'den $t=0.12s$ 'ye kadar büyümüş daha sonra $t=0.16s$ 'de ise küçüldüğü gözlemlenmiştir.

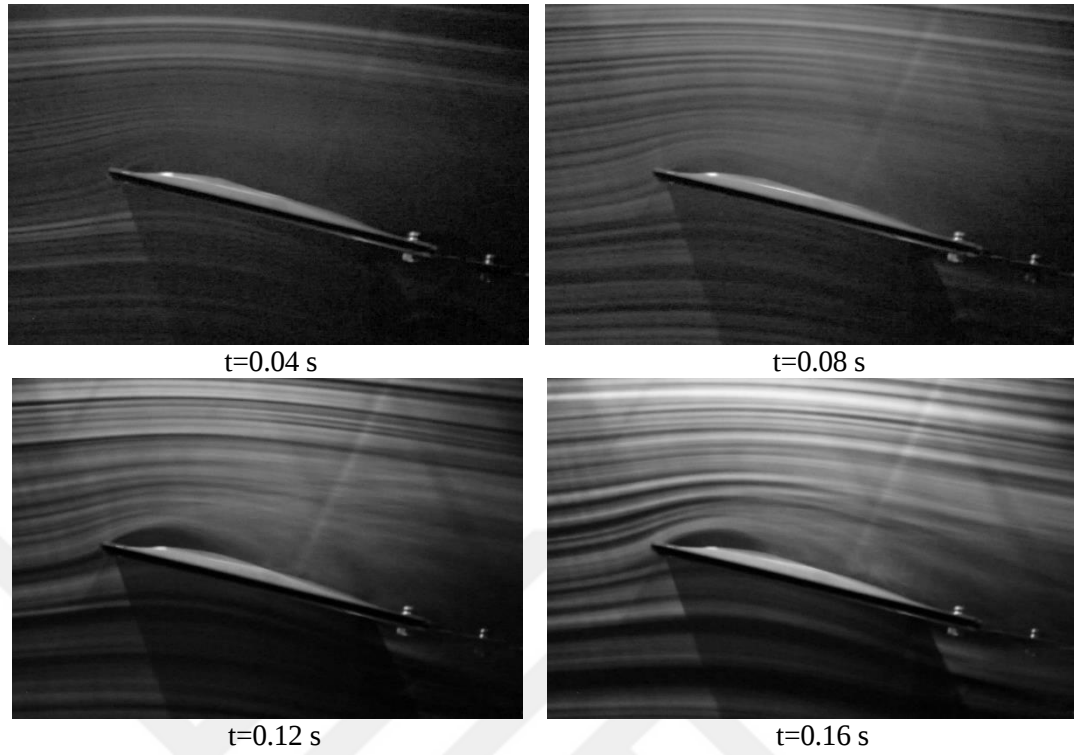


Şekil 60. $AR=3$ esnek kanat için $\alpha=12^\circ$ ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de $y/s=0.4$ konumunda zamana bağlı duman deneyi sonucu [52, 53]

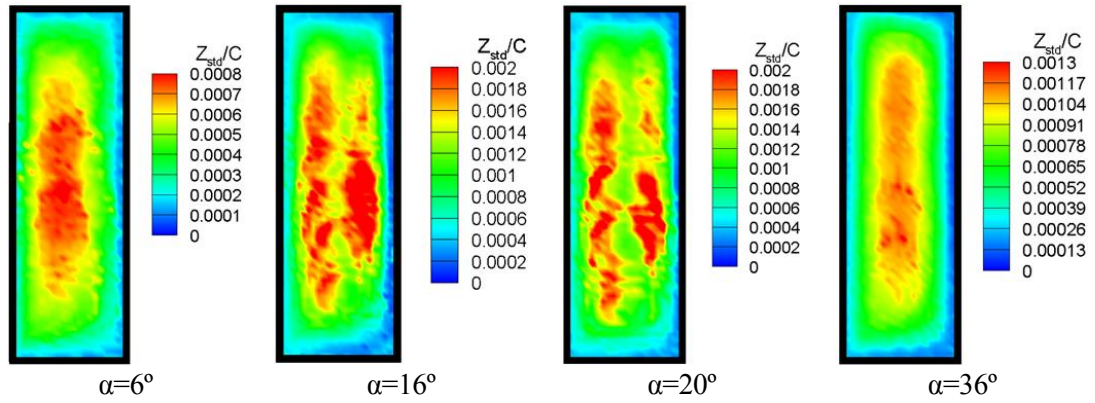
Şekil 61’de görüldüğü gibi $t=0.20s$ ’nin sonunda ise tekrar büyümüştür. Ayrıca, Şekil 62’de görüldüğü üzere $AR=3$ esnek kanat için $\alpha=12^\circ$ ve $Re=5 \times 10^4$ ’de LSB’nin boyutu $t=0.12s$ ’ye kadar büyümüş daha sonra $t=0.16s$ ’de küçülmüştür. Sonuç olarak, esnek membran kanadın kararsız akış karakteristiğinden dolayı LSB’nin boyutunun zamanla değişmektedir. Ayrıca, zamana bağlı görüntülerde görüldüğü üzere, atalet kuvvetleri $Re=2.5 \times 10^4$ ’de düşüktür ve böylelikle girdapların sahip olduğu enerji daha azdır ve girdap oluşumu yavaş bir şekilde tamamlanırken $Re=5 \times 10^4$ ’de daha yüksek atalet kuvvetlerinden dolayı girdap oluşumu daha hızlı gerçekleşir ve daha kararlıdır. Bu durum membran kanat üzerinde meydana gelen deformasyonu da etki etmektedir. Bu etki Şekil 63 ve Şekil 64’te açıkça görülmektedir.



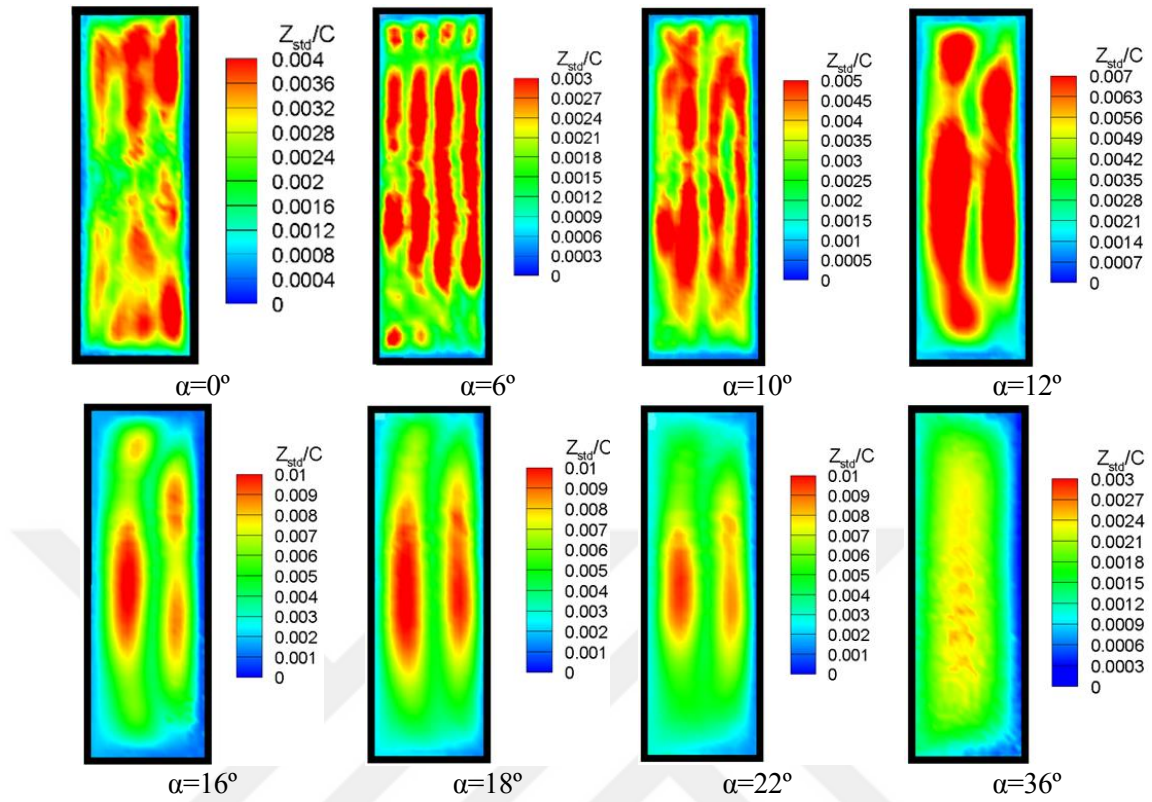
Şekil 61. $AR=3$ esnek kanat için $\alpha=6^\circ$ ve $Re=5.0 \times 10^4$ ’de $y/s=0.4$ konumunda zamana bağlı duman deneyi sonucu [52, 53]



Şekil 62. $AR=3$ esnek kanat için $\alpha=10^\circ$ ve $Re=5.0 \times 10^4$ 'de $y/s=0.4$ konumunda zamana bağlı duman deneyi sonucu [52, 53]



Şekil 63. Farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ için $AR=3$ esnek kanadın deformasyonun zaman ortalımalı standart sapma dağılımları [52]



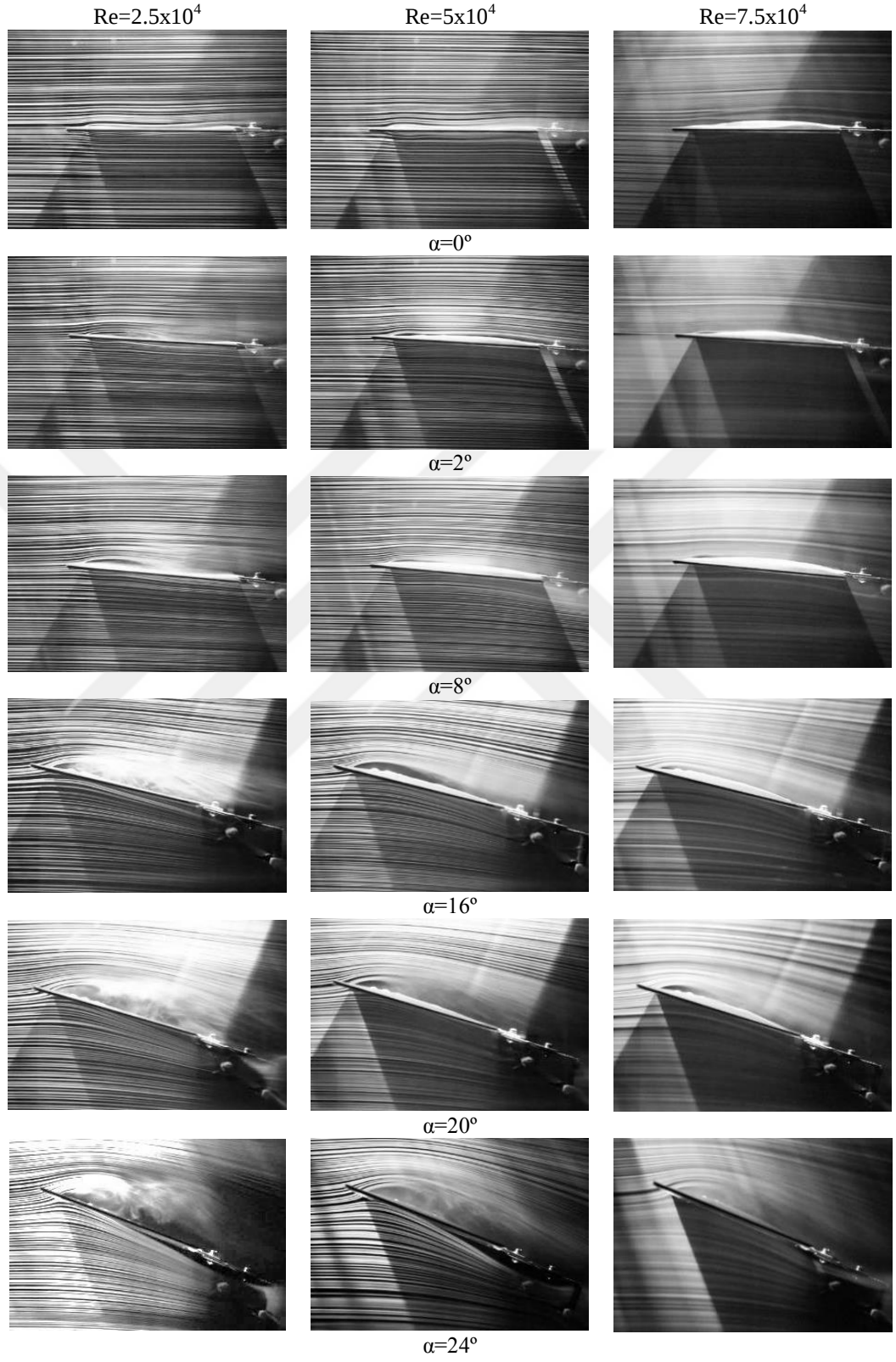
Şekil 64. Farklı hücum açılarında ve $Re=5 \times 10^4$ için $AR=3$ esnek kanadın deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılımları [52]

Şekil 63-64 arasında, esnek membran kanadın farklı hücum açlarına göre $Re=2.5 \times 10^4$ ve $Re=5 \times 10^4$ 'de zaman ortalamalı standart sapma sonuçları gösterilmektedir. $Re=2.5 \times 10^4$ 'de, titreşim modları düşük hücum açılarında ($\alpha=0^\circ-4^\circ$) belirgin olmamasına rağmen, $\alpha=6^\circ$ ve $\alpha=8^\circ$ 'de kort boyunca tek modlu titreşim gözlemlenmiştir. Hücum açısının $\alpha=16^\circ$ 'ye arttırılması ile ikili titreşim modunun oluştuğu ve bu etkinin $\alpha=22^\circ$ 'ye kadar devam etmiştir. Tekli titreşim modunun oluşumu $\alpha=24^\circ$ 'den $\alpha=36^\circ$ 'ye kadar yer almıştır. LSB nedeniyle, maksimum deformasyon değeri ve titreşim mod sayısı Re sayısının $Re=2.5 \times 10^4$ 'den $Re=5 \times 10^4$ 'ye artması ile artmıştır. $Re=5 \times 10^4$ 'te düşük hücum açılarında ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=2^\circ$) maksimum standart sapmanın kanadın uç kısımlarında yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Hücum açısı $\alpha=6^\circ$ ve $\alpha=8^\circ$ 'de kanat açıklığı boyunca ikili üçlü titreşim modu ve kort boyunca dördümlü titreşim modu görülmüştür. Ayrılma kabarcığının etkisiyle, kanadın orta kısımlarında titreşim modları azalmış ve $\alpha=10^\circ$ 'de uç kısımda birleşmiş ve bu titreşim modları $\alpha=12^\circ$ 'de kort boyunca ikili titreşim moduna dönüşerek $\alpha=24^\circ$ 'ye kadar devam etmiştir. Firar kenarına yakın olan ikili titreşim modu $\alpha=12^\circ$ ve $\alpha=24^\circ$ 'de uç girdaplarının etkisinden dolayı kanat açıklığı boyunca azalmıştır. $\alpha=30^\circ$ ve

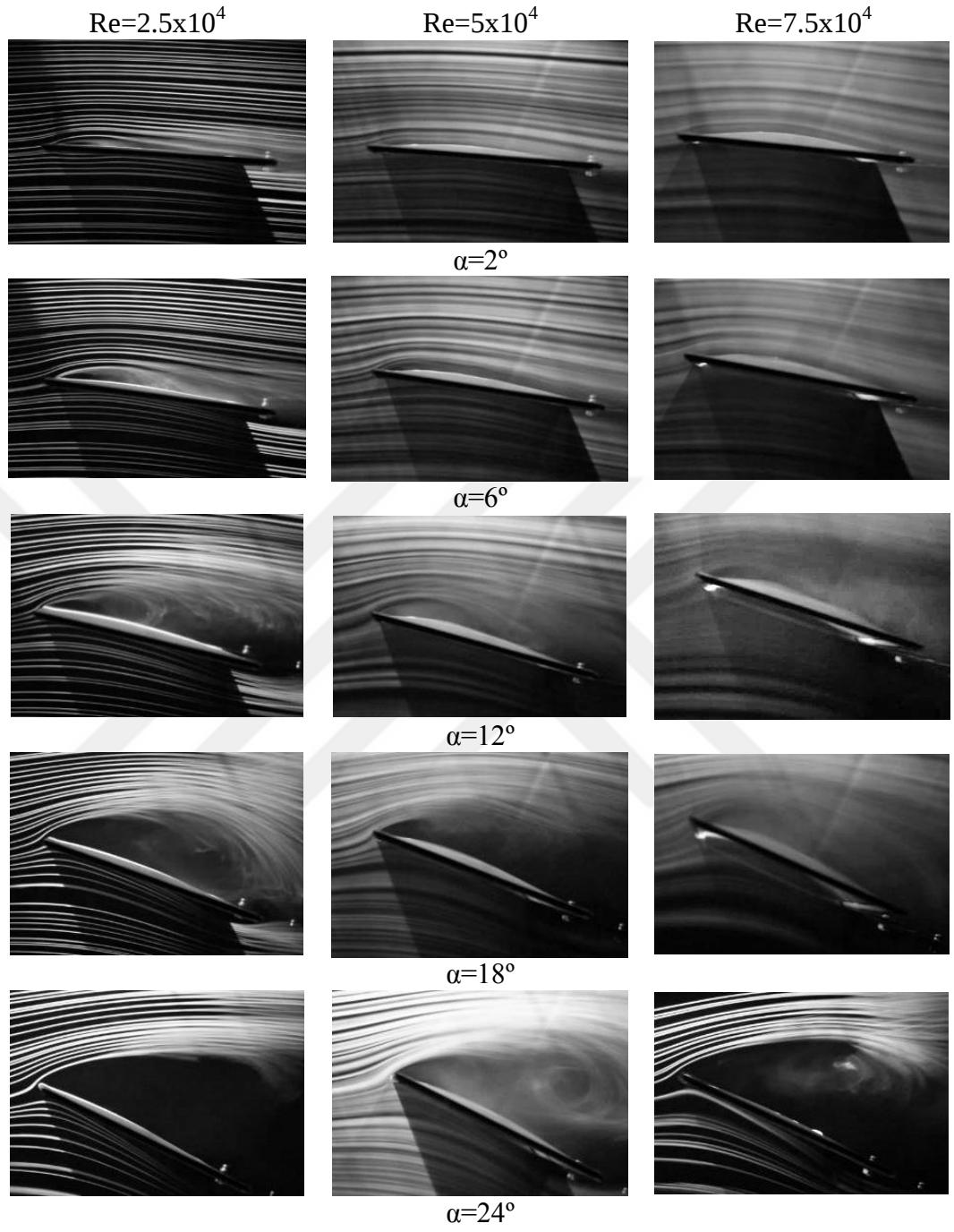
$\alpha=36^\circ$ arasında, tekli titreşim modu gözlemlenmiştir ve standart sapma değerinin maksimum olduğu bölge hücum açısının artması ile azalmıştır. Standart sapma sonuçları incelendiğinde, hücum açısının değişimi ile oluşan titreşim modları tekli, ikili, üçlü ve dördü olmuştur. Bu çeşitli titreşim modları kanat üzerinde oluşan hücum kenarı ayrılmaları ve girdaplarından dolayı meydana gelmiştir. Büyük fakat düşük enerjili girdaplardan dolayı $Re=2.5 \times 10^4$ 'te standart sapmalar düşük iken, $Re=5 \times 10^4$ 'te özellikle düşük hücum açılarında yüksek enerjiye sahip küçük ve aktif girdaplardan dolayı dördü titreşim modu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, zamana bağlı duman teli deneyi görüntülerinden elde edilen sonuçlarda görüldüğü gibi esnek kanat üzerinde oluşan LSB zamanla değişmiştir ve bu durum kanat üzerindeki titreşimlerin de değişmesine sebep olmuştur.

4. Esnek Membran Kanatların Akışkan-Yapı Etkileşimleri

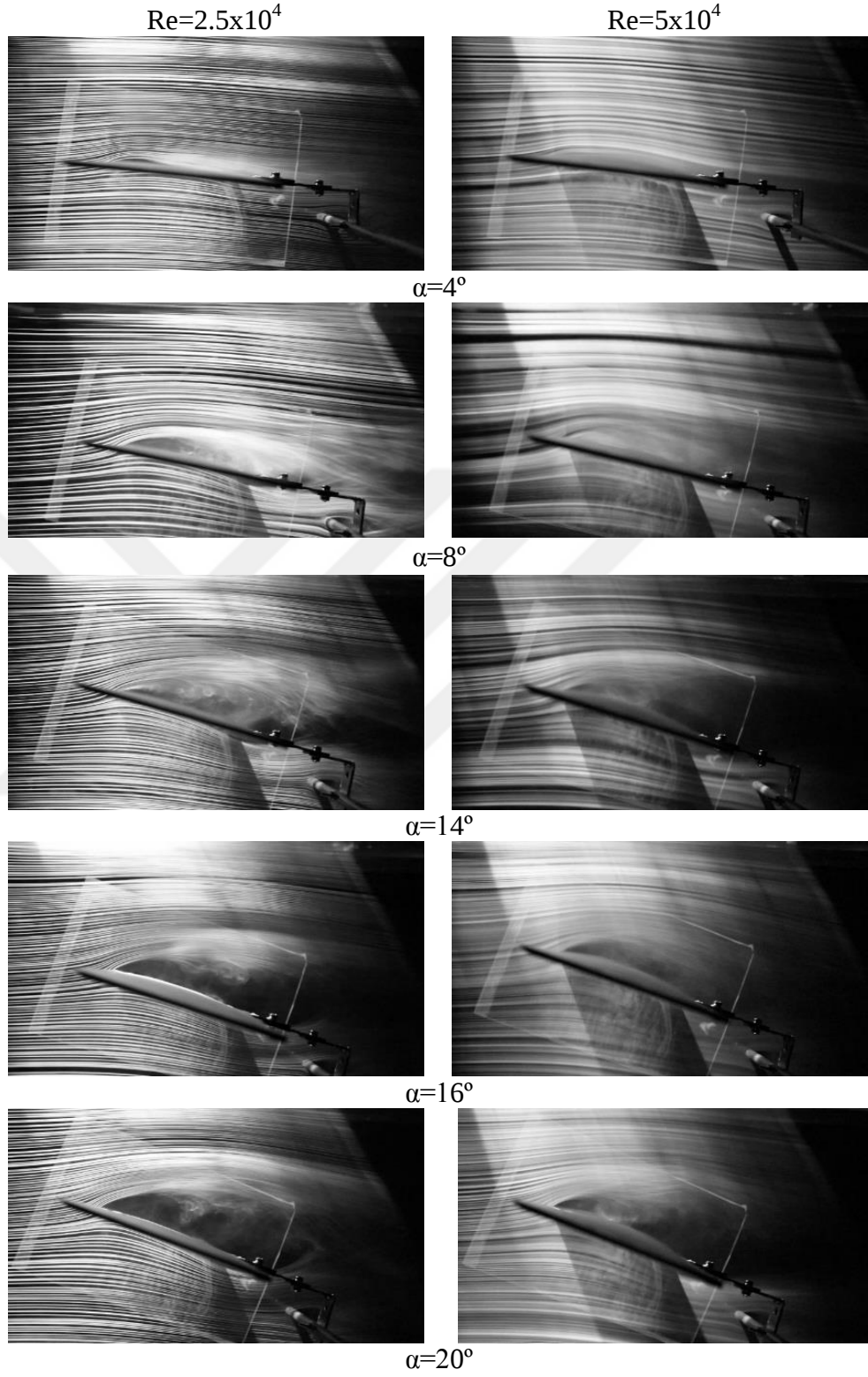
Üç farklı Re sayısında ve $y/s=0.4$ konumunda esnek membran kanat üzerindeki akış durumlarını karşılaştırmak için duman teli deneyi sonuçları Şekil 65-67'de verilmiştir. $AR=1$ esnek membran kanat için (Şekil 65) düşük hücum açılarında tüm Re sayılarında hücum kenarına yakın küçük LSB (kısa kabarcık) gözlemlenirken hücum açısının artması ile kabarcığın boyu uzamıştır. Orta büyüklükteki hücum açılarında, kısa LSB $Re=2.5 \times 10^4$ ve $Re=5 \times 10^4$ 'de uzun LSB'ye dönüşmüş ve bu dönüşüm viskoz etkilerden dolayı $Re=2.5 \times 10^4$ 'de daha erken meydana gelmiştir. Ek olarak, LSB'nin boyutu $Re=2.5 \times 10^4$ 'de $Re=5.0 \times 10^4$ 'ye kıyasla daha büyüktür. Hücum kenarına yakın LSB'den dolayı oluşan girdaplar kanadın firar kenarına doğru ilerlemiş ve kanat yüzeyine temas eden girdaplar membranda titreşimlere yol açmıştır. $Re=7.5 \times 10^4$ 'de, LSB oluşumu daha yüksek açılarda gözlemlenmiştir ve LSB'nin boyutu atalet kuvvetlerinin artması ile daha küçük olmuştur. $AR=3$ esnek kanat sonuçları incelendiğinde (Şekil 66), $\alpha=2^\circ$ ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de kısa kabarcık oluşmuş ve bu LSB $AR=1$ esnek kanat üzerinde oluşandan daha büyüktür ve bu kabarcık $\alpha=6^\circ$ 'de doğrudan uzun kabarcığa dönüşmüştür. Sonrasında LSB $\alpha=12^\circ$ 'de patlamış ve tüm esnek membran kanat yüzeyini etkilemiştir. Daha sonra, kanat üzerinde ayrılmış akış dikkat çekmeye başlamıştır. $Re=5 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ 'de LSB'nin daha küçük olduğu görülmüştür ve bu LSB atalet kuvvetlerinin etkisinden dolayı daha sonra patlamıştır. 2D esnek membran kanadın akış görselleştirme fotoğraflarına bakıldığında (Şekil 67) ise, $AR=3$ esnek membran kanat ile benzer durumlar gözlemlenmiştir.



Şekil 65. AR=1 esnek membran kanat için farklı Re sayılarında $y/s=0.4$ konumunda elde edilen duman deneyi fotoğrafları

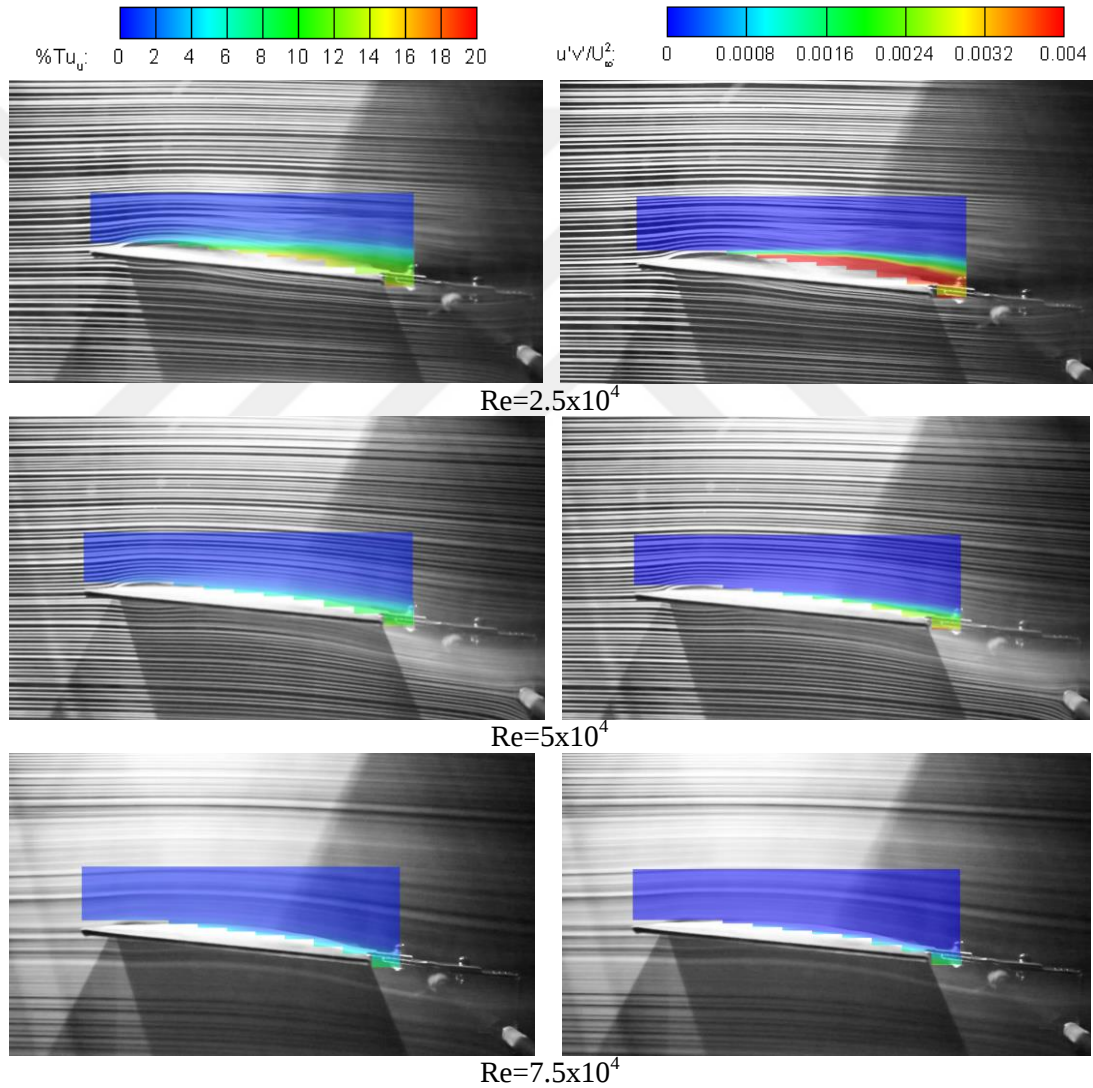


Şekil 66. AR=3 esnek membran kanat için farklı Re sayılarında $y/s=0.4$ konumunda elde edilen duman deneyi fotoğrafları



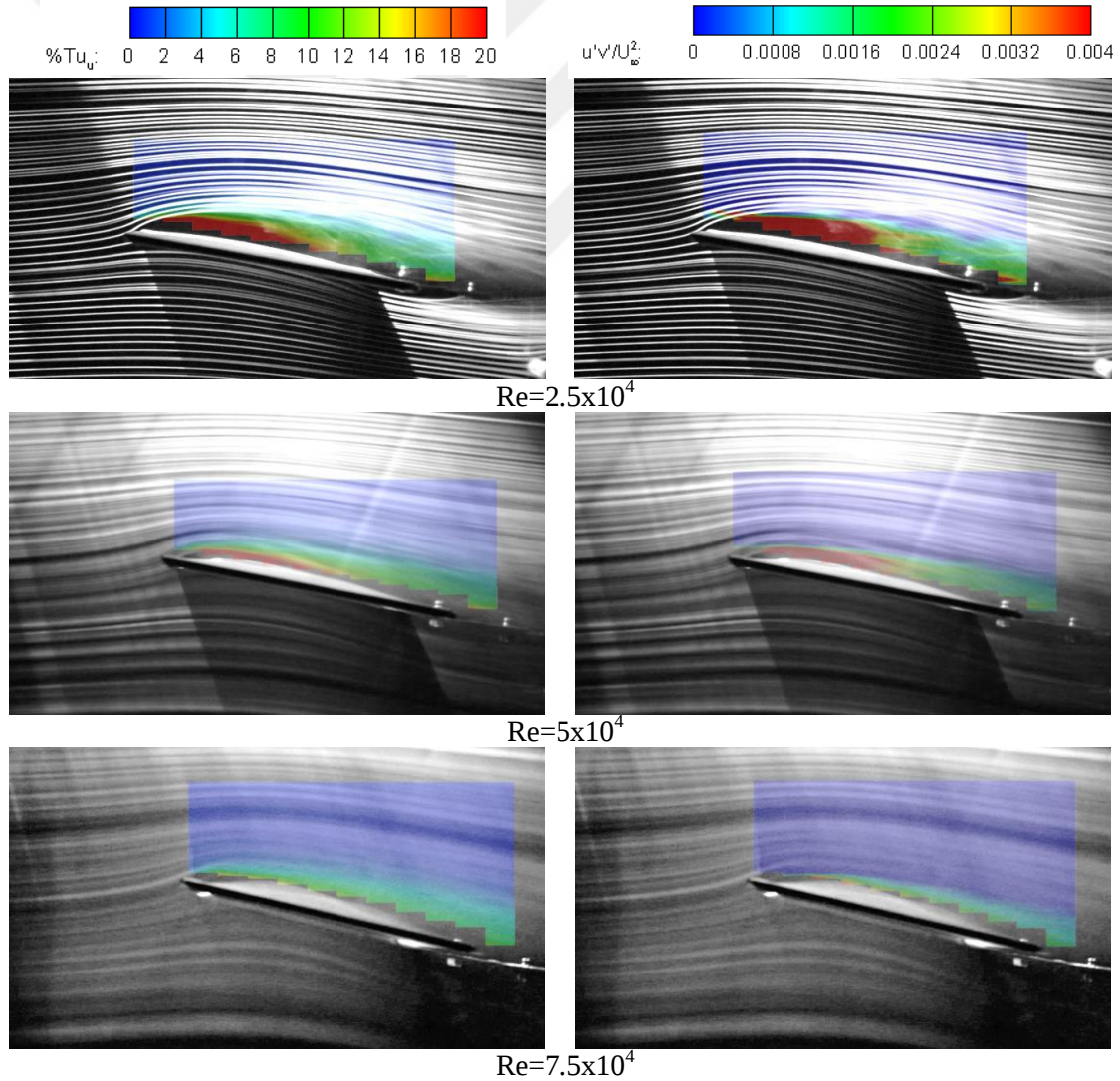
Şekil 67. 2D esnek membran kanat için farklı Re sayılarında $y/s=0.4$ konumunda elde edilen duman deneyi fotoğrafları

Farkı en/boy oranlarına sahip esnek membran kanatların $y/s=0.4$ konumunda $\alpha=8^\circ$ için $Re=2.5 \times 10^4$, $Re=5 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ 'deki türbülans yoğunluğu (Tu) ve Re gerilme dağılım sonuçlarının duman teli deney sonuçları ile birleştirilmiş hali Şekil 68-70 arasında verilmiştir. Bu bütünleşik fotoğraflar incelendiğinde, türbülans ve çalkantılar hücum kenarı ayrılmaları ve LSB ile yükselmiş ve artış bölgesi tüm esnek membran kanatlar için Re sayısının artması ile daralmıştır. Ek olarak, AR'nin artması ile LSB'nin daha etkili olmasından dolayı türbülanslı bölgeler de genişlemiştir.

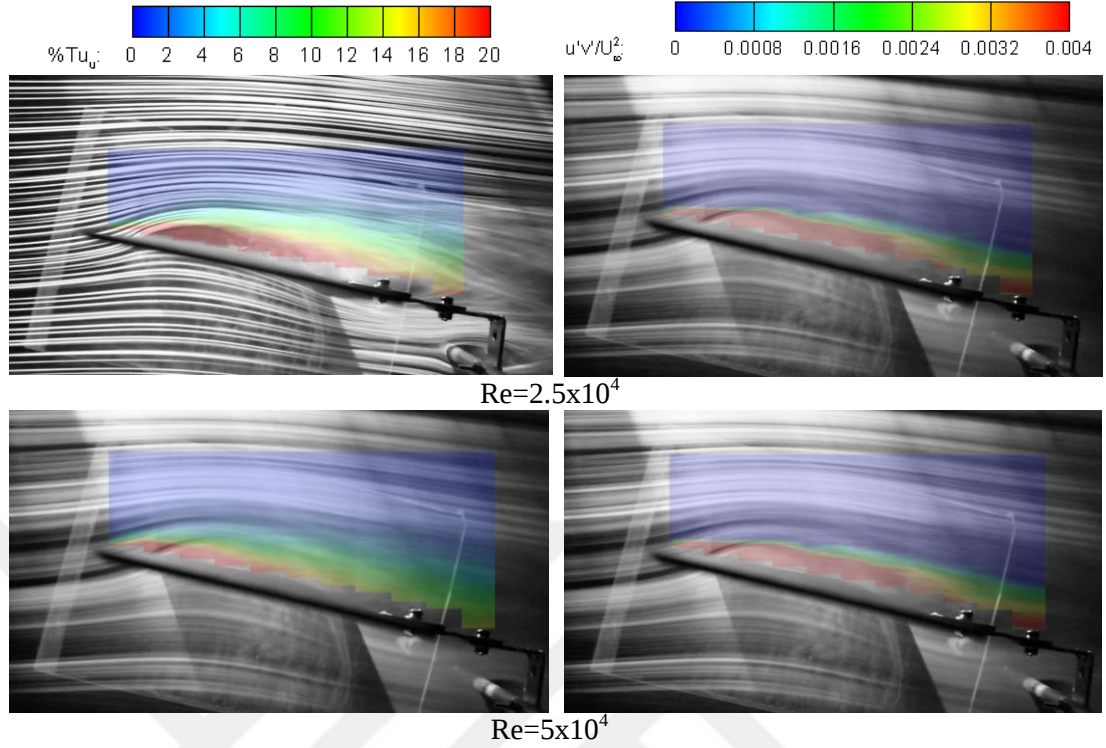


Şekil 68. AR=1 esnek membran kanadın $\alpha=8^\circ$ hücum açısında türbülans yoğunluğu ve Re gerilme dağılımı a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$ c) $Re=7.5 \times 10^4$

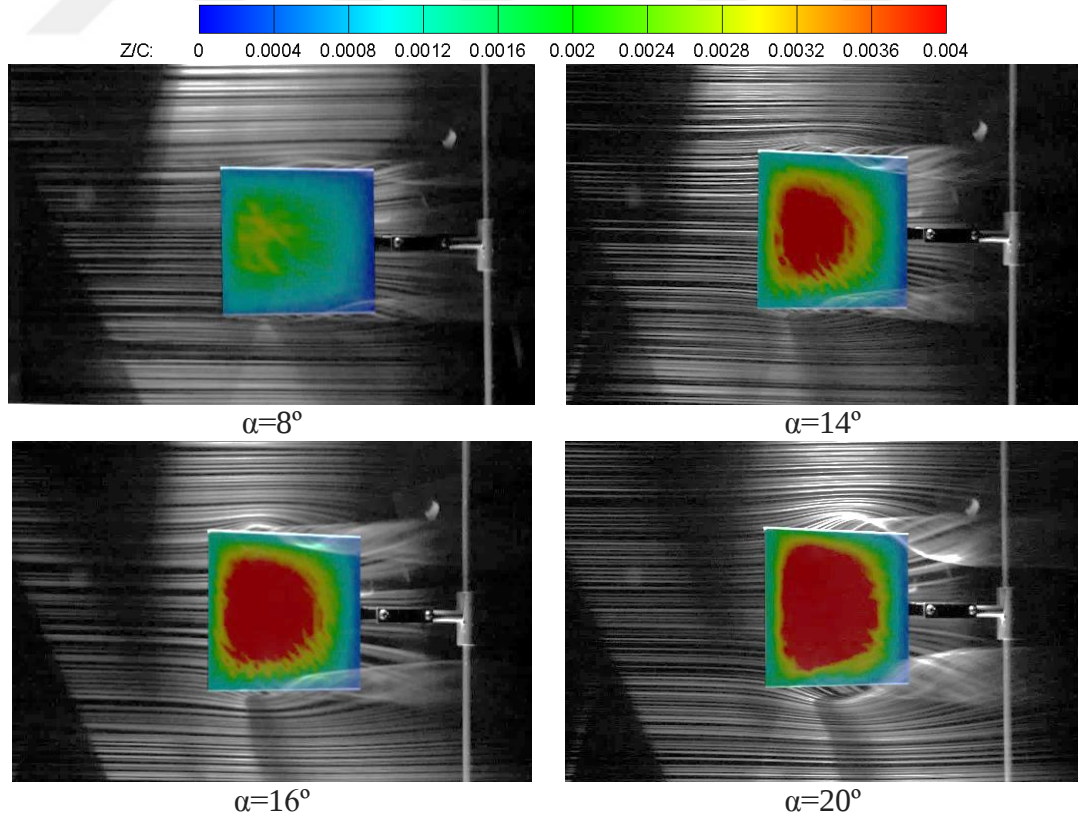
Ayrıca, $AR=1$ kanatta her iki uçtan gelen uç girdapları kanat firar kenarından sonra birleşmekte (Şekil 71) ve dönmeli akış basıncın düşmesine sebep olmaktadır. Bu basınç düşüşü ile esnek kanadın üzerindeki akış firar kenarına doğru hızlanmakta ve dolayısıyla ataletinin artışı ile kanat üzerine tutunmaktadır. Ayrıca kanat üzerinde oluşan deformasyon dağılımı uç girdaplarının etkisinden dolayı form değiştirmiş ve uç girdapların etkisinden dolayı maksimum deformasyon bölgesinin firar kenarına doğru azaldığı ve hücum kenarına doğru hareket ettiği Şekil 71’de görülmektedir. $AR=3$ esnek membran kanatta hem deformasyon sonuçlarını hem de uç girdap durumunu değerlendirebilmek için, Şekil 72 hazırlanmıştır. Bu şekilden görüldüğü üzere, deformasyon ve uç girdap oluşumu hücum açısının artması ile artış göstermiştir.



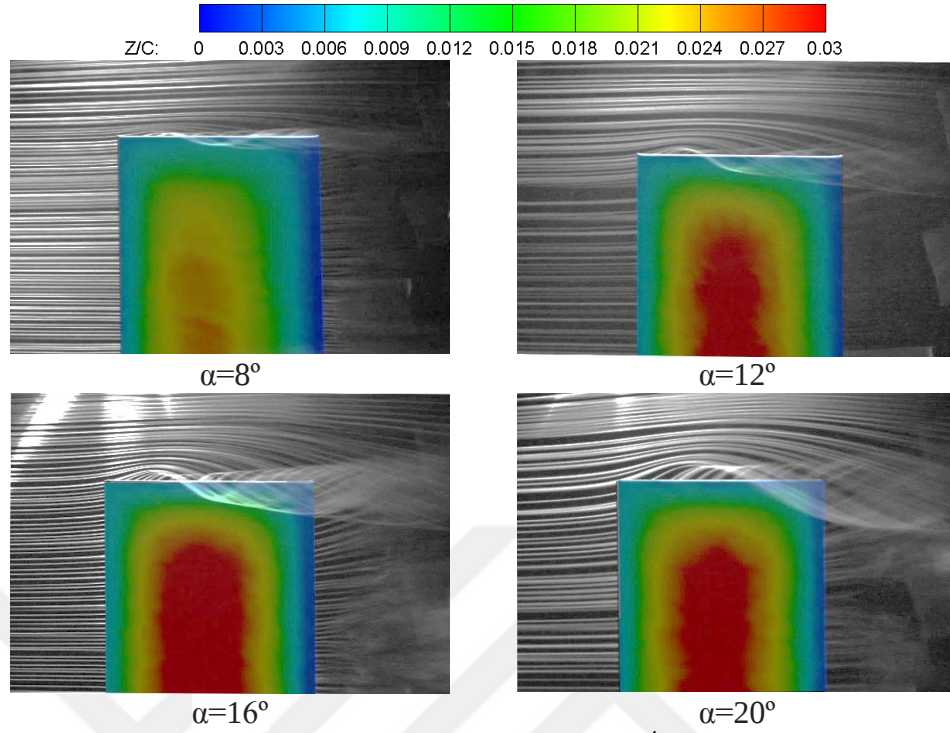
Şekil 69. $AR=3$ esnek membran kanadın $\alpha=8^\circ$ hücum açısında türbülans yoğunluğu ve Re gerilme dağılımı a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) $Re=5 \times 10^4$ c) $Re=7.5 \times 10^4$



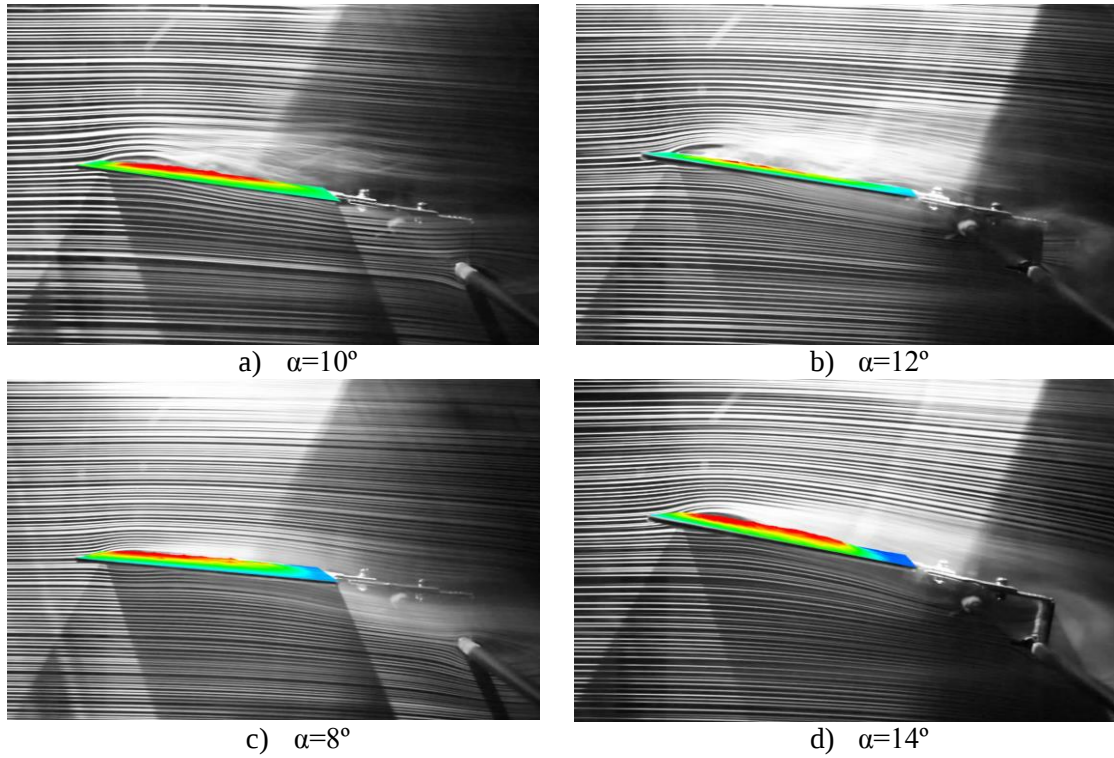
Şekil 70. 2D esnek membran kanadın $\alpha=8^\circ$ hücum açısında türbülans yoğunluğu ve Re gerilme dağılımı Re=2.5x10⁴, b) Re=5x10⁴



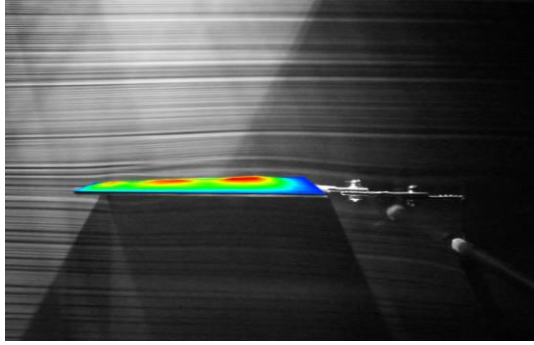
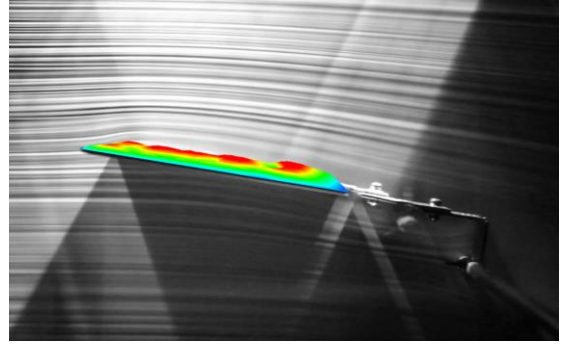
Şekil 71. AR=1 esnek membran kanat için Re=2.5x10⁴'de deformasyon ve duman deneyi sonuçlarının birleştirilmiş hali



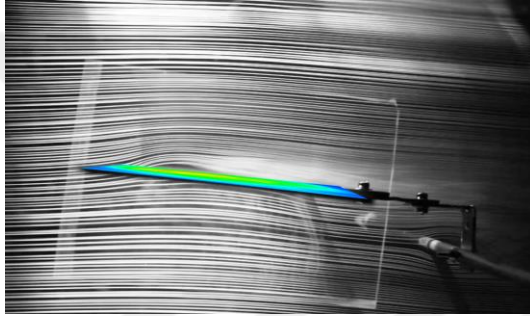
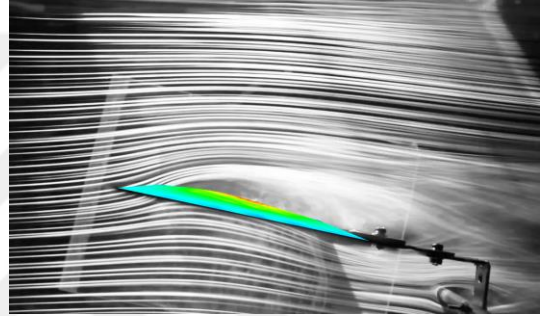
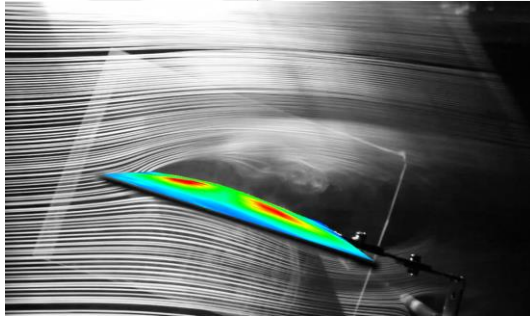
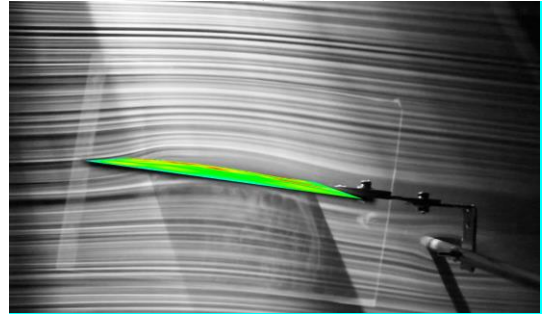
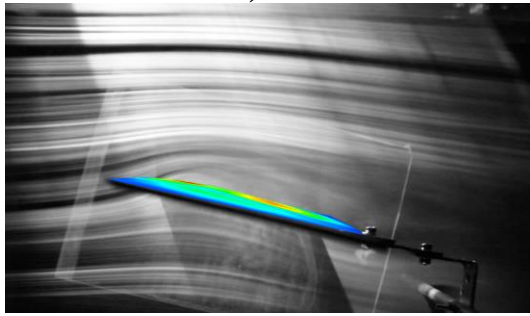
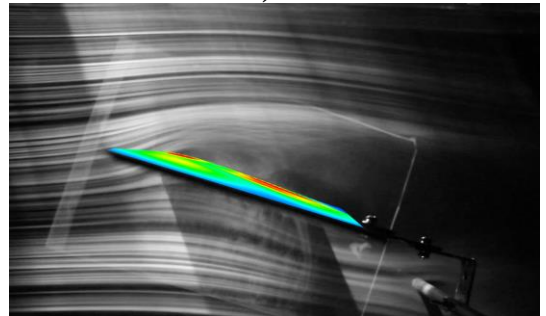
Şekil 72. AR=3 esnek membran kanat için $Re=2.5 \times 10^4$ 'de deformasyon ve duman deneyi sonuçlarının birleştirilmiş hali



Şekil 73. AR=3 esnek membran kanadın standart sapma ve duman deneyi sonuçlarının birleştirilmiş hali a-b) $Re=2.5 \times 10^4$ c-d) $Re=5 \times 10^4$ e-f) $Re=7.5 \times 10^4$

e) $\alpha=0^\circ$ f) $\alpha=12^\circ$

Şekil 73. Devamı

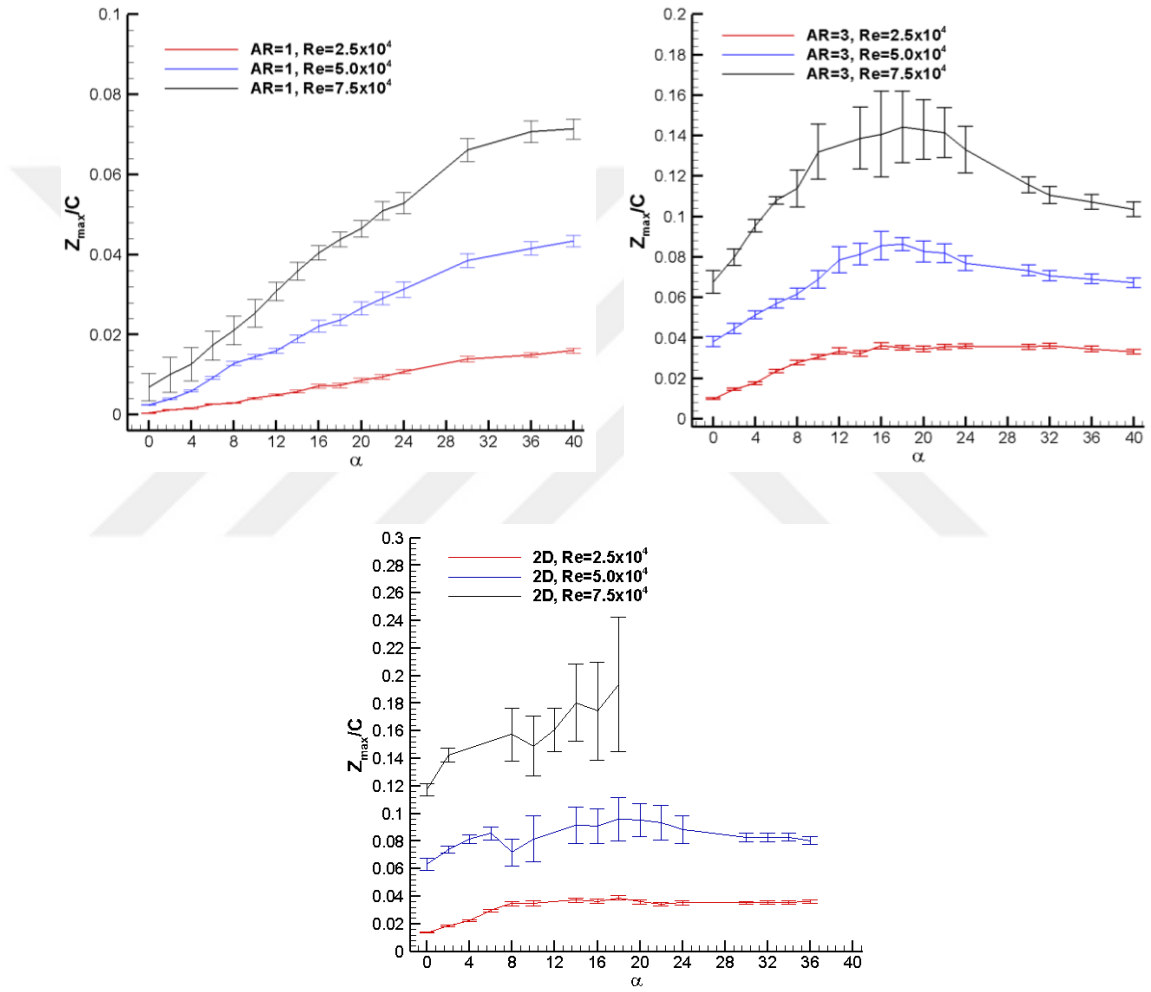
a) $\alpha=4^\circ$ b) $\alpha=8^\circ$ c) $\alpha=16^\circ$ d) $\alpha=4^\circ$ e) $\alpha=8^\circ$ f) $\alpha=14^\circ$

Şekil 74. 2D esnek membran kanadın standart sapma ve duman deneyi sonuçlarının birleştirilmiş hali a-b-c) $Re=2.5 \times 10^4$ d-e-f) $Re=5 \times 10^4$

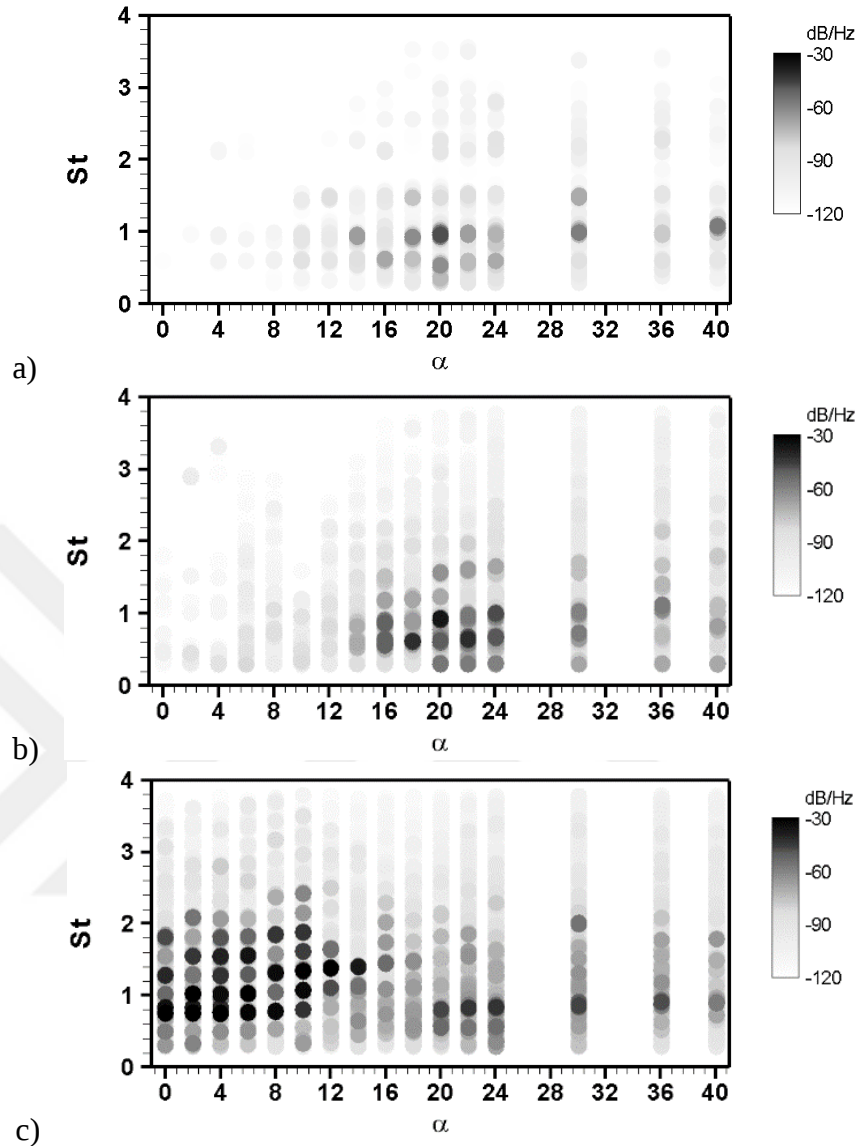
Şekil 73 ve Şekil 74'te, farklı Re sayılarında akışkan-yapı etkileşimini gösterebilmek için standart sapma ve duman teli deneyi sonuçlarının birleştirilerek tek grafik yapılmıştır. Bu bütünleşik resimlerden görüldüğü gibi, esnek membran kanat üzerinde oluşan LSB membranın yapısını etkilemekte ve bu etki membran kanat üzerinde titreşimlere yol açmaktadır. Titreşim ve titreşim modu LSB'nin boyutuna dolayısı ile Re sayısına bağlıdır. Re sayısı arttığı zaman, atalet kuvvetleri daha etkili olmuş ve LSB küçülmüştür. Küçük LSB, küçük girdaplara sebep olmuş ve küçük girdaplar membran yüzeyi ile daha fazla temas kurmasından ötürü esnek kanatta daha fazla titreşime ve daha çok titreşim moduna sebep olmuştur. Fakat LSB daha düşük hücum açılarında baskın olduğu için daha titreşimli ve yüksek titreşim modları gözlemlenmiştir. Uzun kabarcık veya akış ayrılması ile titreşim modu tekli ya da ikili olarak sabitlenmiştir.

AR=1, AR=3 ve 2D esnek membran kanat için, farklı Re sayıları için boyutsuz maksimum deformasyonun dağılımı Şekil 75'te verilmiştir. Şekil 75'teki eğri üzerine boyutsuz maksimum deformasyonun standart sapma değeri hata çubuğu olarak grafiğe eklenmiştir. AR=1 esnek kanatta Re sayısının artması ile kanatta meydana gelen titreşim artmış böylelikle standart sapma değeri artmıştır. AR=3 esnek kanatta LSB daha etkili olduğu için standart sapma değerini gösteren hata çubuklarının daha geniş olduğu görülmektedir. Re sayısının $Re=7.5 \times 10^4$ 'ye çıkarılması ile standart sapma değeri hata çubuğunda büyüme meydana gelmiştir, bunun nedeni artan Re sayısı LSB'nin küçülerek esnek membranın daha çok titreşmesine yol açmıştır. Hem Re sayısı hem de en/boy oranının artması ile maksimum membran deformasyonu Demir ve Genç [52], Rojratsirikul ve arkadaşları [29-31] ve Genç'in [34] çalışmalarında elde edildiği gibi artmış ve titreşimler daha belirgin hale gelmiştir. Özellikle maksimum membran deformasyonun standart sapması LSB'nin orta dereceli hücum açılarında baskın olması ile artmıştır. Bu durum farklı Re sayılarında sırasıyla AR=1, AR=3 ve 2D esnek membran kanat için deformasyonların spektral bantlarını gösteren Şekil 76, Şekil 77 ve Şekil 78'de görülebilmektedir. Bu grafikleri elde etmek için, DIC sisteminde esnek kanat üzerinde oluşan deformasyonun maksimum olduğu bölge üzerinde bir nokta seçilir ve bu noktadaki değerler alınır. Alınan bu değerlerin MATLAB yardımı ile spektral analizi yapılır, bu analiz sonucu çizilen güç yoğunluğu değerleri desibel boyutuna taşınır ve bant olarak çizdirilir (örneğin Şekil 77b). Güç yoğunluğu değerlerinin maksimum olduğu yerler spektral bantlarında daha koyu renkli olup tepe

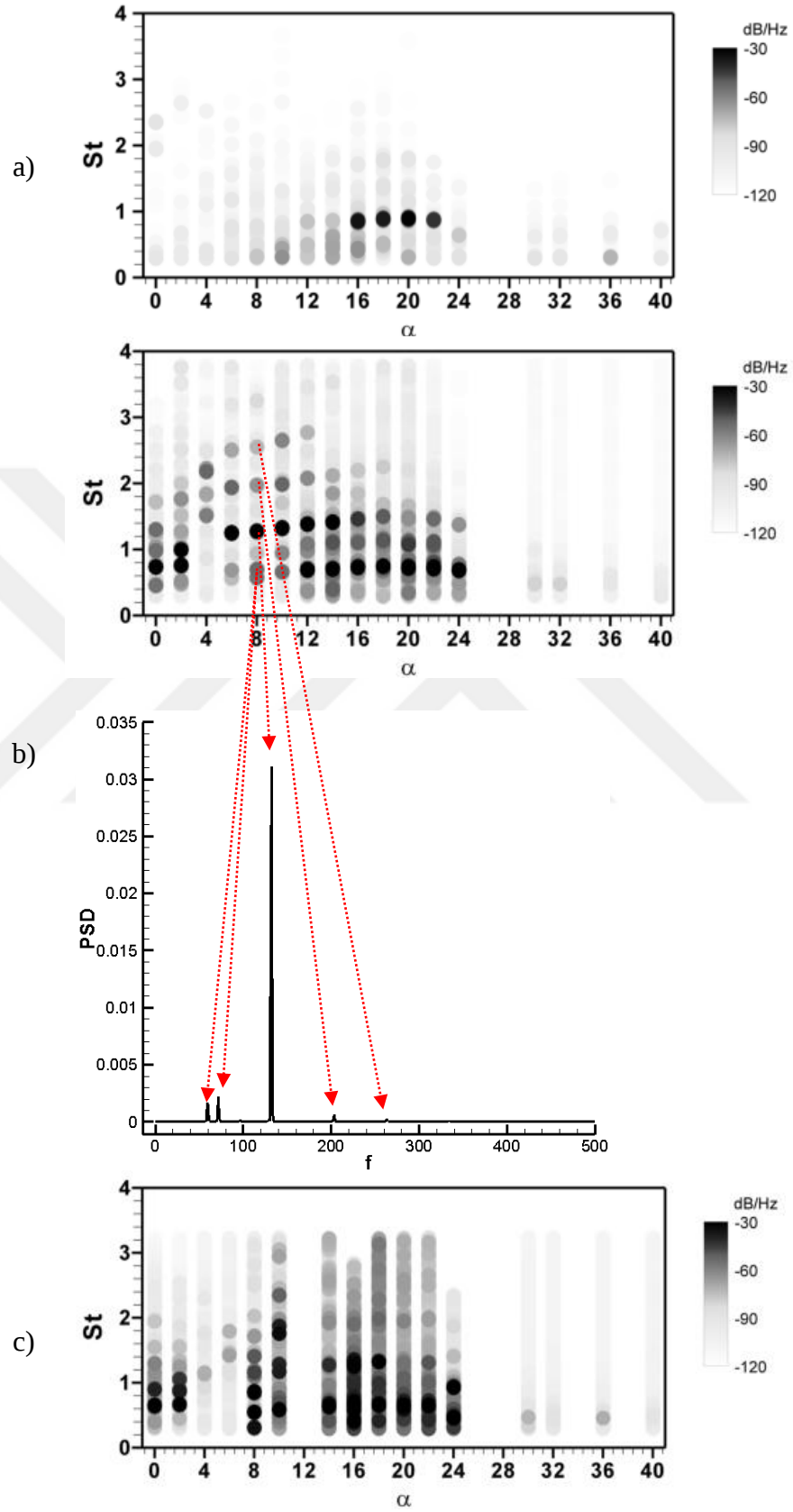
noktalarını ifade etmektedir. Demir ve Genç [52], Rojratsirikul ve arkadaşları [29-31] ve Genç'in [34] çalışmalarında sonuçlandığı gibi, LSB membran titreşimlerini arttırmış, LSB'nin baskın olması ile ikincil koyu bantlar (*secondary darker band*) görülmüştür. Ek olarak, orta dereceli hücum açılarında, hücum açısına karşı maksimum deformasyon eğrisinin lineerliği LSB'den dolayı değişmiştir.



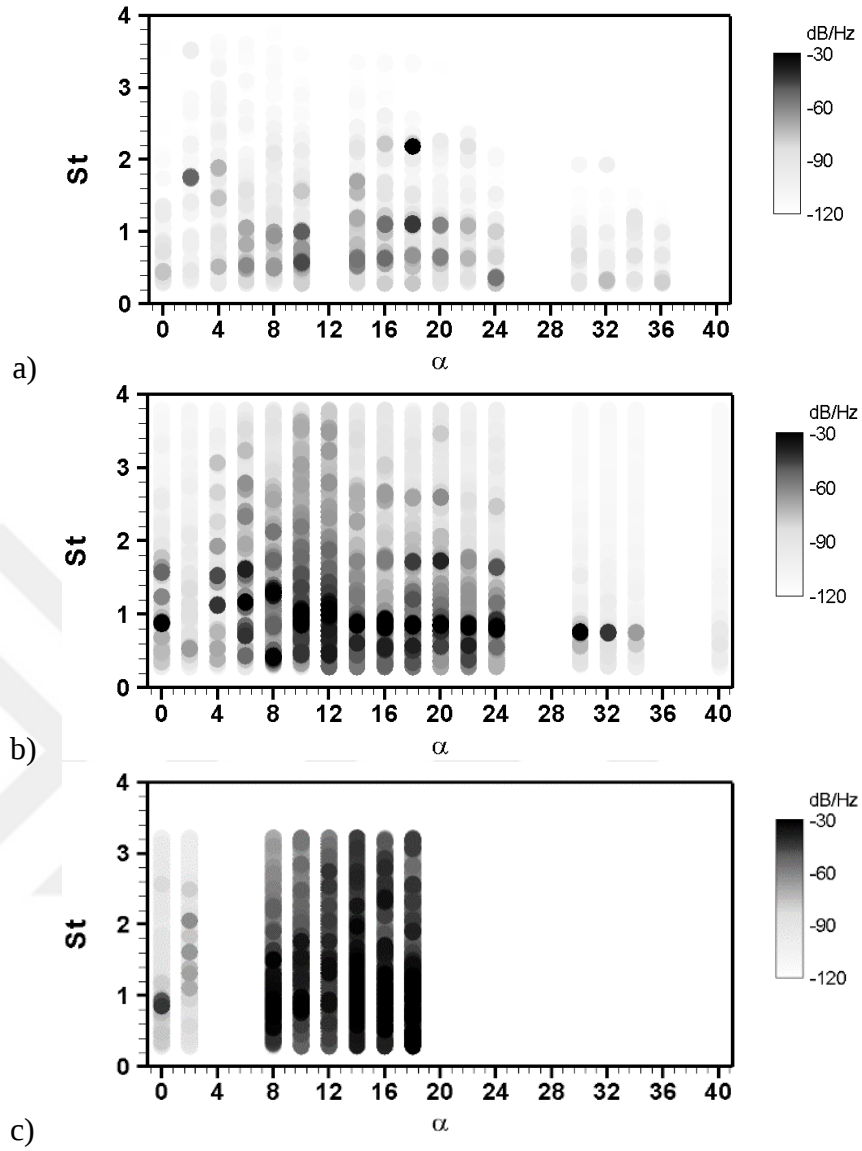
Şekil 75. Farklı hücum açılarında ve Re sayılarında esnek membran kanatlar için ortalama maksimum boyutsuz deformasyonlar ve standart sapmaların hata çubukları



Şekil 76. AR=1 esnek kanat için membran titreşiminin güç spektral dağılımlarının hücum açısına göre dağılımları $Re=2.5 \times 10^4$, b) 5×10^4 , c) 7.5×10^4



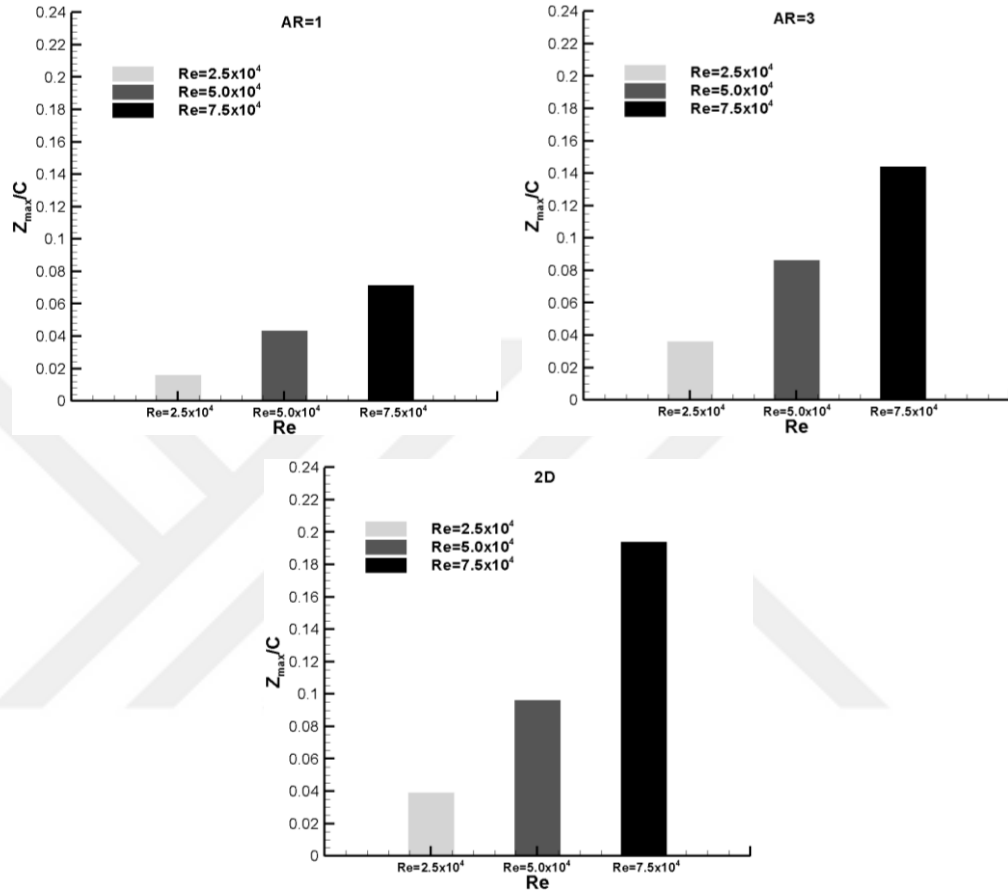
Şekil 77. AR=3esnek kanat için membran titreşiminin güç spektral dağılımlarının hücum açısına göre dağılımları a) $Re=2.5 \times 10^4$ [52], b) 5×10^4 [52], c) 7.5×10^4



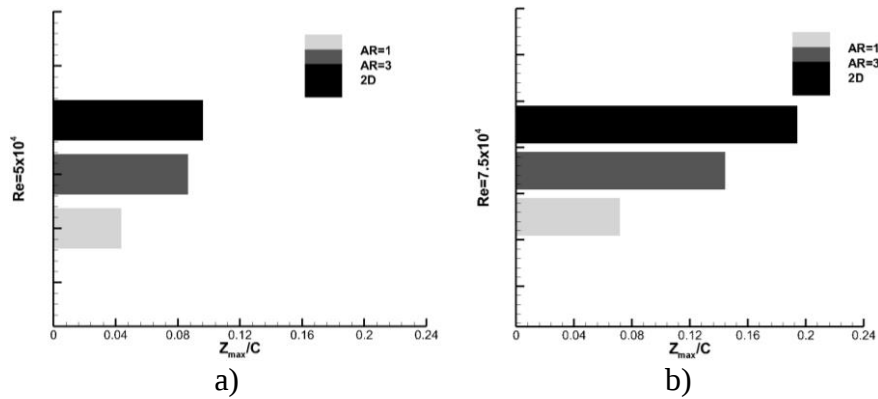
Şekil 78. 2D esnek kanat için membran titreşiminin güç spektral dağılımlarının hücum açısına göre dağılımları a) $Re=2.5 \times 10^4$, b) 5×10^4 , c) 7.5×10^4

Şekil 79’da, $AR=1$, $AR=3$ ve 2D esnek kanat için boyutsuzlaştırılmış maksimum deformasyon değerinin farklı Re sayılarındaki dağılım bandı gösterilmiştir. Şekil 80’de ise farklı en/boy oranlarında $Re=5 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ için boyutsuzlaştırılmış maksimum deformasyon değerinin dağılımı verilmiştir. Re sayısının artması ile esnek kanat üzerinde meydana gelen deformasyonun arttığı bantlardan belirgin bir şekilde görülmektedir. En-boy oranının $AR=1$ ’den $AR=3$ ’e artırılması ile maksimum deformasyon değerinin yükseldiği, aynı zamanda 2D esnek kanatta ise deformasyon değeri en yüksek değere ulaşmıştır. Bunun nedeni en/boy oranı artışı ile uç girdaplarının

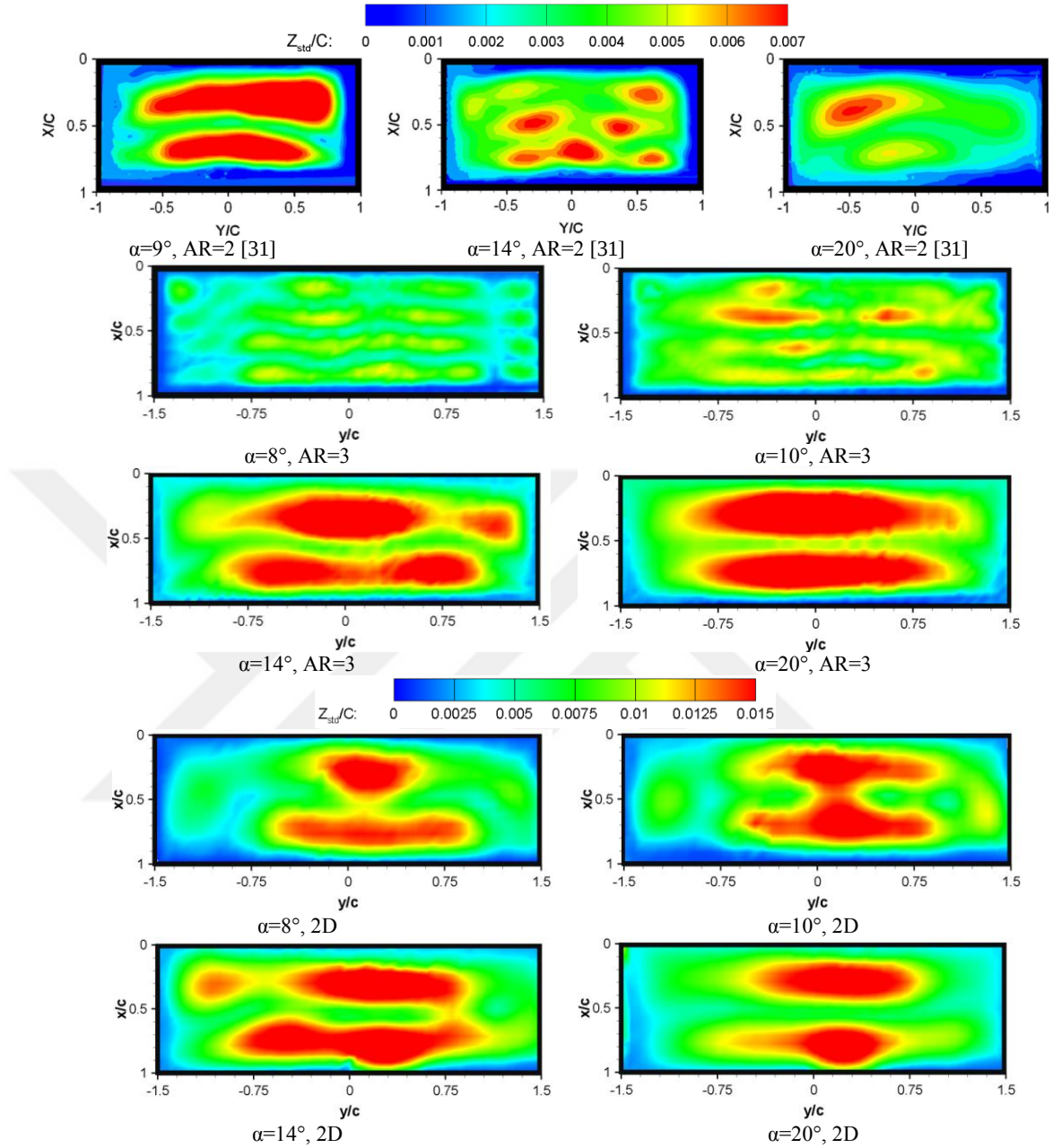
kanat üzerindeki akışa etkisinin azalması ve LSB'nin daha baskın olması ile LSB kaynaklı girdapların kanada çarpması ve kanadı deformasyona uğratmasıdır.



Şekil 79. Boyutsuzlaştırılmış maksimum deformasyon değerinin farklı Re sayılarındaki dağılım bandı



Şekil 80. Boyutsuzlaştırılmış maksimum deformasyon değerinin farklı en/boy oranlarında a) $Re=5 \times 10^4$ ve b) $Re=7.5 \times 10^4$ için dağılımı

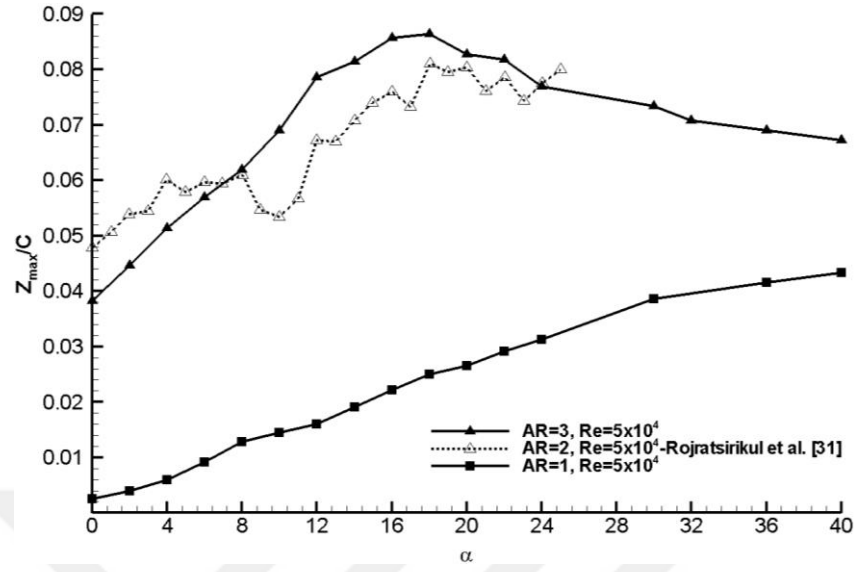


Şekil 81. Farklı hücum açılarında ve $Re=5 \times 10^4$ de AR=2 [31] ve AR=3 esnek kanat üzerinde oluşan deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma değerlerinin karşılaştırılması [52]

En/boy oranının değişimi ile deformasyon ve esnek kanat titreşimini incelemek için Şekil 81 kıyaslamalı olarak verilmiştir. AR=3 esnek kanat üzerinde LSB daha etkili olduğu için, titreşim modları daha düşük en/boy oranına sahip membran kanatlarla karşılaştırıldığında daha belirgin bir şekilde oluşmuştur. Standart sapma sonuçları Rojratsirikul ve arkadaşlarının [31] $Re=5 \times 10^4$ için yapmış oldukları çalışma ile

kıyaslandığında, düşük hücum açılarında $AR=2$ membran kanatta kort boyunca ikili titreşim modu gözlemlenirken $AR=3$ membran kanatta dörtlü titreşim modu gözlemlenmiştir. Hücum açısı arttıkça, büyüyen uç girdapları LSB boyutunun azalmasına ve akıştaki karmaşıklık artmasına neden olmuştur ve böylelikle $AR=2$ esnek kanattaki titreşim modları artmıştır. Şekil 70’de titreşim modları 14° hücum açısından LSB’nin büyümesinden dolayı $AR=2$ membran kanattaki titreşim modundan daha az oluşmuştur. Hücum açısı stol açısına ulaştığında, hem $AR=2$ hem de $AR=3$ membran kanat için ikili titreşim modu gözlemlenmiştir. İz bölgesine doğru yayılan daha büyük hücum kenarı girdapları ve uç girdapları ayrılmış akış koşullarında membran kanat üzerindeki deformasyona herhangi bir etki yapmamıştır. Şekil 71’de görüldüğü üzere, maksimum deformasyon değişimi 8° ve 18° hücum açısı aralığında LSB vasıtasıyla azalmıştır. Daha sonra, hücum açısının artması ile etkili olan uç girdaplarından dolayı $AR=2$ membran kanat için artmıştır. Öte yandan, $AR=1$ esnek kanatta $Re=7.5 \times 10^4$ ’de elde edilen standart sapma sonuçlarına bakıldığında $\alpha=0^\circ$ iken kanadın kordu boyunca üç modlu titreşim görülmekteyken $\alpha=2^\circ$ olduğunda dört modlu titreşim oluşmuştur. $\alpha=6^\circ-12^\circ$ arasında dört modlu titreşim gözlemlenirken hücum sayısının daha da artırılması ile kanat üzerinde tek modlu titreşimin baskın olmuştur. Bu modların oluşma sebebi ayrılma kabarcığıdır. Çünkü ayrılma kabarcığından dolayı kopan girdaplar kanat üzerinde farklı modlarda titreşimlerin oluşmasına neden olur.

Şekil 82’de ayrıca, $AR=3$ esnek kanat için, LSB etkisinden dolayı düşük hücum açılarında, yüksek titreşim modları ve düşük maksimum deformasyon gözlemlenmiştir [52] ve LSB’nin büyümesinden dolayı 14° ’de $AR=3$ membran kanatta oluşan titreşim modu sayısı $AR=2$ membran kanattakinden daha azdır. Hücum açısı tutunma kaybı açısına ulaştığı zaman, hem $AR=2$ [31] hem de $AR=3$ membran kanatta ikili titreşim modu gözlemlenmiştir, ayrıca iz bölgesine doğru yayılan hücum kenarı ve uç girdapları ayrılmış akış durumunda membran kanadın deformasyonuna bir etkisi yoktur. $AR=1$ esnek kanatta uç girdaplarının daha etkin olmasından dolayı deformasyon değerleri $AR=2$ ve $AR=3$ esnek kanada nazaran daha azdır. AR ’nin artması ile uç girdaplarının kanat üzerindeki etkisi azalmış kanatta meydana gelen deformasyon artmıştır. $AR=2$ esnek kanatta özellikle düşük hücum açılarında LSB etkin olmadığı için deformasyon değeri $AR=1$ ve $AR=3$ ’e kıyasla daha fazladır. $\alpha=8^\circ$ ’den sonra LSB etkili olmaya başlamış ve maksimum deformasyon değerinde azalma meydana gelmiştir.



Şekil 82. AR=2 [31] ve AR=3 esnek kanat için $Re=5 \times 10^4$ 'de boyutsuzlaştırılmış maksimum zaman ortalamalı yer değiştirmenin hücum açısına göre değişiminin karşılaştırılması [52]

3. BÖLÜM

ESNEK KANAT SAYISAL ÇALIŞMALARI

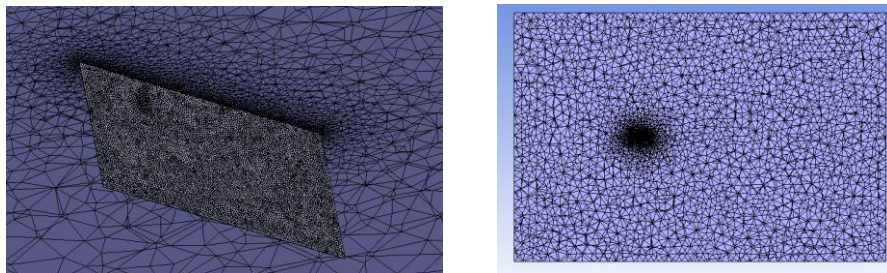
3.1. Giriş

Akışkanlar mekaniği göz önüne alındığında mühendislik sistemlerinin analizi ya rüzgar tüneli kullanılarak üzerinde çalışılan model ile deneylerin gerçekleştirilmesi ya da ilgili diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözülmesi ile yapılabilir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) bu diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözülmesi ile ilgilenmektedir. Sonlu hacimler, sonlu farklar ve sonlu elemanlar metotları kullanılması ile deneylerinin yapılması zor olan karmaşık mühendislik problemleri bilgisayar vasıtasıyla hızlı ve etkili olarak çözülmektedir. HAD sayesinde bir tasarım gerçekleştirilmeden önce bilgisayar benzeşimi vasıtasıyla elde edilen veriler yardımı ile performans yükseltme metotları ve ilgili tasarıma yönelik birtakım problemlerin deney aşamasına gelmeden önce kolaylıkla çözülebilmektedir. Ayrıca, HAD ile yapılan çalışmaların araştırmacılar tarafından tercih edilmesinin nedeni deneysel çalışmalara nazaran daha az maliyet gerektirmesinden kaynaklanmaktadır. Ek olarak, HAD ile yapılan çalışmalarda ilgili problem parametrelerini değiştirmek deneysel çalışmalara göre daha kolaydır ve daha az zaman almaktadır. Normalde bir kanat profili için sayısal modelleme yapıldığı zaman kanat profilinin şeklinin ve konumunun değişmediği düşünülerek rijit olduğu varsayılmaktadır. Öte yandan, akışkan ile temas eden kanat profilinde şekil değişikliğinin (deformasyon) söz konusu olduğu durumlarda akışkan-yapı etkileşim (FSI-*fluid structure interaction*) analizlerine ihtiyaç duyulmaktadır. FSI problemlerinde hem akışkan hareketlerini hem de akışkana maruz kalan yapı şekil değişimlerini birlikte çözmek ve etkileşimlerini sürekli güncellemek gerekmektedir. Çünkü yapıda meydana gelen deformasyon akış için sınır şartlarının da değişmesine neden olmaktadır. FSI analizleri ile alakalı literatür incelendiği zaman bu analiz yönteminin çok eskiye dayanmadığı, çalışmaların sınırlı olduğu ve yeni yeni

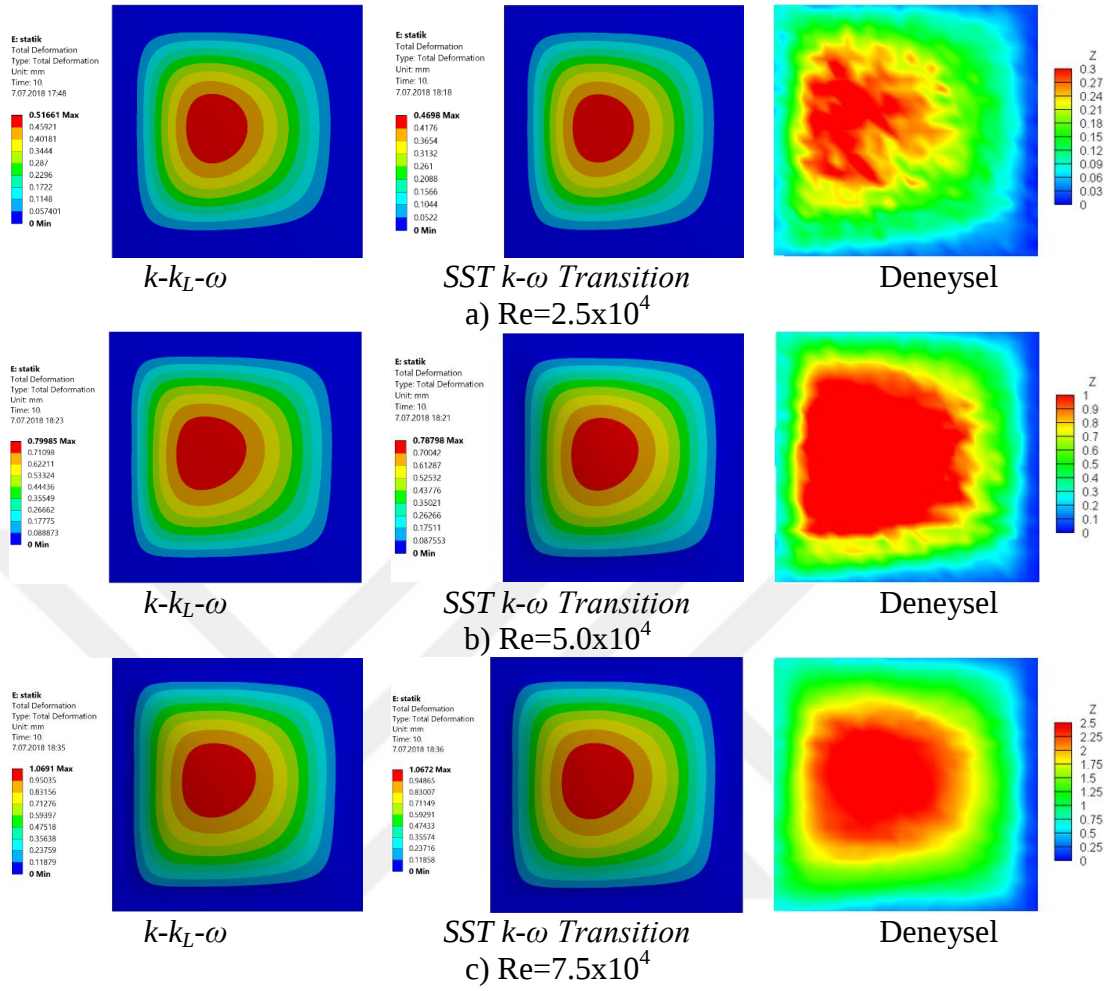
yaygınlaştığı görülmektedir. Bu bölümde ilk olarak HAD yazılımlarının en bilindiklerinden biri olan ANSYS paket programı daha sonra ise açık kaynak kod kullanılarak yapılan FSI analizi ile alakalı sayısal çalışmalar sunulmaktadır.

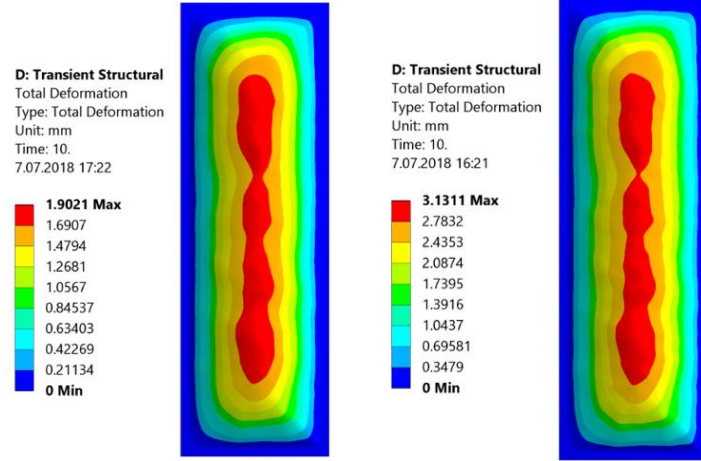
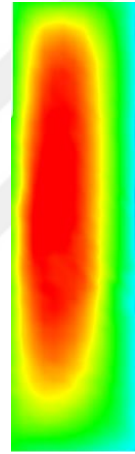
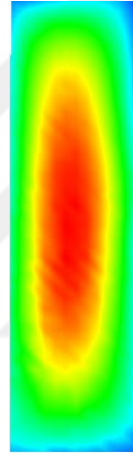
3.2. ANSYS HAD Yazılımı ile Sayısal Çalışmalar

Farklı en-boy oranlarındaki esnek kanat üzerinde oluşan kararsız akış durumlarının aerodinamik performans üzerindeki etkisini incelemek için FSI modülü kullanılarak ANSYS ve FLUENT birlikte çalıştırılıp sayısal modelleme yapılmıştır. İlk olarak AR=1 esnek kanat için modelleme yapılmıştır. Yapılan modellemede AR=1 esnek kanadın $\alpha=8^\circ$ hücum açısında ve $Re=2.5 \times 10^4$, $Re=5.0 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ olmak üzere 3 farklı Re sayısında $k-k_L-\omega$ ve $SST k-\omega$ türbülansa geçiş benzeşim modeli kullanılarak çözüm yapılmıştır. Oluşturulan modellemenin meshi 1,289,042 tetrahedral hücre ve 234,570 düğüm noktası içermektedir. Çözümleme işlemi laboratuvarımızda bulunan yüksek özellikli server kullanılmasına rağmen akışkan-yapı etkileşimi söz konusu olduğu için haftalarca sürmektedir. Ek olarak, 2D esnek kanat için $\alpha=12^\circ$ 'de $k-k_L-\omega$ türbülansa geçiş benzeşim modeli kullanılarak $Re=2.5 \times 10^4$ ve $Re=5.0 \times 10^4$ için modelleme yapılmıştır. Şekil 84'te AR=1 esnek kanat için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde esnek kanat yüzeyinde meydana gelen deformasyonun sahip olduğu geometri deneysel sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Maksimum deformasyon bölgesi uç girdaplarından dolayı hücum kenarına daha yakındır. Şekil 85'te ise 2D esnek kanat için $\alpha=12^\circ$ 'de $Re=2.5 \times 10^4$ ve $Re=5.0 \times 10^4$ için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Şekil 86 ve Şekil 87'de 2D esnek kanat için $Re=2.5 \times 10^4$ ve $Re=5.0 \times 10^4$ için $\alpha=12^\circ$ 'de hız dağılım sonuçları ve duman teli görüntüleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde esnek kanat üzerine gelen akışın kanat üzerinde izlediği yol benzerlik göstermektedir.



Şekil 83. Modellemede kullanılan örnek ağ yapısı

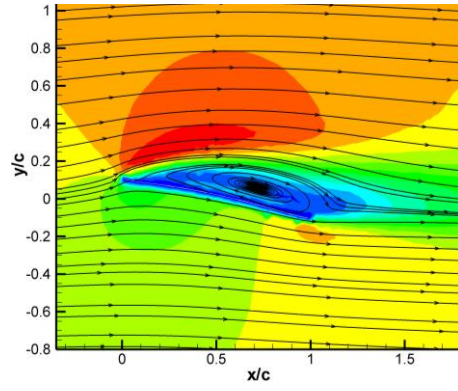


Sayısal, $k-k_L-\omega$ Sayısal, $k-k_L-\omega$ 

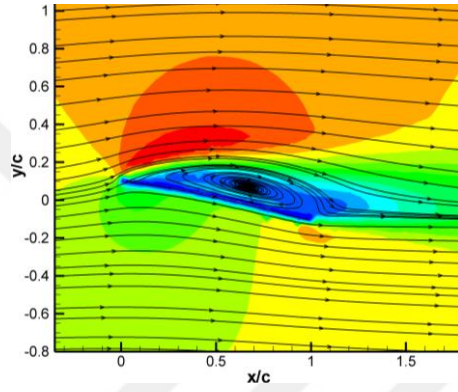
Deneysel

Deneysel

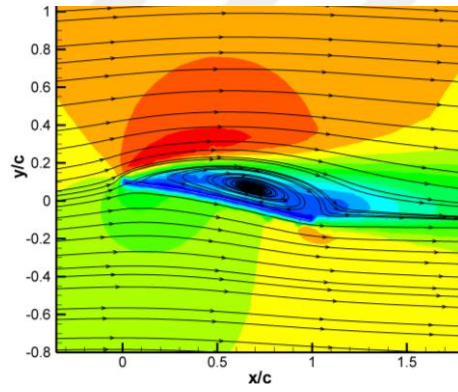
a) $Re=2.5 \times 10^4$ b) $Re=5.0 \times 10^4$ Şekil 85. 2D esnek kanat için $\alpha=12^\circ$ 'de deneysel ve sayısal sonuçlar



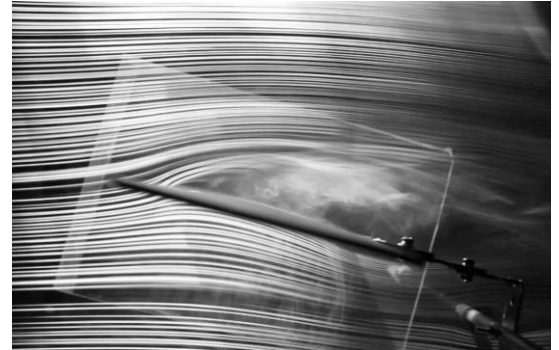
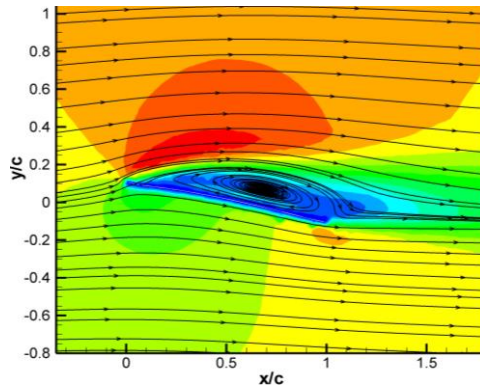
$t=0.25s$



$t=0.5s$

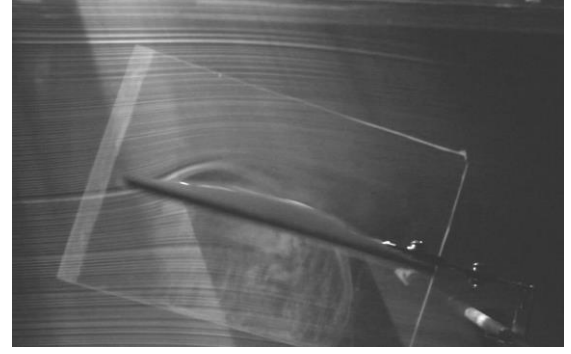
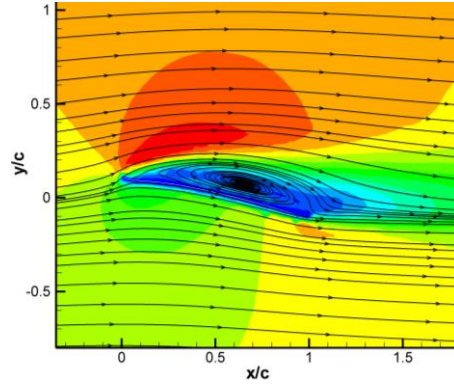


$t=0.75s$

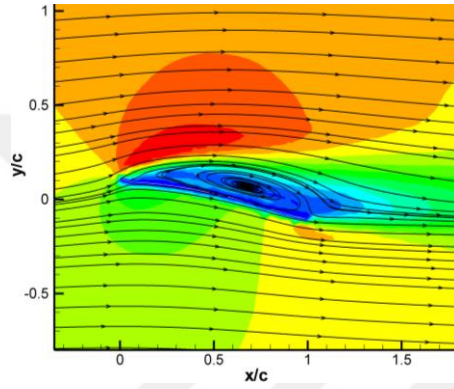


$t=1s$
 $\alpha=12^\circ$

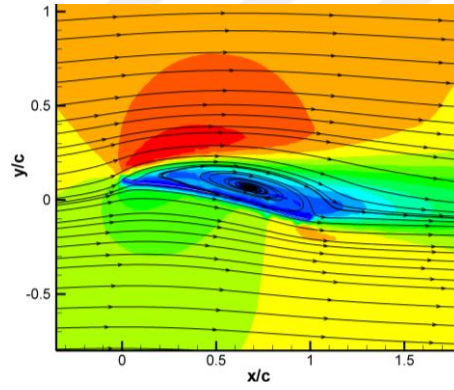
Şekil 86. 2D esnek kanadın $Re=2.5 \times 10^4$ için $k-k_L-\omega$ ve duman deneyi sonuçları



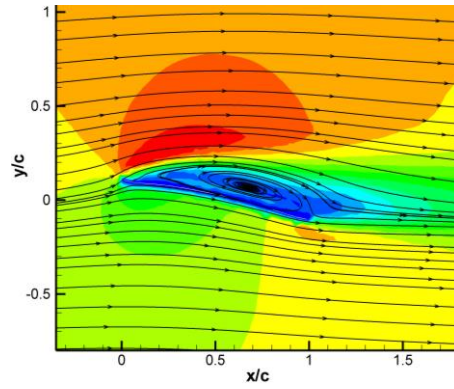
$t=0.25s$



$t=0.5s$



$t=0.75s$



$t=1s$
 $\alpha=12^\circ$

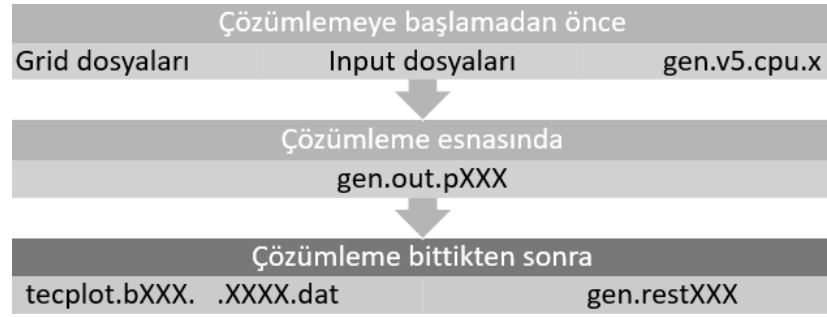
Şekil 87. 2D esnek kanadın $Re=5.0 \times 10^4$ için $k-k_L-\omega$ ve duman deneyi sonuçları

3.3. Açık Kaynak Kodu ile Sayısal Çalışmalar

Bu bölümde, önceki bölümlerde belirtilen esnek kanat üzerinde oluşan kararsız akış durumlarının aerodinamik performans üzerindeki etkisini ve akışkan yapı etkileşimlerinin (*fluid-structure interaction*) incelemek için yapılan deneysel çalışmalara ek olarak TÜBİTAK 2214/A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı kapsamında Amerika’da *Virginia Polytechnic Institute and State University* Makine Mühendisliği Bölümü’nde FSI modülü kullanılarak açık kaynak kodlu yazılım yardımı ile sayısal modelleme yapılmıştır. Sayısal modellemeye başlamadan önce;

- Linux/Unix
- Vim/Git
- Pointwise yazılım programlarının nasıl kullanıldığı öğrenilmiştir.

Sayısal modellemede kullanılan açık kod GenIDLEST (*Generalized Incompressible Direct and Large Eddy Simulation of Turbulence*) çeşitli mühendislik problemlerinin modellemesinde kullanılmakta olan FORTRAN’da yazılmış birbiri ile bağlantılı alt kodlardan oluşmaktadır. GenIDLEST’i çalıştırabilmek için LINUX işletim sistemi kullanılmaktadır. Sayısal modellemenin yapılacağı geometri ve ağ yapısı POINTWISE yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Geometri ve ağ yapısı hazırlandıktan sonra grid dosyaları export edilir ve çözüm için gereken diğer düzenlemelerin yapılabilmesi için Vim/Git yazılımı kullanılarak kod üzerinde istenilen ayarlamalar gerçekleştirilmiştir. Çözüm esnasında kullanılan GenIDLEST gen.out.pxxx isimli çıktılar vermektedir. Bu çıktılarda hız, Reynolds sayısı, yoğunluk vb. referans değer haricinde aşama aşama iterasyon sonucu elde edilen sonuçları göstermektedir. Çözüm bittikten sonra tecplot.bXXX..XXXX.dat isimli dosyalar elde edilir ve elde edilen bu sonuçların görselleştirilebilmesi için post-processing işlemleri TECPLOT paket programı kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 88. GenIDLEST aşamaları

GenIDLEST içerisindeki önemli giriş (input) dosyalarından bazıları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Input dosyaları

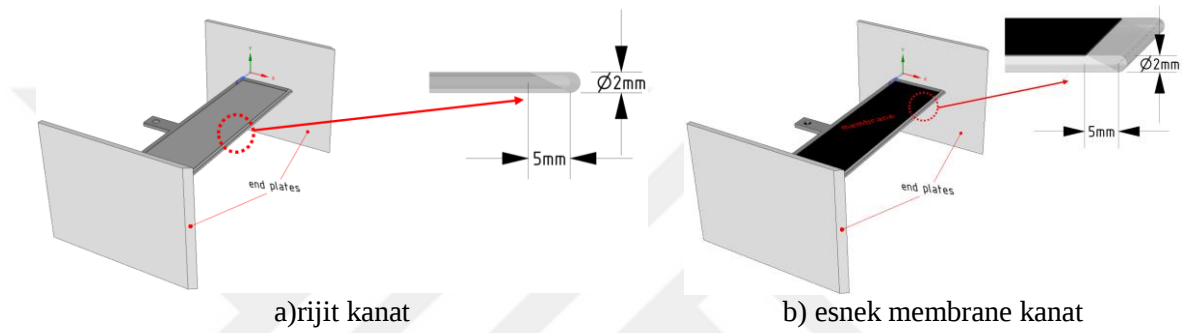
Dosya ismi	Kullanım amacı
<i>Gen.in</i>	Akış çözücü için ana giriş (input) dosyası
<i>Ref.in</i>	Kod değişkenlerini boyutsuzlaştırmak için kullanılan referans değerler için giriş dosyası
<i>Par.in</i>	Akış alanında parçacıklar varsa kullanılan dosya
<i>Ibm.in</i>	Daldırılmış sınır yöntemi (<i>IBM-Immersed boundary method</i>) kullanılacaksa
<i>Structure.in</i>	Akışkan yapı etkileşimi için yapısal modül kullanılacağı zaman

3.3.1. Rijit Kanat ve Esnek Membran Kanat

Deneysel çalışmada kullanılan esnek membran kanadın üretimi için Şekil 90’da gösterilen 0.2 mm kalınlığında kauçuk malzeme (black latex rubber sheet-Elastisite modülü, $E=2.2$ MPa, yoğunluk, $\rho_m=1\text{g/cm}^3$ kullanılmıştır. Sayısal modellemenin yapılabilmesi için öncelikle Pointwise V18.0R3 paket programı kullanılarak akış alanı oluşturulmuştur. Akış alanı oluşturulurken daha önce yapılan deneysel çalışmada kullanılan rüzgâr tünelinin test odası birebir oluşturulmuştur. Akış alanının sahip olduğu boyutlar kanat kort uzunluğu referans alınarak boyutsuz hale getirilerek oluşturulmuştur.

İlk olarak sayısal modellemenin yapılacağı kanat olarak rijit kanat ele alınmıştır. Daha sonra esnek membran kanat için modelleme gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümleme

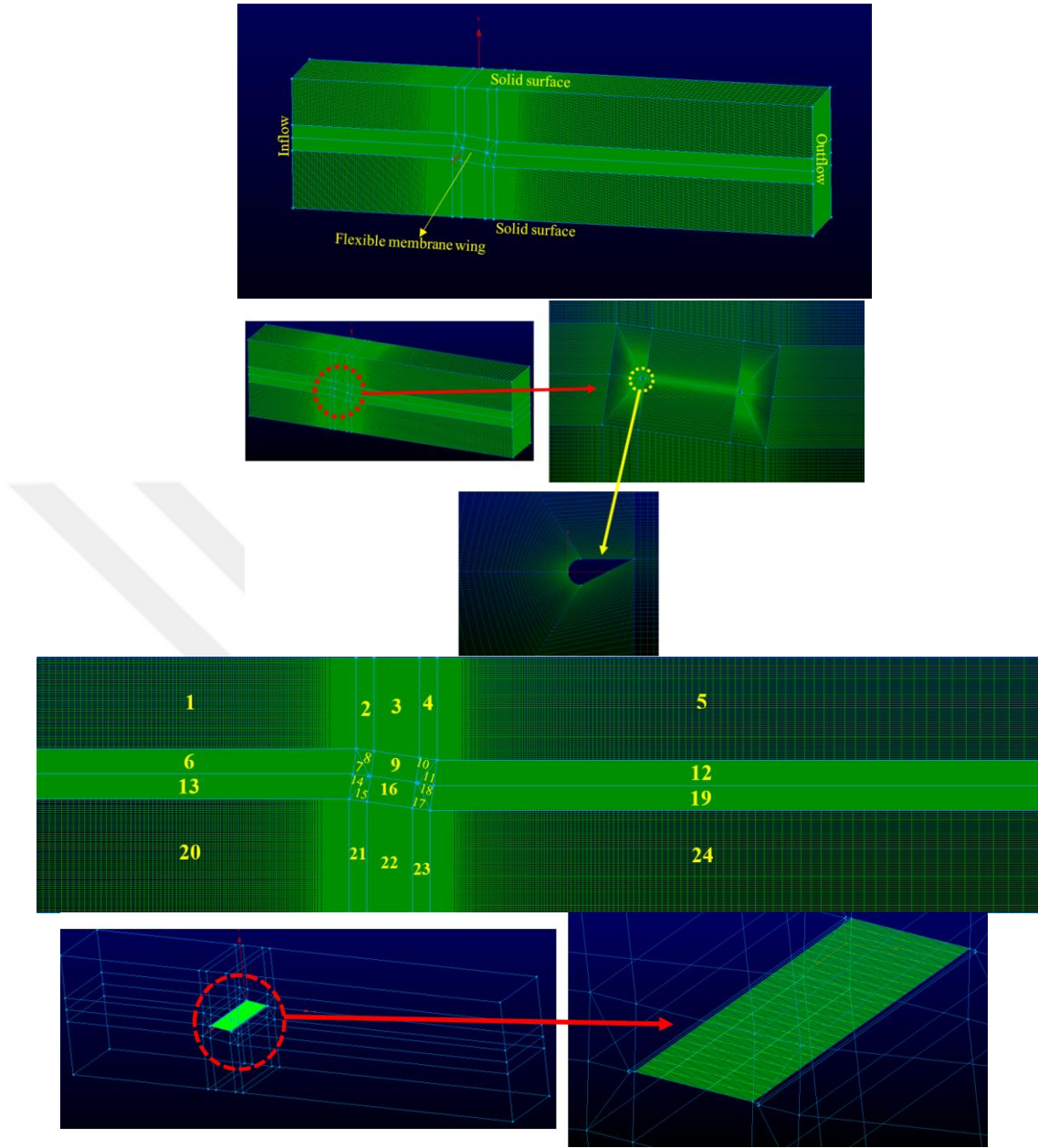
sabit Reynolds sayısında ($Re=2.5 \times 10^4$) ve değişen hücüm açılarında ($0-8^\circ$) gerçekleştirilmiştir. Toplamda 24 blok ve 4,147,200 hücreden oluşan akış alanının sınır koşulları; inflow, outflow ve solid surface ve wall'dan oluşmaktadır. Modelleme yapılırken rijit kanat için ilgili kısım solid surface olarak tanımlanırken, esnek membran kanat için esnekliği sağlayan membran kısmın geometrisi grid olarak membrane_grid.dat dosyasına aktarılmıştır.



Şekil 89. Sayısal modellemede kullanılan kanatların kesitsel görünüşleri

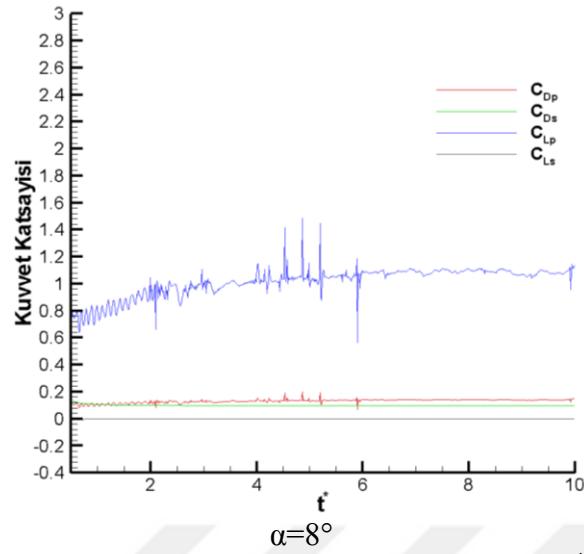


Şekil 90. Membran malzeme ve deneysel çalışmada kullanılan esnek kanat

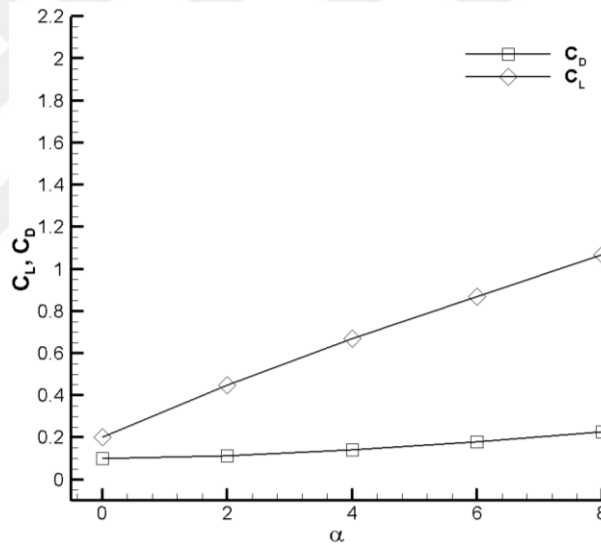


Şekil 91. Sayısal modellemede kullanılan akış alanı ve alt bölgeleri

Şekil 92’de, rijit kanat için $\alpha=8^\circ$ ve $Re=2.5 \times 10^4$ ’de aerodinamik kuvvet katsayılarının anlık değişimi örnek olarak verilmiştir. Öte yandan, Şekil 93’te rijit kanat için sayısal modelleme sonucu elde edilen zaman ortalamalı aerodinamik kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişim grafiği verilmiştir. Hücum açısının artması ile taşıma kuvveti katsayısındaki artış belirgin bir şekilde görülmektedir.

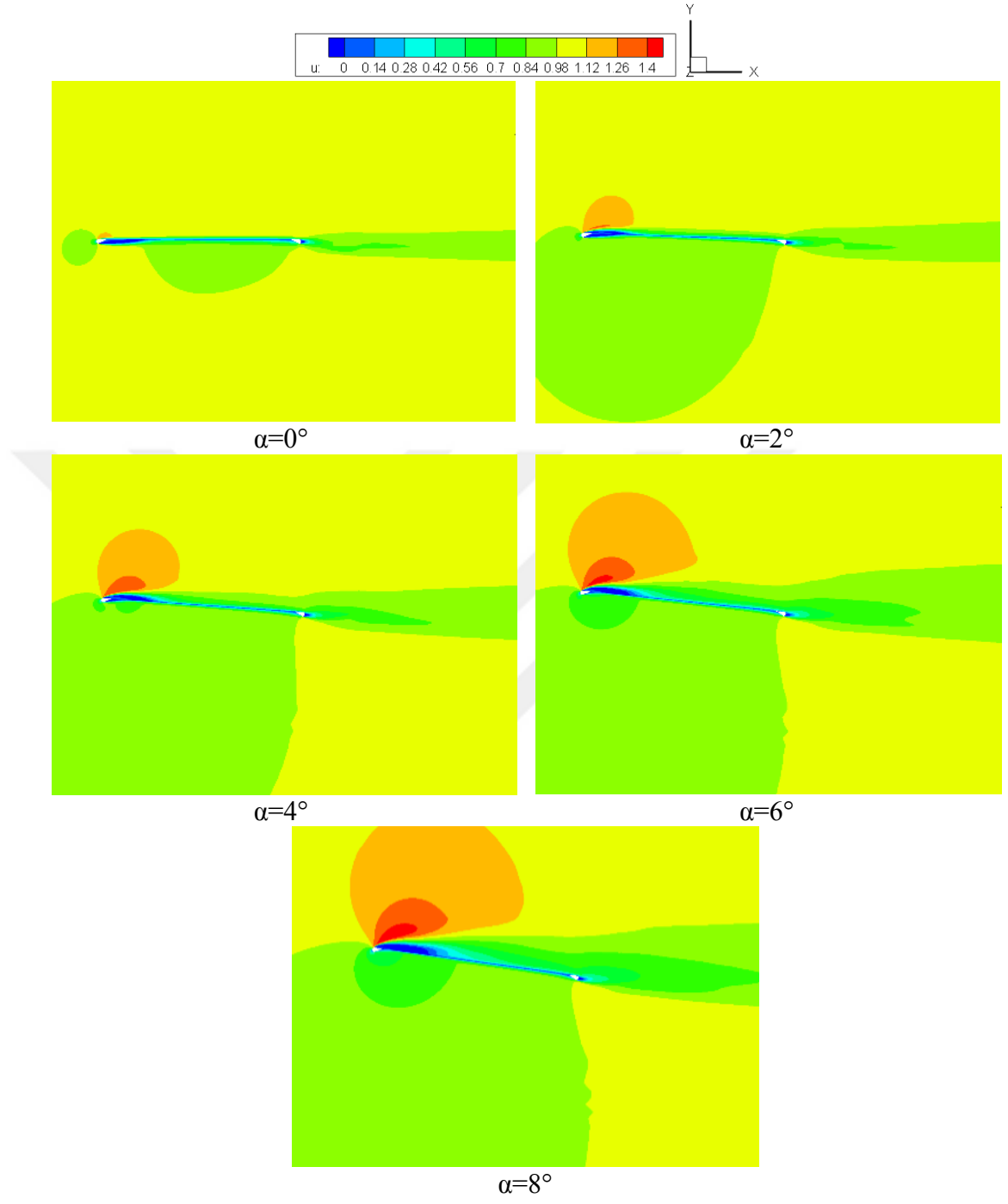


Şekil 92. Rijit kanadın aerodinamik katsayılarının $Re=2.5 \times 10^4$ 'de anlık değişimi

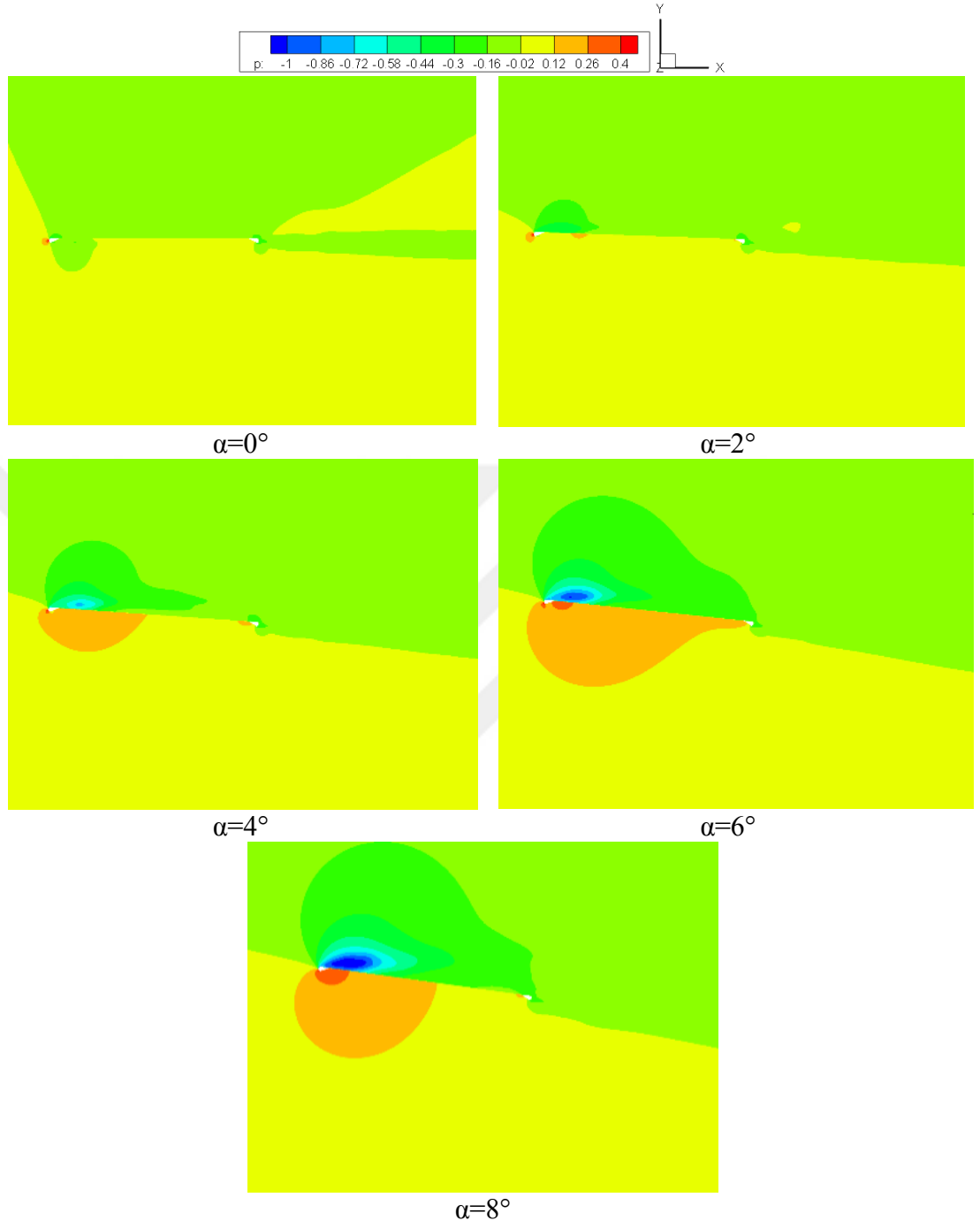


Şekil 93. $Re=2.5 \times 10^4$ için kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimi

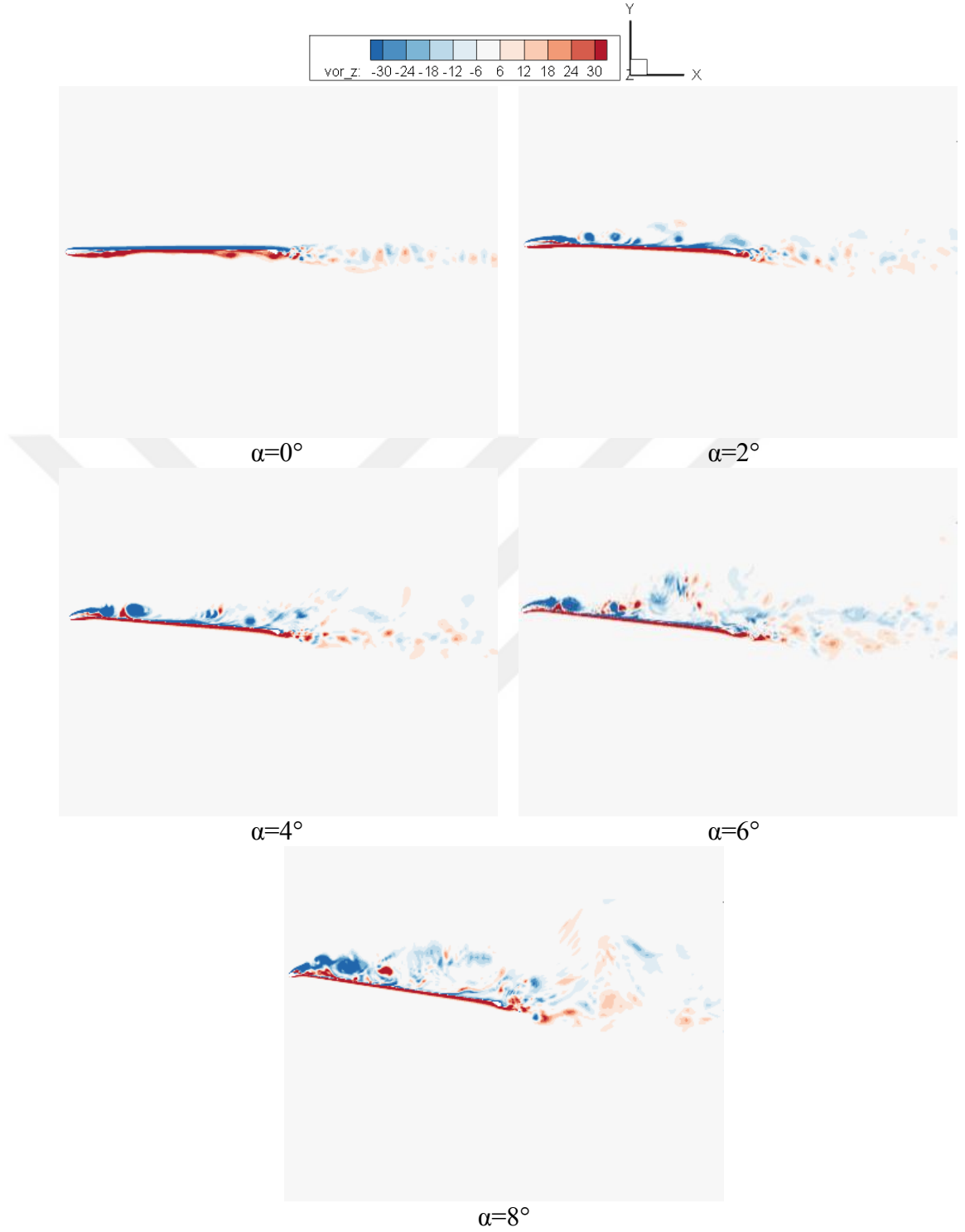
Şekil 94, 95 ve 96'da rijit kanadın sayısal modellemesinden elde edilen değişen hücum açıları için ortalama hız, basınç dağılımları ve girdap dağılımları verilmiştir. Hız dağılım sonuçlarına bakıldığında, hücum açısının artması ile rijit kanatta hücum kenarı ayrılmaları başlamış ve kanat firarına doğru ilerlemiştir. Basınç dağılım sonuçlarına bakıldığında, artan hücum açısı rijit kanadın altı ile üstü arasında basınç farkının artmasına sebep olmuştur. Kanat altında daha yüksek basınç olduğu göze çarpmaktadır. Bu da kaldırmanın artmasını sağlamaktadır. Ek olarak, girdap dağılımında, rijit kanattan saat yönünde kopan girdaplar mavi renkte, tersi yönünde kopan girdaplar ise kırmızı renkli olarak dikkat çekmektedir. Hücum kenarından kopan girdapların firar kenarından kopan girdaplarla birleştiği göze çarpmaktadır.



Şekil 94. Rijit kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de ortalama hız dağılımı



Şekil 95. Rijit kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de ortalama basınç dağılımı



Şekil 96. Rijit kanadın farklı hücum açılarında ve $Re=2.5 \times 10^4$ 'de girdap dağılımı

3.3.2. Akışkan-Yapı Etkileşimi (Fluid-Structure Interaction-FSI)

Akışkan-yapı etkileşim problemlerinde hem akışkanı hem de akışkana maruz kalan yapıyı modellemek gerekmektedir. Esnek membran kanadın FSI modellenmesi için

lineer elastik membran çözücü [54] kullanılmıştır. Ayrıca korunum denklemleri için Arbitrary-Lagrangian-Eulerian (ALE) metodu kullanılmıştır. ALE metodu ile mesh geometrisi ile yapı geometrisi birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Kanatta meydana gelen yer değiştirme için bir işlemci toplamda ise 24 blok olduğu için 24 işlemci kullanılmıştır.

$$N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + p = \rho_w h_w \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (7)$$

Yukarıdaki denklemde bulunan parametreler aşağıdaki gibi boyutsuz hale getirilmiştir.

Ön gerilme	=	$\rho_a U^2 C$
$\rho_w h_w$	=	$\rho_a C$
$P^* = \frac{P}{\rho_a U^2 C} = \frac{P}{1.(4.5^2).(0.1)} = \frac{P}{2.025 N / m}$		
$Kanat_{ağırlığı} = \frac{\rho_w h_w}{\rho_a C} = \frac{1000 kg / m^3 . (0.0002 m)}{1 kg / m^3 . (0.1 m)} = 2$		

Esnek membran kanatta FSI modellenmesinde Tablo 3'te görüldüğü üzere hücum açısı $\alpha=0^\circ$ ile $\alpha=8^\circ$ için üç farklı (1.0, 1.5 ve 1.75) ön gerilme değeri kullanılmıştır. Ek olarak, Tablo 4'te belirtildiği gibi, $\alpha=8^\circ$ için beş farklı (1.0, 1.5, 1.75, 3 ve 5) ön gerilme değeri kullanılmıştır.

Tablo 3. Değişen hücum açıları için boyutsuz ön gerilme değerleri

Durum	Ön gerilme	Ağırlık
I	1.0	2
II	1.5	
III	1.75	

Tablo 4. $\alpha=8^\circ$ için boyutsuz ön gerilme değerleri

$\alpha=8^\circ$	Ön gerilme	Ağırlık
a)	1	2
b)	1.5	
c)	1.75	
d)	3	
e)	5	

Şekil 97’de akış çözücüsü için ana input dosyası ve görülmektedir. Bu dosyada görülen yazılar ile alakalı bilgilerden bazıları aşağıdaki gibidir;

- *i_2d:0* (Eğer hesaplama 2 boyutlu ise 1, 3 boyutlu ise 0 olmalıdır.)
- *i_steady=3* (Kararsız ve sürekli akış)
- *m_blk_tot: 24* (Yapılan sayısal modellemelerde toplam 24 blok olduğunu göstermektedir.)
- *dt: 5.00E-04* (Boyutsuz zaman aralığının belirtmektedir.)
- *ndt: 20000* (toplam iterasyon sayısını göstermektedir.)
- *implicit_mom:2 fully-implicit* (conv and diffusion with Crank- Nicolson)
- *momentum solver krylov_mom: Solver for semi-implicit and implicit momentum solver = 2 Biconjugate gradient stabilized (BiCGSTAB)*

Sayısal modelleme için referans değerlerin girildiği input dosyası Şekil 98a’da verilirken, Şekil 98b’de ise esnek kanadın özelliklerinin girildiği input dosyası örnek olarak verilmiştir.

hmdemir@nrlogin1:/work/newriver/hmdemir/membrane_fsi_v4/membrane_endplate_alpha_8_v4

```

Title"/ Title
0,0,0,3,0/ (runtime) i_2d,i_ustruc,i_ortho,i_steady,i_lb
24/ (blocks) m_blk_tot
0,0/ (periodic) i_pht,i_chan
5.00E-04,20000/ (temporal) dt,ndtot
4.00E+02,1,2/ (convective) re,i_conv,implicit_mom
2,5,10,1.00E-06,2/ (momentum solver) krylov,iter_out,iter_in,tolerance,n_converg
1,0,1,5,1,1,0.95,0,5,0.95/ (solver pc) i_pc,i_add,i_mult,nswp_in_blk,nswp_out_blk,nswp_glb,un_relax,i_cor,nswp
0,0,70,1/ (energy) i_scalar,prandtl,implicit_scal
0,0,0,0/ (turbulence model) i_les,i_des,i_rans,implicit_k_omega
2,500,5.00E-10,5,1/ (pressure solver) krylov,iter_max,tolerance,n_converg,ipr_adjst
1,0,1,5,1,1,0.95,0,5,0.95/ (solver pc) i_pc,i_add,i_mult,nswp_in_blk,nswp_out_blk,nswp_glb,un_relax,i_cor,nswp
1,1,1,0,0,0/ (io parameters) i_read_grid,i_restart_read,i_restart_write,i_reset_ndt,ndt_reset,i_scalar_start
100,1000,1/ (io parameters) n_print,n_restart,i_print_fac
0/i_hdf
1/i_tecplot
0,100,0,0/ (tecplot output) itec_start_ndt,itec_ndt,itec_reset,itec_reset_ndt
0/mean_k_t
0/turb_k_t
0/mean_i_k_t
0/turb_i_k_t
0/mean_i_t
0/turb_i_t
0/mean_i_j_t
0/turb_i_j_t
1/mean_t
10001,1,1/ (mean membrane)
1/turb_t
10001,1,1/
1/ (gblknum) mglb_blk_num
180,60,24/ (numcompcell) nic,njc,nkc
10,4,2/ (numcacheblock) ni_blk,nj_blk,nk_blk
0,1,1,0,1,1/ (external boundaries) e,w,n,s,h,l
1/ i_perbc
1/ nper_e
2,2,1,1,2,1,0,0/ (neighbor) blk,face,ax1,d1,ax2,d2,inter,ixyz
0/ nper_w
0/ nper_n
1/ nper_s
6,3,1,1,2,1,0,0/ (neighbor) blk,face,ax1,d1,ax2,d2,inter,ixyz
0/ nper_h
0/ nper_l
1/i_wallbc
"gen.in" 821L, 24246C

```

Şekil 97. Akış çözücüsü için ana input dosyası

a)

```

hmdemir@nrlogin1:/work/newriver/hmdemir/membrane_fsi_v4/membrane_endplate_alpha_8_v4
1/ifuuid,ivar_props
4.5,0.1,101000.0,300.0,300.0/u_ref,l_ref,p_ref,t_ref,t_0
1.0,1.8e-5,0.02,1000.0,28.97/rho_ref,mu_ref,k_ref,cp_ref,mole_wt
0.0,0.0,0.0,10.0/g_x,g_y,g_z,delta_t
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,100.0/angvel_x,angvel_y,angvel_z,rad_x,rad_y,rad_z,delt

reference values for fluid part of simulation from ref.in

ifuuid = 0, no fluid in domain-only solid (conduction problem)
      = 1, gas
      = 2, liquid
ivar_props = 0, no variations in properties
      = 1, property variations (only for gas)

u_ref - reference velocity (m/s)
      u_ref=sqrt(g*1_ref*delta_t/t_0) for pure free convection
      if ifluuid=0, u_ref = k_ref/rho_ref/cp_ref/l_ref

l_ref - reference length scale (m)

p_ref - reference pressure (Pa)

t_0,t_ref - reference temperatures (K)
      non-dim temp, t* = (t-t_ref)/t_0
      when i_pht=1, t_0 = q_w*1_ref/k_ref, t_ref = t_in
      when free convection t_0=t_ref=(t_h+t_c)/2 with const. wall temps.
      when free convection with wall flux t_0=q_w*1_ref/k_ref and
      t_ref = maybe initial temp.
      when rotating system t_0=T_w-T_in
mole_wt - Molecular mass of gas (kg/kgmole)
      use some fictitious value for solid or liquid

rho_ref - reference density (kg/m^3)
      if ifluuid=0 then use solid density
      if fluid=1 & ivar_props=1 then based on t_ref
      if input as 0.0 then will be calculated using
      p_ref and t_ref assuming air
mu_ref - reference viscosity (kg/m/s)
      if ifluuid=0 then value not important
      if fluid=1 & ivar_props=1 then based on t_ref
      if input as 0.0 then will be calculated using
      t_ref assuming air - Sutherland law
      (valid till about 700 C)

hmdemir@nrlogin1:/work/newriver/hmdemir/membrane_fsi_v4/membrane_endplate_alpha_8_v4
1/membrane flag
2/tot_blk
1.5,1.5,2.0/pre_tension_x,pre_tension_y,wing_weight
9,16/glb_blk_list
180,24/nic,njc
4,1,1,1,-1,2,181,2,25,2,181,2,25/iface,iaxis_align,i_axis1_dir,i_axis2_dir,iforce_dir,axis1blk
3,1,1,1,1,2,181,2,25,2,181,2,25/iface,iaxis_align,i_axis1_dir,i_axis2_dir,iforce_dir,axis1blk

```

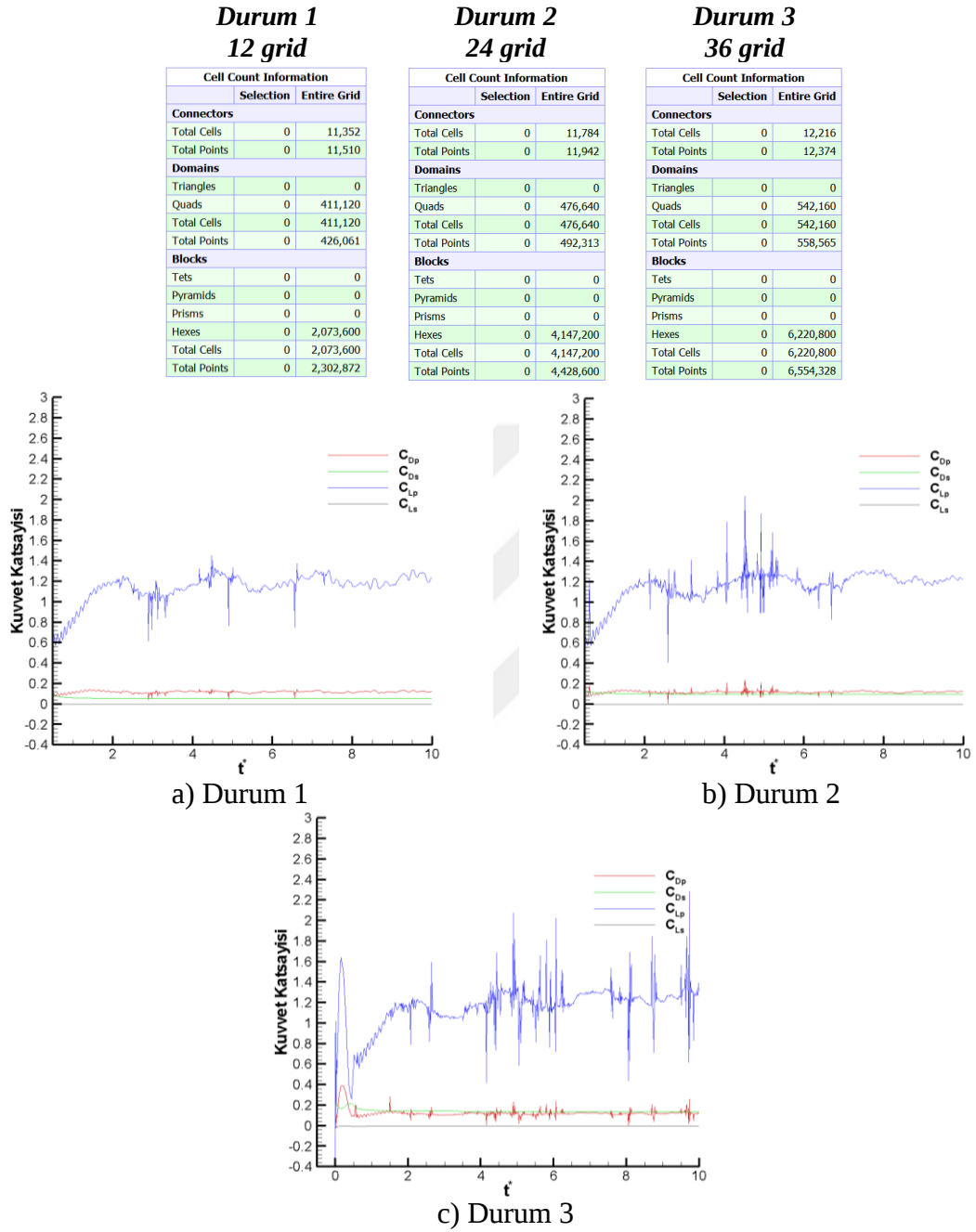
b)

Şekil 98. Input dosyaları a) referans b) esnek membrane kanat

3.3.3. Mesh Bağımsızlık Çalışması

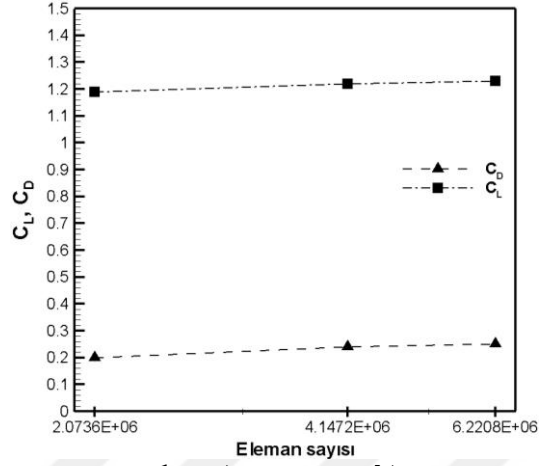
Mesh bağımsızlık çalışması için Pointwise programı kullanılarak 3 farklı hücre sayısına sahip model hazırlanmıştır. Sayısal akışkanlar dinamiğinde sınır tabaka etkilerinin incelenebilmesi ve çözümün sonuçlarının yakınsayabilmesi için sınır tabaka ağ yapısı oluşturulması gerekmektedir. Bu yapı kanat üzerinde çok sık bir ağ yapısı oluşturulmasını gerektirmektedir. Kanat üzerinden başlayan ağ yapısının ilk katmanının yani kanadın yüzeyi ile ağ yapısı arasındaki ilk uzaklık y^+ değeri ile belirlenmektedir. Bu çalışmada ilk katman kalınlığı y^+ değeri 1 olarak kabul edilmiştir. Yapılan mesh bağımsızlık çalışmasında z ekseninde 24 gride sahip (4,147,200 eleman sayısı) durum için elde edilen aerodinamik kuvvet katsayı değerleri ile 36 gride (6,220,800 eleman sayısı) sahip durum için değerler kıyaslandığında göze çarpan bir değişikliğin olmadığı görülmüştür ve böylelikle 24 gride sahip durum diğer modeller için kullanılmıştır.

Tablo 5. Mesh bağımsızlık için kullanılan durumlar

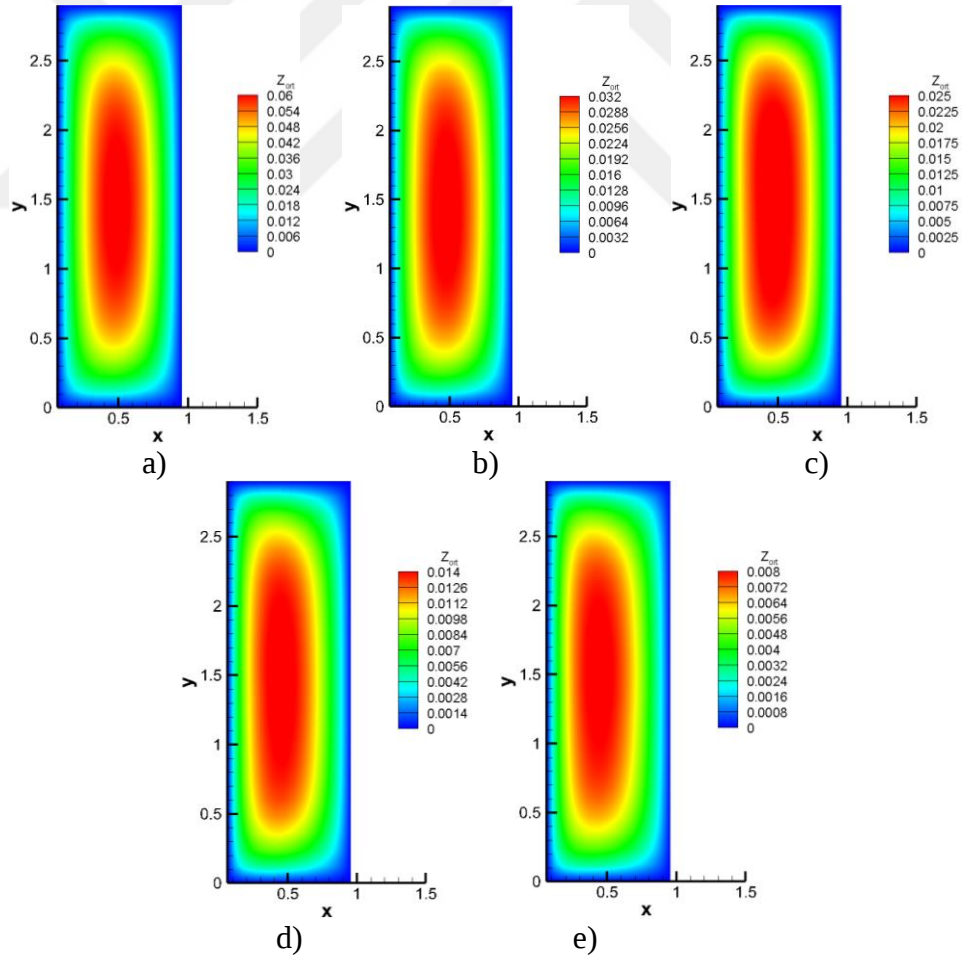
Şekil 99. Esnek membran kanadın aerodinamik kuvvet katsayılarının $\alpha=8^\circ$ veRe= 2.5×10^4 ’de anlık değişimi

Şekil 99’da, $\alpha=8^\circ$ ve Re= 2.5×10^4 için 3 farklı durum için elde edilen aerodinamik kuvvet katsayılarının anlık değişim grafikleri verilmiştir. Şekil 100’de görüldüğü üzere, grid sayısının 24 (4,147,200 eleman sayısı)’ten 36 (6,220,800 eleman sayısı)’ya

çıkarılması ile aerodinamik taşıma ve sürüklenme kuvvetlerinde belirgin bir değişikliğe neden olmadığı için grid sayısı 24 (Durum 2) ile modellemeye devam edilmiştir.

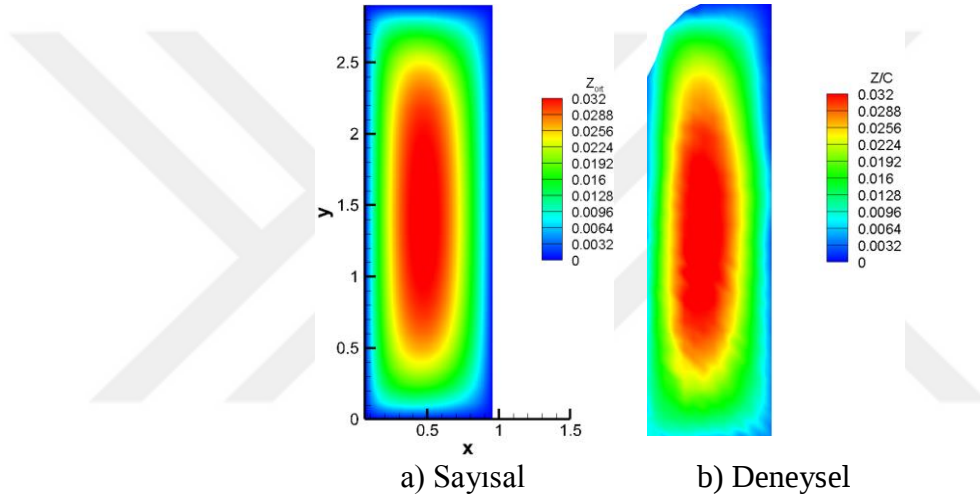


Şekil 100. Kuvvet katsayısı sonuçları a) Durum 1, b) Durum 2 ve c) Durum 3 $\alpha=8^\circ$ ve $Re=2.5 \times 10^4$

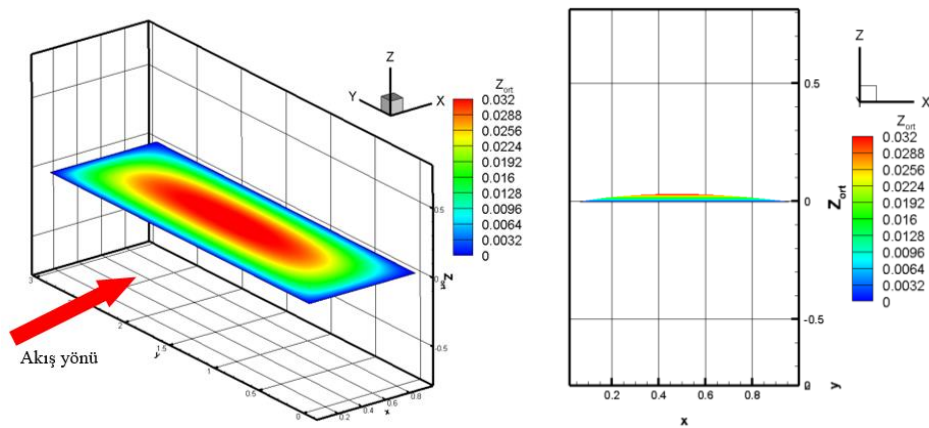


Şekil 101. Sayısal modellemelerden elde edilen $\alpha=8^\circ$ 'de farklı ön gerilme değerleri için esnek membran kanat üzerinde oluşan ortalama deformasyon sonuçları a) ön gerilme=1, b)ön gerilme=1.5, c)ön gerilme=1.75, d)ön gerilme=3, e)ön gerilme=5

Akışkan alanı içerisinde esnek membran malzeme ile akışkan arasında meydana gelen etkileşimden dolayı esnek kanatta deformasyon meydana gelmektedir. Yapılan sayısal modellemede $\alpha=8^\circ$ için 5 farklı boyutsuz ön gerilme değerinin kullanılması ile elde edilen deformasyon sonuçları Şekil 101’de verilmiştir. Şekil 102’de daha önceden DIC sistemi kullanarak yapılan esnek kanat üzerinde oluşan deformasyon ölçüm sonucu ile sayısal olarak elde edilen sonuç kıyaslandığında en iyi sonucun ön gerilme değeri 1.5 olduğu görülmektedir. Bunun üzerine diğer hücum açıları için yapılan modellemelerde bu değer kullanılmıştır.



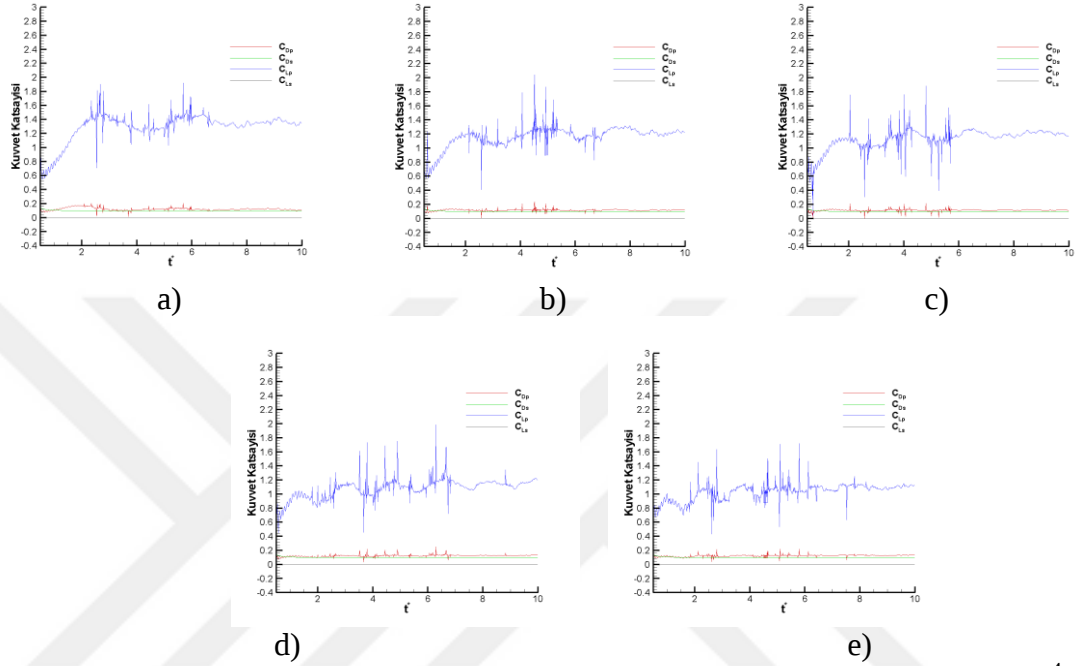
Şekil 102. $\alpha=8^\circ$ için esnek membran kanatta oluşan ortalama deformasyon sonuçları



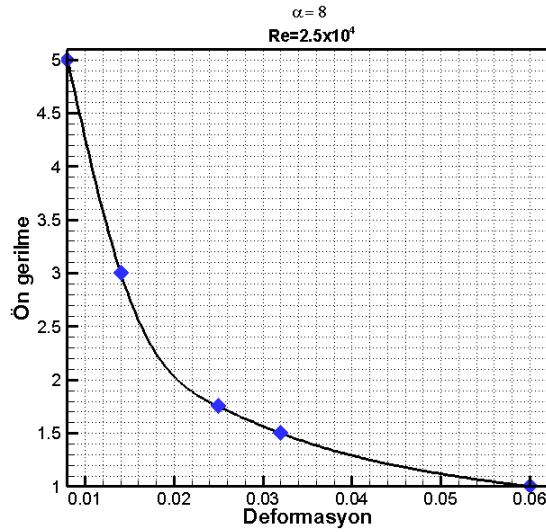
Şekil 103. $\alpha=8^\circ$ için esnek kanattaki deformasyonun 3 boyutlu örnek gösterimi

Şekil 102’de, sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında her iki sonucun uyum içerisinde olduğu göze çarpmaktadır. Her iki durum için de esnek membran kanat üzerinde oluşan ortalama deformasyonun kanat eni boyunca simetrik olduğu ve

maksimum deformasyon bölgesinin kanat üzerinde kapladığı alanın birbirine çok benzediği görülmektedir. Şekil 103'te sayısal modelleme sonucu esnek kanatta meydana gelen deformasyonun 3 boyutlu gösterimi örnek olarak verilmiştir.

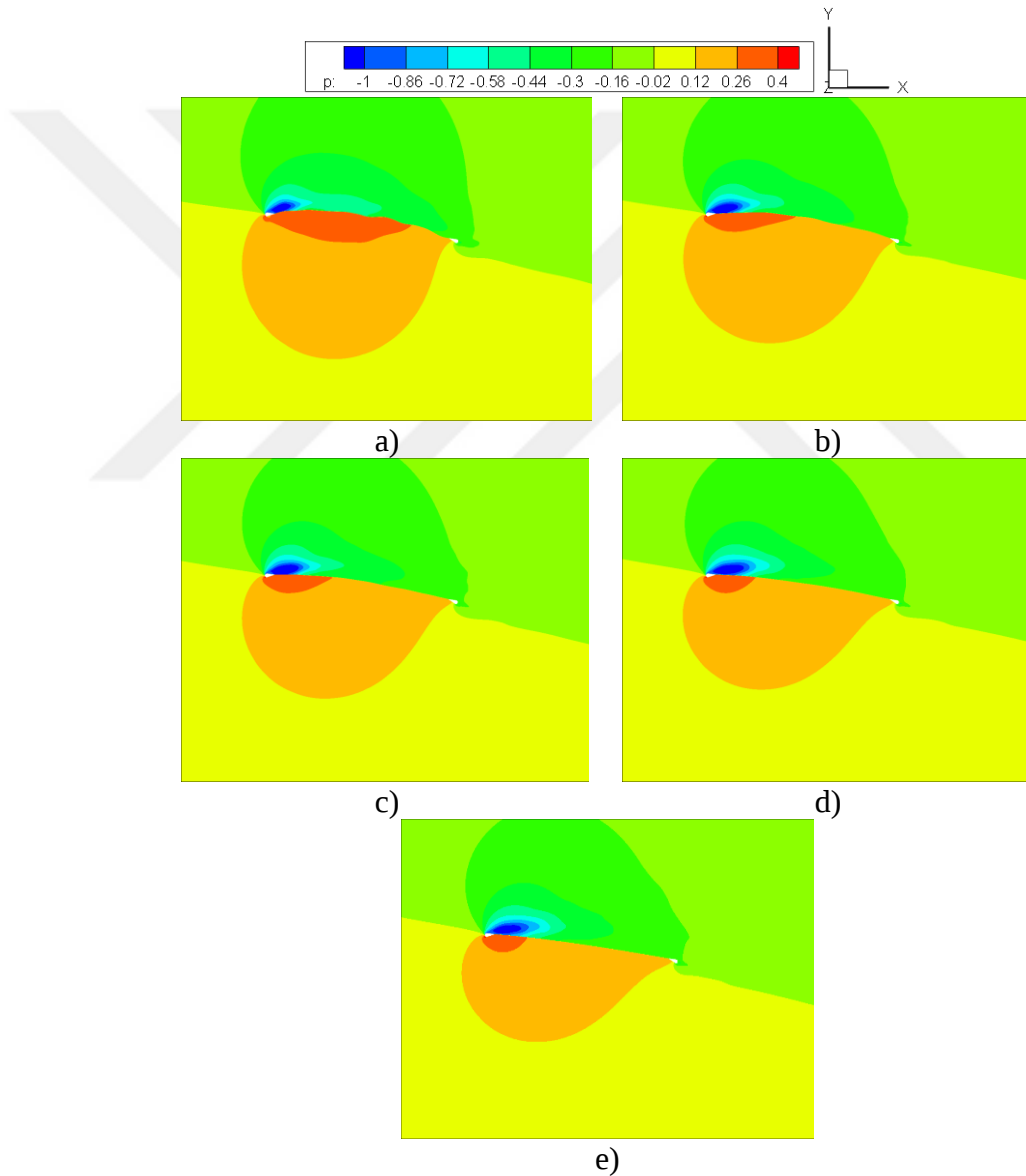


Şekil 104. Esnek membran kanadın aerodinamik kuvvet katsayılarının $Re=2.5 \times 10^4$ ve $\alpha=8^\circ$ için ve anlık değişimi a)ön gerilme=1, b)ön gerilme=1.5, c)ön gerilme=1.75, d)ön gerilme=3, e)ön gerilme=5



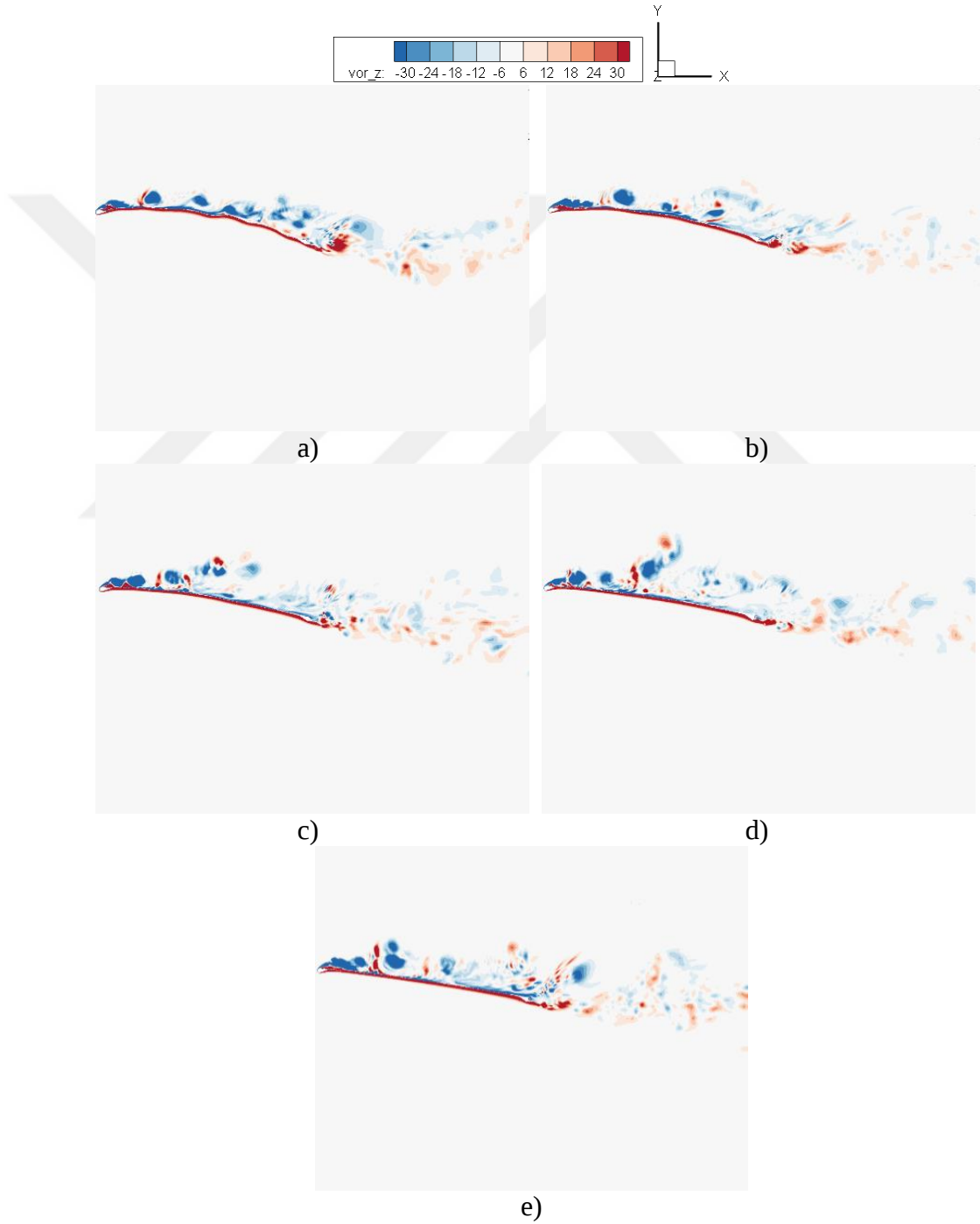
Şekil 105. Deformasyonun öngerilme ile değişimi

Şekil 104'te farklı ön gerilme değerleri için $\alpha=8^\circ$ 'de esnek membran kanadın aerodinamik kuvvet katsayılarının anlık değişimi verilmiştir. Her ön gerilme değeri için esnek kanatta meydana gelen deformasyon farklı olacağı için aerodinamik kuvvet katsayıları da farklılık göstermektedir. Şekil 105, esnek membran kanatta $\alpha=8^\circ$ ve $Re=2.5 \times 10^4$ için ön gerilme ile deformasyon değişim durumu göstermektedir. Grafikten anlaşıldığı üzere, esnek membran kanada uygulanan ön gerilmenin azaltılması ile esnek membran kanat üzerinde meydana gelen deformasyon artmaktadır.



Şekil 106. Esnek membran kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de ortalama basınç dağılımı a)ön gerilme=1 b)ön gerilme=1.5 c)ön gerilme=1.75 d)ön gerilme=3 e)ön gerilme=5

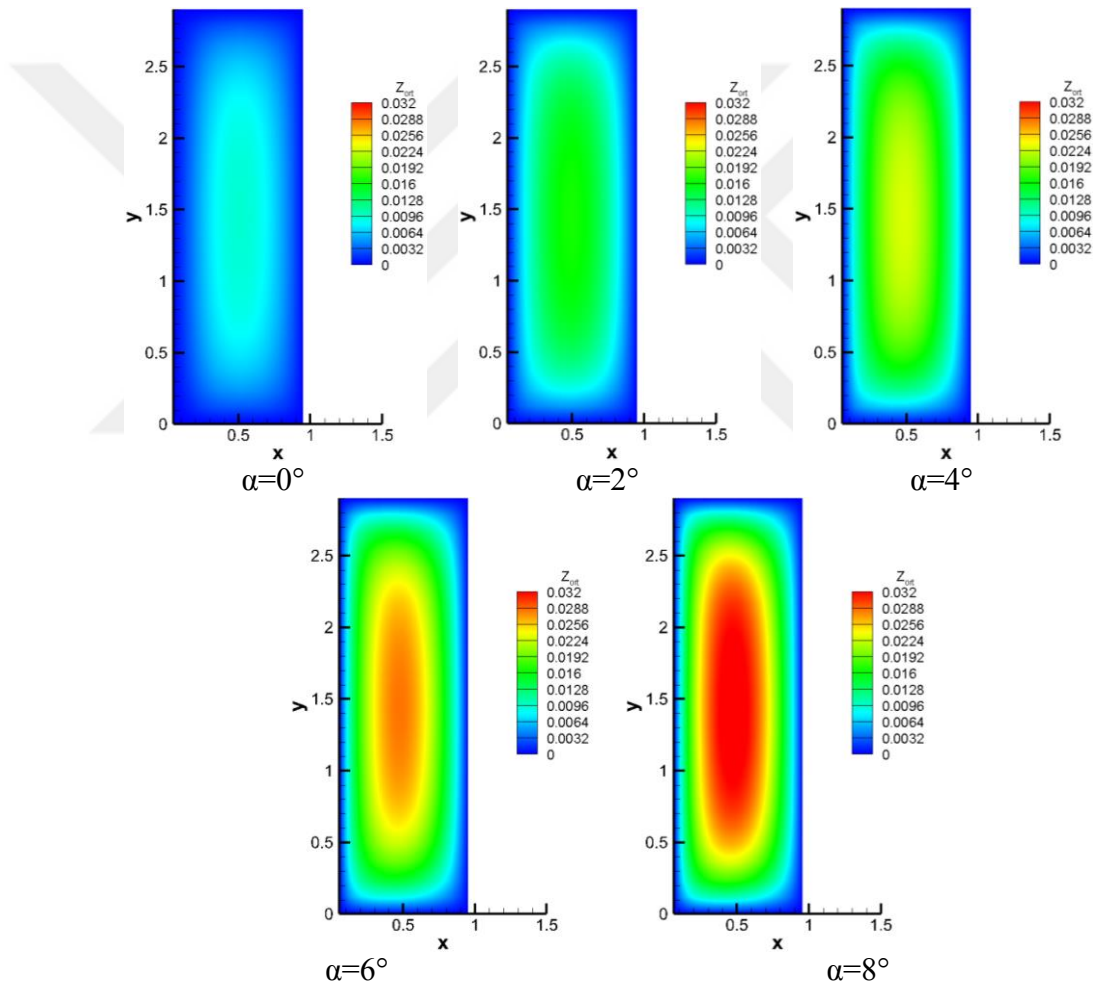
Şekil 106 ve Şekil 107’de sırasıyla, esnek membran kanat için değişen ön gerilme değerlerinde elde edilen ortalama basınç dağılımı ve girdap dağılımı sonuçları verilmiştir. Ortalama basınç dağılım sonuçları incelendiğinde, artan ön gerilme değerinin esnek kanatta meydana gelen basınç farkını azaltmış böylelikle kanatta oluşan deformasyon ve elde edilen taşıma azalmıştır.



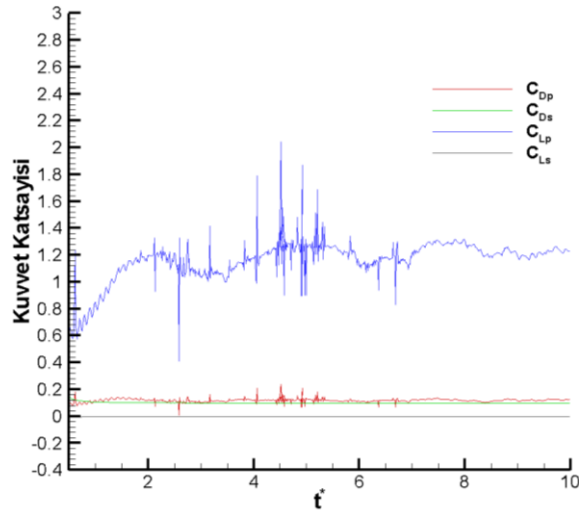
Şekil 107. Esnek membrane kanat için $\alpha=8^\circ$ 'de girdap dağılımı a)ön gerilme=1 b)ön gerilme=1.5 c)ön gerilme=1.75, d)ön gerilme=3 e)ön gerilme=5

3.3.4. Esnek Kanadın Sayısal Modellemesi

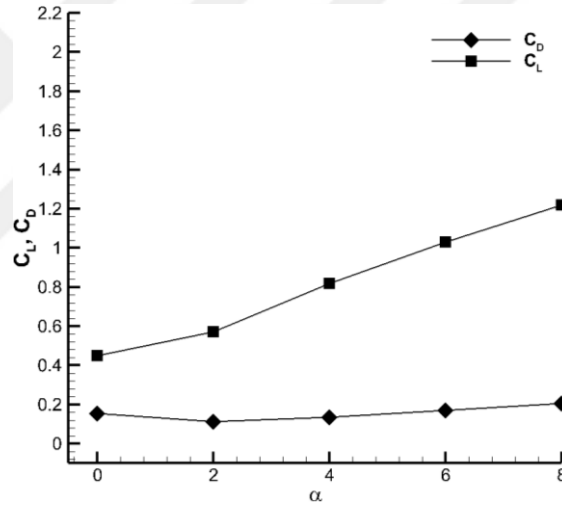
Şekil 108’de değişik hücum açıları için yapılan FSI modellemesi ile esnek membran kanat üzerinde oluşan ortalama deformasyon sonuçları verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, esnek kanat üzerinde meydana gelen deformasyon hücum açısı artışı ile kanattaki kırmızı bölge genişleyerek daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 109’da sayısal çözüm esnasında elde edilen anlık aerodinamik katsayılarını göstermektedir. Bu katsayılarının zaman ortalamalı hali Şekil 110’da gösterilmiştir.



Şekil 108. Esnek membran kanat üzerinde oluşan ortalama deformasyon sonuçları

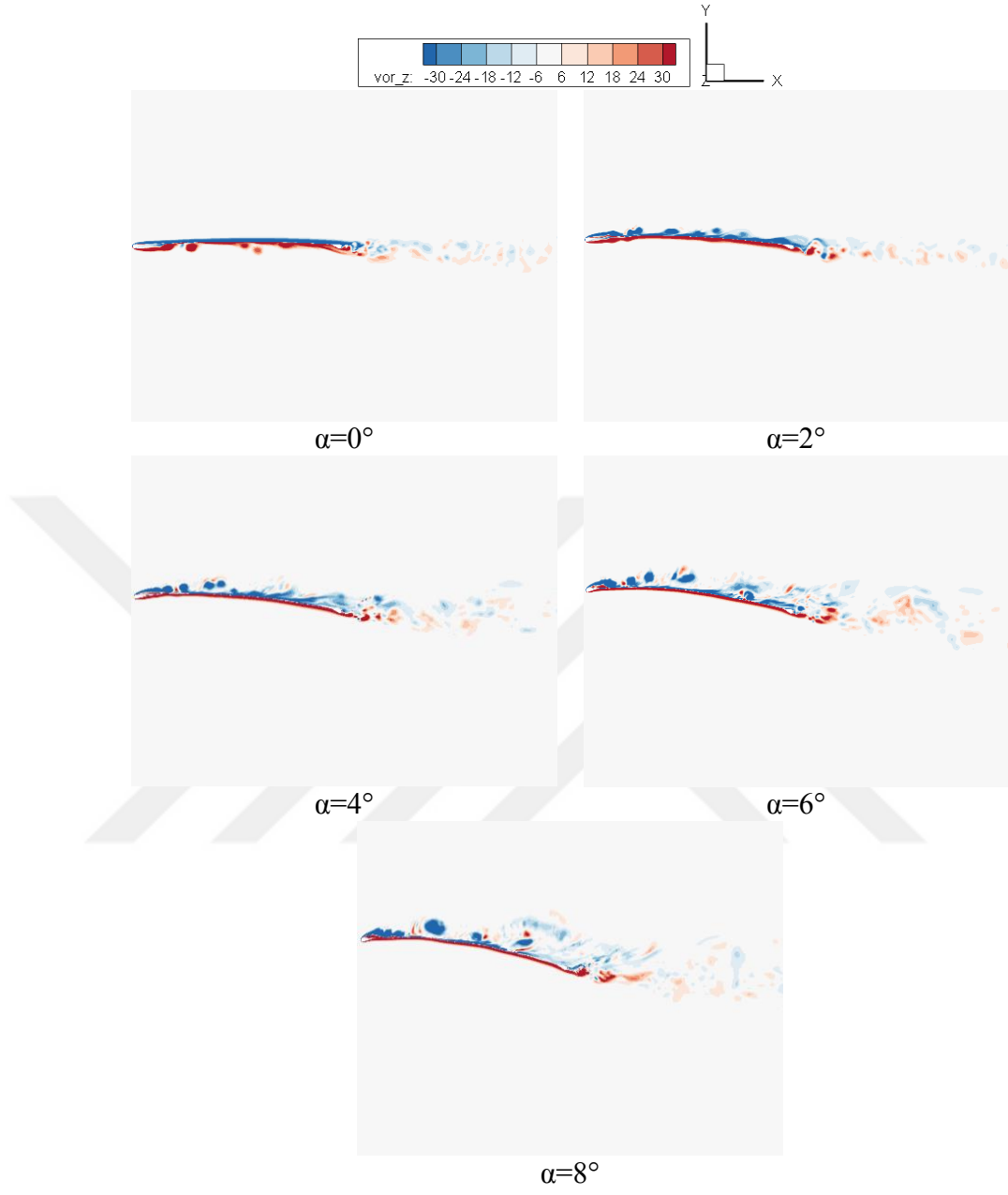


Şekil 109. Esnek kanadın $\alpha=8^\circ$ 'de kuvvet katsayılarının anlık değişimi

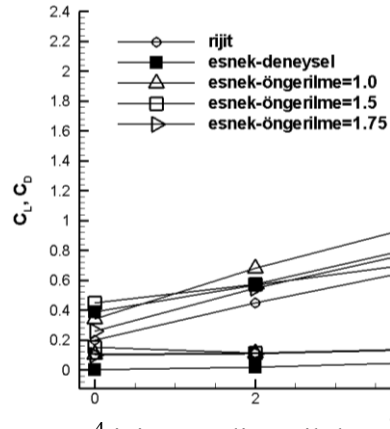


Şekil 110. Esnek kanadın zaman ortalamalı kuvvet katsayılarının α ile değişimi

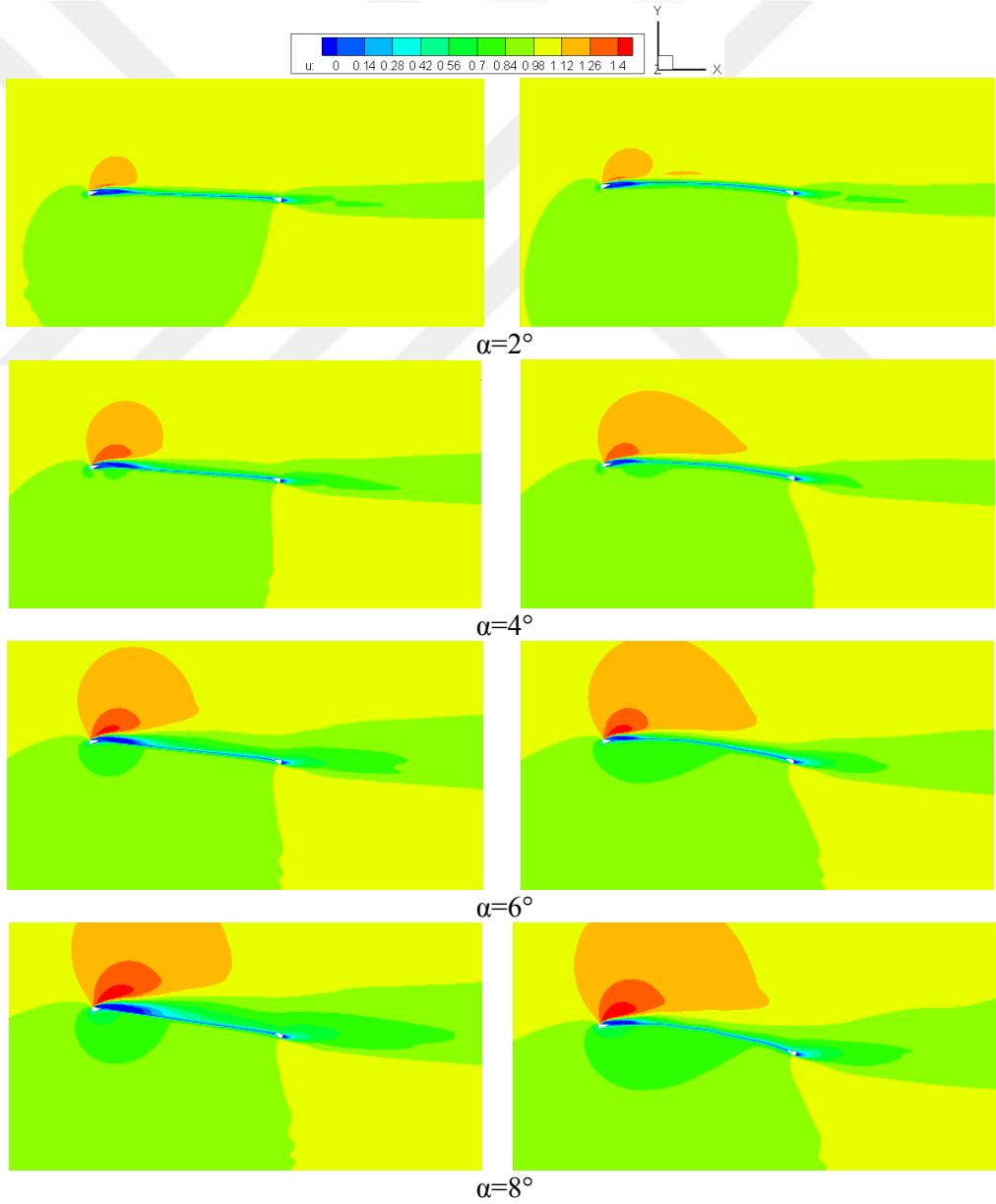
Şekil 111'de esnek membran kanat için değişik hücum açılarında yapılan sayısal modellemelerden elde edilen girdap dağılım sonuçları verilmiştir. Hücum açısının $\alpha=0^\circ$ 'den $\alpha=8^\circ$ 'e arttırılması ile kanat üzerinden ayrılan girdaplar daha da büyümüş ve iz bölgesine doğru genişlemiştir. Şekil 112'de rijit ve esnek membran kanatlar için taşıma ve sürüklenme katsayılarının karşılaştırılması verilmiştir. Tüm hücum açısı değerlerinde, esnek membran kanadın hem deneysel hem de sayısal taşıma kuvveti katsayısı sonuçlarıyla kıyaslandığında rijit kanadın tüm hücum açısı değerlerinde en düşük taşıma kuvveti katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kanattaki esneklik kaldırmanın artmasını sağlamıştır. Bunun yanı sıra, ön gerilmedeki azalma esnek membran kanattaki aerodinamik taşıma kuvveti katsayısının artmasını sağlamıştır.



Şekil 111. Esnek membran kanadın farklı hücum açılarındaki girdap dağılımı



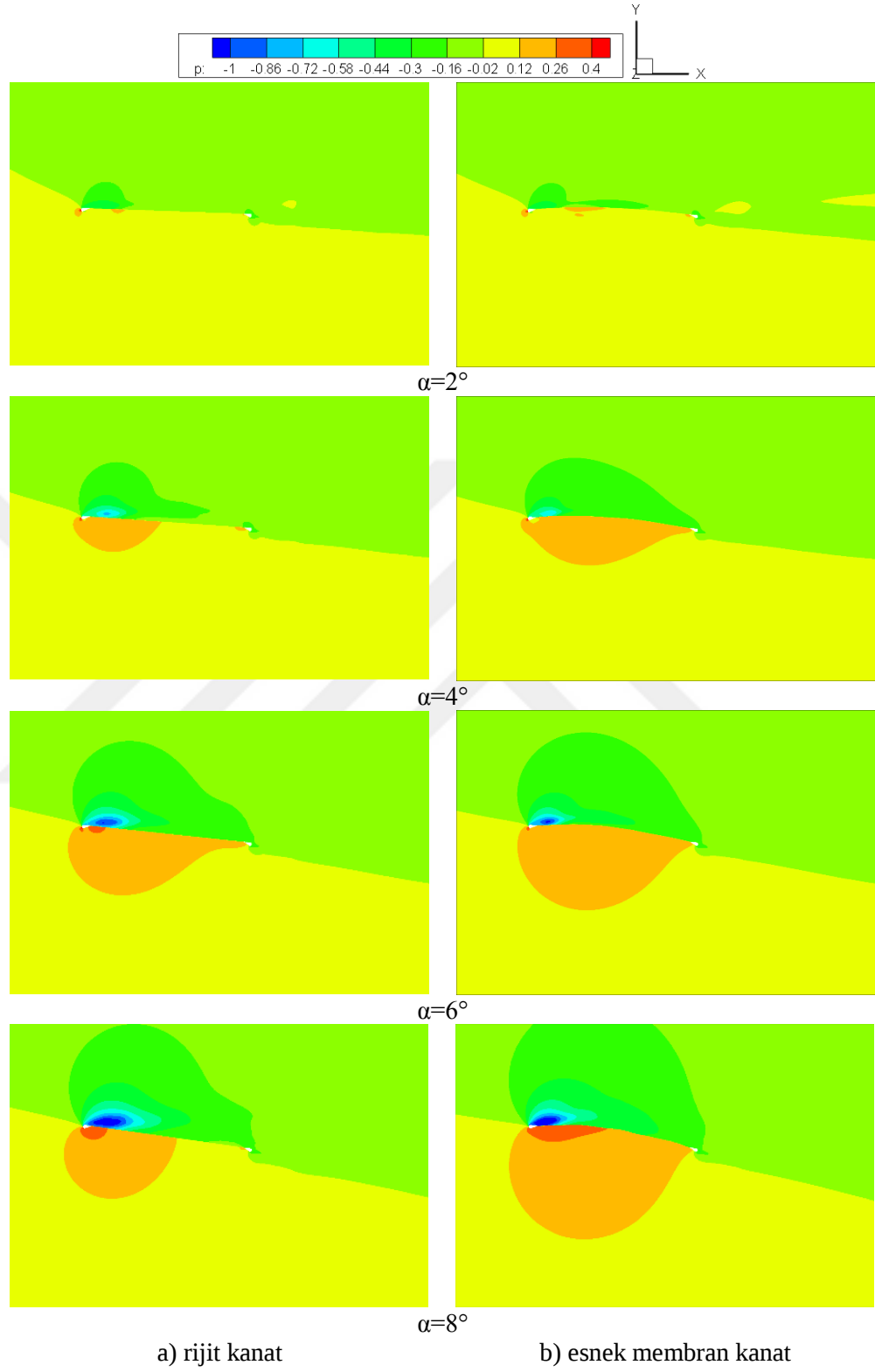
Şekil 112. $Re=2.5 \times 10^4$ için aerodinamik kuvvet katsayılarının hücum açısı ile değişimin sayısal ve deneysel olarak karşılaştırılması



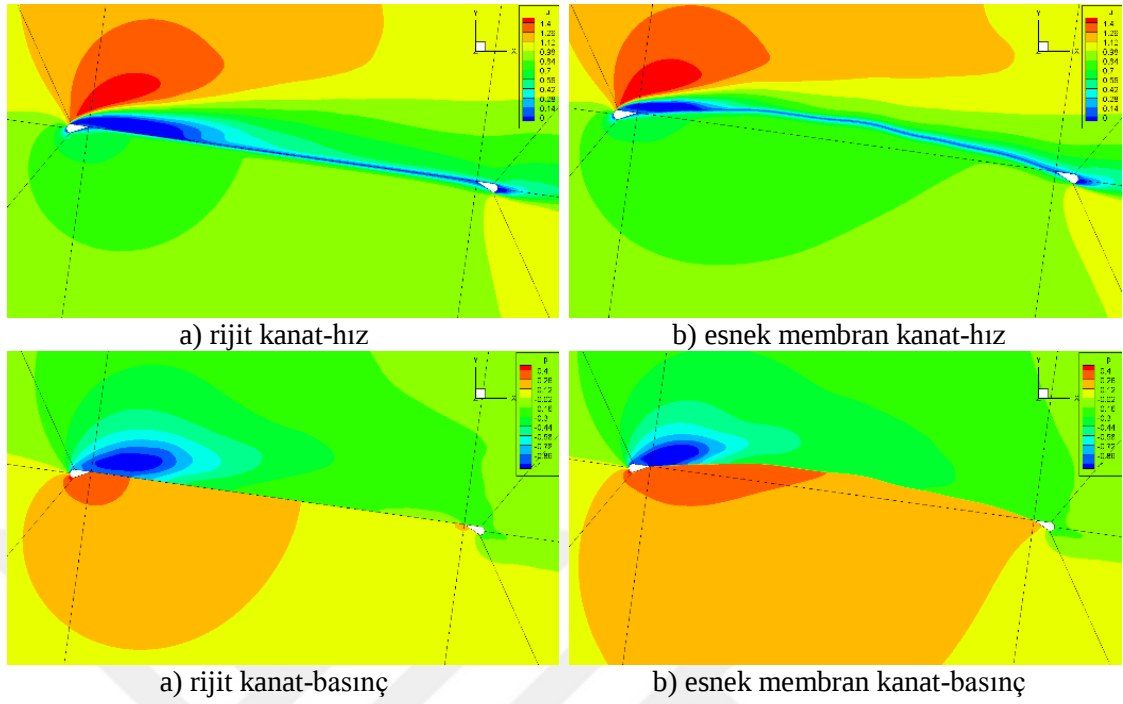
a) rijit kanat

b) esnek membran kanat

Şekil 113. $Re=2.5 \times 10^4$ için ortalama hız dağılımı

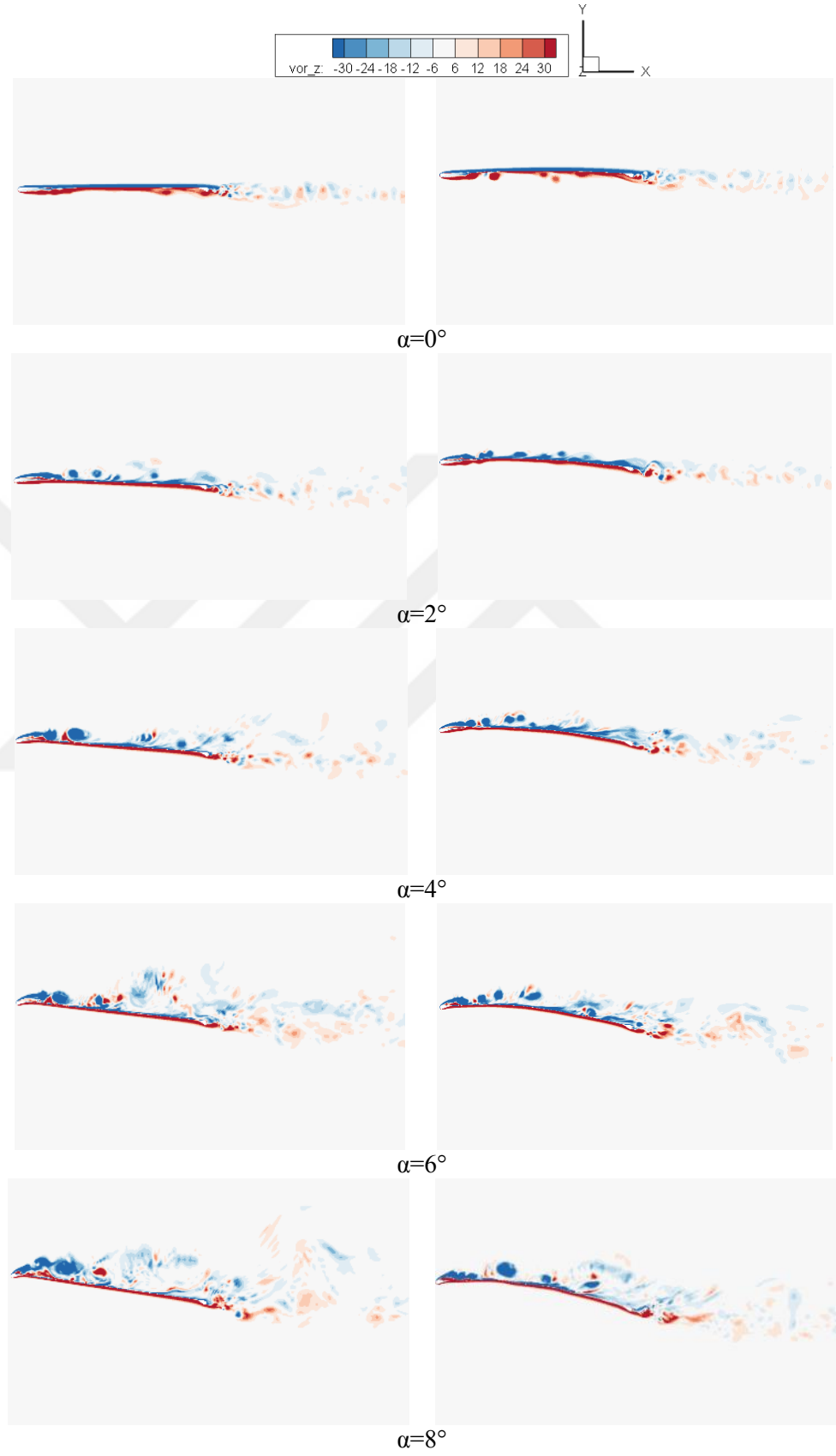


Şekil 114. $Re=2.5 \times 10^4$ için ortalama basınç konturları



Şekil 115. $\alpha=8^\circ$ için ortalama hız ve basınç konturları

Açık kaynak kod kullanılarak yapılan sayısal modellemelerden elde edilen sonuçlar doğrultusundaki Şekil 113-116 incelendiğinde hem rijit hem de esnek membran kanatta, hücum açısının artması ile hücum kenarı ayrılmalarının arttığı görülmüştür. Kanat üzerindeki ayrılmış akış bölgesinin genişlediği ve iz bölgesine doğru arttığı gözlemlenmiştir. Membran malzemenin esnekliği ayrılmış akış bölgesinde azalmayı sağlamıştır. Ek olarak, hücum kenarı girdaplarının firar kenarı girdapları ile birleşmiştir. Hücum açısının artması ile ayrılmış akış bölgesinin artmasına yol açmıştır ve bu bölge esnek membran kanat ile kıyaslandığında rijit kanatta daha fazladır. Bunun yanı sıra, ortalama basınç dağılım sonuçları incelendiğinde, tüm hücum açıları için, kanat alt ve üst yüzeylerindeki basınç farkı esnek membran kanatta daha fazladır. Esnek membran kanadın kesitsel şekli basınç farkına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 116'da, hücum açısının $\alpha=0^\circ$ 'de Karman vortex yapısı belirgin bir şekilde göze çarpmaktadır. $\alpha=2^\circ$ 'de, hücum kenarında küçük girdapların kopmaya başladığı anlaşılmaktadır ve bu girdaplar hücum açısının artması ile daha da belirgin bir hal almıştır.



a) rijit kanat

b) esnek membran kanat

Şekil 116. Sayısal modelleme sonucu elde edilen farklı hücum açılarında girdap dağılımı

4. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, düşük Re sayılarında farklı AR değerlerine sahip esnek membran kanatta oluşan LSB ve LSB'nin zamanla değişimi, uç girdapları ve bunların esnek kanadın aerodinamik performansına etkisi, esnek kanat ile akışkan arasında meydana gelen akışkan-yapı etkileşimi sonucu oluşan deformasyonlar (yer değiştirme) ve bunlara bağlı olarak meydana gelen titreşim modlarının değişimi hem deneysel hem de sayısal (ANSYS FLUENT ve açık kaynak kod) olarak incelenmiştir.

AR=1 esnek kanat için akış görselleştirme sonuçları incelendiğinde, düşük hücum açılarında esnek kanatta belirgin bir uç girdap görülmezken, artan hücum açısı ile esnek kanadın firar kenarına yakın kısmında oluşan uç girdapları spiral şeklinde büyüdüğü ve iz bölgesini etkilediği ve bu girdapların hücum kenarına doğru yaklaştığı gözlemlenmiştir. Nihayetinde, daha büyük açılarda ($\alpha=30^\circ$) uç girdapların hücum kenarına dayanmıştır. Re sayısının artması ile atalet kuvvetlerinde artış meydana gelir, esnek kanadın üst kısmındaki basınç azalması alt kısımdakinden daha fazla olduğu için uç girdapları kanadın alt kısmından üst kısmına doğru büyüyerek hareket eder ve kanadın üst kısmına daha çok etki eder. Ek olarak, hücum kenarında meydana gelen ayrılma ve sonrasında tekrar tutunma dolayısıyla oluşan LSB, hücum açısının artması ile büyüme göstermiştir. Öte yandan, $\alpha=14^\circ$ 'ten sonra tutunan akış tekrar kanat üzerinden ayrılmıştır. Bu ayrılmalar sonucunda oluşan girdaplar esnek kanada çarpmaktadır. $\alpha=24^\circ$ 'ten sonra ise akış ayrılmaları ve oluşan girdaplar büyümekte ve bu girdaplar esnek kanadın firar kenarına yakın yere çarpmaktadır. Re sayısı artması ile esnek kanat üzerinde oluşan hücum kenarındaki ayrılmalar küçülmemekte ve $\alpha=18^\circ$ 'den sonra tutunan akış tekrar ayrılmakta ve oluşan girdaplar kanada çarpmaktadır.

Kuvvet deney sonuçları incelendiğinde, $AR=1$ esnek membran kanadın tutunma kaybı açıları sırasıyla $Re=2.5 \times 10^4$, $Re=5.0 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ için $\alpha=36^\circ$, $\alpha=38^\circ$ ve $\alpha=40^\circ$ 'dir. C_{Lmax} değeri $Re=2.5 \times 10^4$ için yaklaşık 1.7 iken $Re=5.0 \times 10^4$ 'de 1.9 ve $Re=7.5 \times 10^4$ 'de ise yaklaşık olarak 2.1'e denk gelmektedir. Görüldüğü üzere, Re sayısının artması ile hem tutunma kaybı açısı hem de C_{Lmax} değeri artış göstermiştir.

Deformasyon sonuçları incelendiğinde, $AR=1$ esnek kanatta meydana gelen deformasyon değerinin Re sayısı ve hücum açısının artması ile arttığı görülmüştür. Uç girdaplarının etkisinden dolayı esnek kanat üzerinde oluşan deformasyon değeri kanadın yanlarında daha azdır. Esnek kanat üzerinde meydana gelen deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılım sonuçları incelendiğinde LSB etkisi ile; $Re=2.5 \times 10^4$ ve $Re=5.0 \times 10^4$ için tek modlu titreşim baskın olmuştur. $Re=7.5 \times 10^4$ ve $\alpha=0^\circ$ 'de kanadın kordu boyunca 3 modlu titreşim oluşmuş, $\alpha=2^\circ$ iken titreşim modu sayısının 4'e çıkmış ve $\alpha=4^\circ$ 'de tekrar 3'e düşmüştür. Hücum açısı $\alpha=6^\circ-12^\circ$ arasında 4 modlu titreşim gözlemlenirken hücum sayısının daha da arttırılması ile kanat üzerinde tek modlu titreşimin baskın olduğu görülmektedir.

$AR=1$ esnek kanadın, zaman ortalamalı hız ve TKE dağılımı sonuçları incelendiğinde, kanat uç kenarındaki hız alanında uç girdaplarının etkisi özellikle Re sayısı artması ile belirgin hale gelmiştir. Bu belirginlik TKE dağılımlarında da hızdaki çalkantı artışları ile göze çarpmaktadır. $y/s=0.4$ konumunda zaman ortalamalı hız dağılımı sonuçlarına bakıldığında, düşük Re sayılarında atalet kuvvetleri, daha büyük Re sayılarına göre az olduğundan düşük hızlı ayrılmış akış bölgeleri daha geniş iken Re sayısı arttıkça ayrılmış akış bölgesi daralmaktadır. $Re=5.0 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ 'de atalet kuvvetleri düşük Re sayılarına göre fazla olduğundan oluşan hücum kenarı ayrılımları küçüktür ve atalet kuvvetleri dolayısıyla bastırılmıştır. TKE dağılımlarında hızdaki çalkantı artışı dolayısıyla maksimum değer bölgesi genişlemiş olup türbülansa geçişin meydana geldiğini göstermektedir. Ayrıca Re sayısının artışı ile kırmızı bölgenin başlangıcı hücum kenarına yaklaşmış yani türbülansa geçiş noktası hücum kenarına yaklaşmıştır.

$AR=3$ esnek membran kanat için duman teli deneyi sonuçları incelendiğinde hücum açısının artması ile uç girdapları görünür hale gelmiş, özellikle Re sayısının artması ile

daha da belirginleşmiştir. $y/s=0.4$ konumundaki sonuçlar incelendiğinde, $Re=2.5 \times 10^4$ için $\alpha=2^\circ$ 'de kısa kabarcık oluşmuş ve $\alpha=6^\circ$ 'de uzun kabarcık meydana gelmiştir. Hücum açısının $\alpha=12^\circ$ 'ye yükselmesi ile kabarcık patlamış ve tüm kanat yüzeyini etkilemiştir. $Re=5 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ 'de oluşan LSB'nin $Re=2.5 \times 10^4$ 'ye kıyasla daha küçük olduğu görülmüş ve bu LSB atalet kuvvetlerin etkisinden dolayı sonra patlamıştır. $\alpha=24^\circ$ 'ten sonra akışın tamamen ayrıldığı gözlemlenmiştir. Kuvvet sonuçları incelendiğinde, $Re=2.5 \times 10^4$, $Re=5.0 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ için sırasıyla tutunma kaybı açıları 18° , 14° ve 14° iken C_{Lmax} değeri ise 1.05, 1.29 ve 1.43'tür. $AR=1$ esnek kanat ile karşılaştırıldığında tutunma kaybı açıları ve C_{Lmax} değeri azalmıştır. Bu azalmaların nedeni, kanadın en/boy oranı artınca uç girdabı etkileri azalmış ve kanat üzerindeki akışta hücum kenarı ayrılmaları ve LSB daha etkin olmuştur. Hücum kenarı ayrılmalarının büyümesi ve daha baskın olması ile kanat daha erken tutunma kaybına maruz kalmakta ve dolayısıyla taşıma kuvveti düşüp sürüklenme kuvveti azalmaktadır.

$AR=3$ esnek kanadın DIC sonuçları incelendiğinde hücum açısı ve Re sayısı arttıkça esnek kanatta yer değiştirme artmakta fakat bazı açılarda kanat üzeri akış ayrılmaları dolayısıyla deformasyon düşmektedir. $Re=2.5 \times 10^4$ sonuçlarında titreşim modları düşük hücum açılarında çok net değilken kanat kordu boyunca genel olarak tek modlu titreşim göze çarpmıştır. $\alpha=16^\circ$ yükselmesi ile girdapların etkisi ile iki modlu titreşimler oluşmuş ve bu etki $\alpha=22^\circ$ 'ye kadar sürmüştür. $\alpha=24^\circ$ 'ye gelindiğinde ise tek modlu titreşimlerin oluştuğu ve $\alpha=40^\circ$ 'ye kadar devam etmektedir. Re sayısının $Re=5.0 \times 10^4$ 'e çıkarılması ile oluşan titreşim modu sayısı artma göstermiştir. Düşük hücum açılarında ($\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=2^\circ$) maksimum standart sapmanın kanadın uç kısımlarında daha yoğun olduğu ve hem kort boyunca hem de kanat açıklığı boyunca üç modlu titreşimler görülmüştür. $\alpha=6^\circ$ ve $\alpha=8^\circ$ 'de kanat kordu boyunca dörtlü titreşim modları oluşurken kanat açıklığı boyunca ise hücum kenarına yakın yerde dörtlü, firar kenarına yaklaştıkça da üçlü modlar oluşmuştur. $\alpha=10^\circ$ iken ayrılma kabarcığının etkisi ile titreşim modlarının orta kısımdan azalarak uçlarda birleştiği ve $\alpha=12^\circ$ olduğunda bu titreşim modlarının kanat kordu boyunca iki mod haline geldiği ve $\alpha=24^\circ$ 'ye kadar iki modlu titreşimlerin devam ettiği görülmüştür. $\alpha=12^\circ$ 'den sonra uç girdaplarının büyümesi ile hücum kenarındaki titreşim modu uçlarda eğik şekilde oluşmaktadır. Ayrıca $\alpha=12^\circ$ ile $\alpha=24^\circ$ oluşan ikili titreşim modunun firar kenarına yakın olanın uç girdaplarının etkisi ile kanat açıklığı boyunca azaldığı görülmektedir. $\alpha=30^\circ$ ile $\alpha=40^\circ$ arasında akış

ayrılmaları dolayısıyla tek modlu titreşimler gözlemlenirken, hücum sayısının artması ile maksimum standart sapma bölgesinin değerini azalmaktadır. Öte yandan, $Re=7.5 \times 10^4$ için deformasyonun zaman ortalamalı standart sapma dağılım sonuçlarına bakıldığında, $Re=5 \times 10^4$ sonuçlarına benzer sonuçlar olduğu fakat ataletin artışı ile titreşim modlarının daha belirgin olduğu ve üçlü moddan daha fazla mod oluşmadığı gözlemlenmiştir.

$AR=1$ esnek kanatta uç girdaplarının daha etkin olmasından dolayı deformasyon değerleri $AR=2$ ve $AR=3$ esnek kanada nazaran daha azdır. AR 'nin artması ile uç girdaplarının kanat üzerindeki etkisi azalmış kanatta meydana gelen deformasyon artmıştır. $AR=2$ esnek kanatta özellikle düşük hücum açılarında LSB etkin olmadığı için deformasyon değeri $AR=1$ ve $AR=3$ 'e kıyasla daha fazladır. $\alpha=8^\circ$ 'den sonra LSB etkili olmaya başlamış ve maksimum deformasyon değerinde azalma meydana gelmiştir.

$AR=3$ esnek kanadın hız dağılımları ve TKE sonuçları incelendiğinde, düşük Re sayılarında atalet kuvvetleri, daha büyük Re sayılarına göre az olduğundan düşük hızlı akış bölgesi daha geniş iken Re sayısı artması ile düşük hızlı akış bölgesinin daraldığı görülmektedir.

2D esnek kanadın farklı hücum açıları ve Re sayılarında elde edilen duman teli deneyi sonuçlarına bakıldığında, kanat üzerindeki akışta düşük hücum açılarında oluşan hücum kenarı ayrılmaları ve LSB'nin diğer en/boy oranlarındakilere göre daha büyük ve belirgin olduğu, $\alpha=10^\circ-12^\circ$ 'den sonra kanadın tutunma kaybına girdiği ve $\alpha=20^\circ$ 'den sonra ise kanat üzerindeki akışın tamamen ayrıldığı görülmektedir. 2D kanatta uç girdapları oluşmamasından dolayı ayrılma kabarcıkları daha etkindir ve performans daha düşüktür. Ayrıca 2D kanatta hücum kenarı ayrılmaları büyümüş ve ayrılmaların daha belirgin ve büyük olduğu görülmüştür. 2D esnek kanat için tutunma kaybı açıları bütün Re sayıları için 10° iken C_{Lmax} ise $Re=2.5 \times 10^4$, $Re=5 \times 10^4$, $Re=7.5 \times 10^4$ için sırasıyla yaklaşık 1.05, 1.25 ve 1.45'dir. Diğer en/boy oranlı esnek kanatlara kıyasla tutunma kaybı açıları ve aerodinamik performans daha düşüktür. Bunun yanında sürüklenme kuvveti uç girdapları oluşumu olmadığından diğer esnek kanat sonuçlarına göre daha azdır. $Re=2.5 \times 10^4$ için düşük hücum açılarında tek modlu titreşim göze çarparken, $\alpha=10^\circ$ olması ile kanat açıklığı ve kordu boyunca iki modlu titreşimler gözlemlenmiş ve bu etki $\alpha=22^\circ$ 'ye kadar sürmüştür. $\alpha=24^\circ$ 'den sonra tek modlu titreşim

tekrar oluşmuştur. $Re=5.0 \times 10^4$ iken düşük hücum açılarında ($\alpha=0^\circ-6^\circ$) küçük girdaplar sebebiyle çok modlu titreşim görülmüş ve hücum açısının artması ile ($\alpha=8^\circ$ 'den sonra) esnek kanat üzerindeki ayrılmaların ve girdapların büyümesi ile iki modlu titreşimler baskın olmuştur. Hız dağılımları ve TKE dağılımları incelendiğinde, düşük Re sayılarında atalet kuvvetleri, daha büyük Re sayılarına göre az olduğundan ayrılmış akış ve düşük hız bölgesi daha geniş iken Re sayısı artması ile düşük hız bölgesinin küçüldüğü görülmektedir. Bu düşük hız bölgeleri duman deneyi sonuçlarında hücum kenarı ayrılmaları ve LSB kaynaklı girdap oluşum bölgelerine denk gelmektedir. $AR=1$ esnek kanadın $\alpha=8^\circ$ hücum açısında ve $Re=2.5 \times 10^4$, $Re=5.0 \times 10^4$ ve $Re=7.5 \times 10^4$ olmak üzere 3 farklı Re sayısında $k-k_L-\omega$ ve SST $k-\omega$ türbülansa geçiş benzeşim modeli ve ayrıca 2D esnek kanat için $\alpha=12^\circ$ 'de $Re=2.5 \times 10^4$ ve $Re=5.0 \times 10^4$ $k-k_L-\omega$ türbülansa geçiş benzeşim modeli kullanılarak yapılan FSI modellemesi sonuçları incelendiğinde, esnek kanat üzerinde meydana gelen deformasyon bölgesi geometrik olarak benzerlik göstermektedir. Öte yandan, 2D esnek membran kanat için GenIDLEST açık kaynak kodu kullanılarak yapılan sayısal modellemelerden elde edilen sonucun deneysel olarak elde edilen sonuç ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Hem rijit hem esnek kanat için GenIDLEST açık kaynak kodu kullanılarak yapılan sayısal modellemelerden elde edilen kuvvet sonuçları incelendiğinde, tüm hücum açısı değerlerinde, esnek membran kanadın hem deneysel hem de sayısal taşıma kuvveti katsayısı sonuçlarıyla kıyaslandığında rijit kanadın tüm hücum açısı değerlerinde en düşük taşıma kuvveti katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kanattaki esneklik kaldırmanın artmasını sağlamıştır. Bunun yanı sıra, ön gerilmedeki azalma esnek membran kanattaki aerodinamik taşıma kuvveti katsayısının artmasını sağlamıştır.

4.2. Öneriler

Öneri olarak, sunulan tez çalışmasından elde edilen sonuçlar doğrultusunda düşük Re sayılı akış rejimlerindeki esnek kanatlara sabit hücum açısı dışında çırpma hareketi vererek bu hareketin kanatta meydana getireceği akış olayları incelenebilir. Ayrıca, farklı rijitliklerdeki esnek malzemeler kullanılıp aerodinamik performansa etkisi araştırılabilir. İlaveten, farklı Re sayıları ve hücum açıları için sayısal çalışmalar arttırılabilir.

KAYNAKÇA

1. Mueller, T.J., DeLaurier, J.D., 2003. Aerodynamics of small vehicles, **Annual Review of Fluid Mechanics**, 35 (1): 89-111.
2. Shyy, W., Berg, M., Ljungqvist, D., 1999. Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles. **Progress in Aerospace Sciences**, 35 (5): 455-505.
3. Ho, S., Nassef, H., Pornsinsirirak, N., Tai, Y.C., Ho, C.M., 2003. Unsteady aerodynamics and flow control for flapping wing flyers. **Progress in Aerospace Sciences**, 39 (8): 635-681.
4. Whitehead, J., Gursul, I., 2006. Interaction of synthetic jet propulsion with aerofoil aerodynamics at low reynolds numbers. **AIAA Journal**, 44 (8): 1753-1766.
5. Heathcote, S., Martin, D., Gursul, I., 2004. Flexible flapping aerofoil propulsion at zero freestream velocity. **AIAA Journal**, 42 (11): 2196-2204.
6. Heathcote, S. Gursul, I., 2007. Flexible flapping aerofoil propulsion at low reynolds numbers. **AIAA Journal**, 45 (5): 1066-1079.
7. Heathcote, S., Wang, Z., Gursul, I., 2008. Effect of spanwise flexibility on flapping wing propulsion. **Journal of Fluids and Structures**, 24 (2): 183-199.
8. Heathcote, S., Gursul, I., 2007. Jet Switching phenomenon for a periodically plunging aerofoil. **Physics of Fluids**, 19 (2): 027104.
9. Alam, M., Sandham, N.D., 2000. Direct numerical simulation of short laminar separation bubbles with turbulent reattachment. **Journal of Fluid Mechanics**, 410:1-28.
10. Jones, L.E., 2008. Numerical Studies Of The Flow Around And Airfoil At low Reynolds number, PhD Thesis, University of Southampton.
11. Hu, H., Yang, Z., 2008. An experimental study of the laminar flow separation on a low-Reynolds-number airfoil. **Journal of Fluids Engineering**, 130 (5): 051101.
12. King, R.M., 2001. Study Of An Adaptive Mechanical Turbulator For Control Of Laminar Separation Bubbles, Graduate Faculty of North Carolina State University, Aerospace Engineering, Degree of Masters of Science Thesis, 109.
13. Chklovski, T., 2012. Pointed-tip wings at low reynolds numbers, University of Southern California, USA

14. Attinello, J.S., 1961. Design And Engineering Features Of Flap Blowing Installations. Boundary Layer And Flow Control. Its Principles And Applications. New York Pergamon Press, 52.
15. Sturm, H., Dumstorff, G., Busche, P., Westermann, D., Lang, W., 2012. Boundary layer separation and reattachment detection on airfoils by thermal flow sensors. **Sensors**, **12** (11): 14292-14306.
16. Tani, I., 1964. Low speed flows involving bubble separations. **Progress in Aerospace Sciences**, **5**: 70-103.
17. Gaster, M., 1967, The structure and behaviour of separation bubbles, RC R and M, 3595
18. Genç, M.S., Karasu, İ., Açikel, H.H., 2012. An experimental study on aerodynamics of NACA2415 aerofoil at low Re numbers. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **39**: 252-264.
19. Tan, A. C., Auld, D. J., 1992. Study of laminar separation bubbles at low reynolds number under various conditions, 563-566. *11th Australasian Fluids Mechanics Conference*, 1992, University of Tasmania, Hobart, Australia.
20. Mueller, T. J., 1999. Aerodynamic measurements at Low Reynolds Numbers for Fixed Wing MAVs. Dev. Oper. UAVs Mil. Civ. Appl, 1-32.
21. Gerakopulos, R., Boutilier, M. S., Yarusevych, S., 2010. Aerodynamic characterization of a naca 0018 airfoil at low reynolds numbers. *In The 40th Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, Chicago, Illinois. AIAA (Vol. 4629).
22. Giuni, M., Green, R. B., 2013. Vortex formation on squared and rounded tip. **Aerospace Science and Technology**, **29** (1): 191-199.
23. Shyy, W., Jenkins, D.A. Smith, R.W., 1997. Study of adaptive shape airfoils at low Reynolds number in oscillatory flows. **AIAA Journal**, **35** (9): 1545-1548.
24. Gordnier, R., 2008. High fidelity computational simulation of a membrane wing airfoil, AIAA-2008-614, *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 7-10 January, Reno, Nevada.
25. Béguin, C., Breitsamter, N., 2014. Effects of membrane pre-stress on the aerodynamic characteristics of an elasto-flexible morphing wing. **Aerospace Science and Technology**, **37**: 138-150.
26. Timpe, A., Zhang, Z., Hubner, J., Ukeiley, L., 2013. Passive flow control by membrane wings for aerodynamic benefit. **Experiments in Fluids**, **54** (3): 1-23.

27. Rojratsirikul, P., Wang, Z., Gursul, I., 2008. Unsteady aerodynamics of membrane aerofoil, *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 7-10 January 2008, Reno, NV.
28. Rojratsirikul, P., Wang, Z., Gursul, I., 2009. Unsteady fluid–structure interactions of membrane airfoils at low Reynolds numbers. **Experiments in Fluids**, **46** (5): 859-872.
29. Rojratsirikul, P., Wang, Z., Gursul, I., 2010. Effect of pre-strain and excess length on unsteady fluid–structure interactions of membrane airfoils. **Journal of Fluids and Structures**, **26** (3): 359-376.
30. Rojratsirikul, P., Wang, Z., Gursul, I., 2010. Unsteady aerodynamics of low aspect ratio membrane wings, AIAA-2010-0729, *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 4-7 January 2010, Orlando, Florida.
31. Rojratsirikul, P., Genc, M. S., Wang, Z., Gursul, I., 2011. Flow-induced vibrations of low aspect ratio rectangular membrane wings. **Journal of Fluids and Structures**, **27** (8): 1296-1309.
32. Genç, M.S., Özkan, G., Özden, M., Kırış, M.S., Yıldız, R., 2018. Interaction of tip vortex and laminar separation bubble over wings with different aspect ratios under low Reynolds numbers. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, 0954406217749270.
33. Koca, K., Genç, M. S., Açikel, H. H., Çağdaş, M., Bodur, T., M., 2018. Identification of flow phenomena over NACA 4412 wind turbine airfoil at low Reynolds numbers and role of laminar separation bubble on flow evolution. **Energy**, 144:750-764.
34. Genç, M.S., 2013. Unsteady aerodynamics and flow-induced vibrations of a low aspect ratio rectangular membrane wing with excess length. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **44**, 749-759.
35. Tamai, M., Murphy, J., Hu, H., 2008. An experimental study of flexible membrane airfoils at low reynolds numbers, AIAA 2008-580, *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 7-10 January 2008, Reno, Nevada.

36. Arbós-Torrent, S., Ganapathisubramani, B., Palacios, R., 2013. Leading-and trailing-edge effects on the aeromechanics of membrane aerofoils. **Journal of Fluids and Structures**, **38**: 107-126.
37. Bleischwitz, R., de Katb, R., Ganapathisubramanic, B., 2015. Aeromechanics of membrane wings in ground-effect. *In 45th AIAA Fluid Dynamics Conference* (p. 2764).
38. Wrist, A. H., Zhang, Z., Pepley, D., & Hubner, J. P., 2015. Aerodynamic comparison of flat and cambered frames for flexible mav wings. *In 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting* (p. 1299).
39. Attar, P. J., Morris, B. J., Romberg, W. A., Johnston, J. W., Parthasarathy, R. N., 2012. Experimental characterization of aerodynamic behavior of membrane wings in low-reynolds-number flow. **AIAA journal**, **50** (7): 1525-1537.
40. Galvao, R., Israeli, E., Song, A., Tian, X., Bishop, K., Swartz, S., Breuer, K., The aerodynamics of compliant membrane wings modeled on mammalian flight mechanics, *36th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Jun. 2006, San Francisco*, AIAA 2006-2866, CA5-8
41. Hu, H., Kumar, A. G., Abate, G., Albertani, R., 2010. An experimental investigation on the aerodynamic performances of flexible membrane wings in flapping flight. **Aerospace Science and Technology**, **14** (8): 575-586.
42. Viieru, D., Tang, J., Lian, Y., Liu, H., Shyy, W., 2006. Flapping and flexible wing aerodynamics of low Reynolds number flight vehicles. AIAA paper, 503.
43. Hefeng, D., Chenxi, W., Shaobin, L., Zhen, S. X., 2015. Numerical research on segmented flexible airfoils considering fluid-structure interaction. **Procedia Engineering**, **99**:57-66.
44. Lian, Y., Shyy, W., 2007. Laminar-turbulent transition of a low reynolds number rigid or flexible airfoil. **AIAA journal**, **45** (7):1501-1513.
45. Ke, S., Zhigang, W., Chao, Y., 2008. Analysis and flexible structural modeling for oscillating wing utilizing aeroelasticity. **Chinese Journal of Aeronautics**, **21**(5): 402-410.
46. Gordnier, R. E., Attar, P. J., 2014. Impact of flexibility on the aerodynamics of an aspect ratio two membrane wing. **Journal of Fluids and Structures**, **45**: 38-152.

47. Song, A., Tian, X., Israeli, E., Galvao, R., Bishop, K., Swartz, S., Breuer, K., 2008. Aeromechanics of membrane wings with implications for animal flight. **AIAA journal**, **46** (8): 2096-2106.
48. Schreck, S.J., Sørensen, N. N., Robinson, M.C., 2007. Aerodynamic structures and processes in rotationally augmented flow fields. **Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology**, **10** (2): 159-178.
49. Chen, T.Y., Liou, L.R., 2011. Blockage corrections in wind tunnel tests of small horizontal-axis wind turbines. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **35** (3): 565-569.
50. Genç, M. S., Açikel, H. H., Demir, H., Özden, M., Çağdaş, M., Isabekov, I., 2015. Effect of tip vortices on membrane vibration of flexible membrane wings with different aspect ratios, in: *10th International Conference on Experimental Fluid Mechanics*, 17–20 November 2015, Liberec, Czech Republic.
51. Genç, M. S., Özden, M., Açikel, H. H., Demir, H., Isabekov, I., 2015, Unsteady flow over flexible membrane wings at different low Reynolds numbers, in: *10th International Conference on Experimental Fluid Mechanics*, 17–20 November 2015, Liberec, Czech Republic, 2015.
52. Demir, H., Genç, M. S., 2017. An experimental investigation of laminar separation bubble formation on flexible membrane wing. **European Journal of Mechanics-B/Fluids**, **65**, 326-338.
53. Genç, M. S., Demir, H., Açikel, H. H., 2016. Time dependent laminar separation bubble formation and deformation over flexible membrane wing, in: *The International Symposium on Sustainable Aviation (ISSA-2016)*, 29 May-1 June 2016, Istanbul, Turkey.
54. Gopalakrishnan, P., Tafti, D. K., 2010. Effect of wing flexibility on lift and thrust production in flapping flight. **AIAA journal**, **48** (5): 865-877.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Hacımurat DEMİR
Uyruğu: Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri: 1987-Iğdır
e-posta: hmdemir@aksaray.edu.tr
Yazışma Adresi: Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
 Makine Mühendisliği Bölümü B Blok No:105
 68100/AKSARAY

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gaziantep Üniversitesi, Makine Mühendisliği (İng)	2014
Lisans	Gaziantep Üniversitesi, Makine Mühendisliği (İng)	2012
Lise	Milli Eğitim Vakfı Anadolu Lisesi, Iğdır	2005

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2012-Halen	Aksaray Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

SCI Makale:

- Özahi, E., Demir, H. (2013). A model for the thermodynamic analysis in a batch type fluidized bed dryer. Energy, 59, 617-624.
- Özahi, E., Demir, H. (2014). Presentation of a test rig with its experimental procedure and uncertainty analysis of measurements for batch type fluidized bed drying of corn and unshelled pistachio nut. Measurement, 53, 117-127.
- Özahi, E., Demir, H. (2015). Drying performance analysis of a batch type fluidized bed drying process for corn and unshelled pistachio nut regarding to energetic and exergetic efficiencies. Measurement, 60, 85-96.

4. Demir, H., & Genç, M. S. (2017). An experimental investigation of laminar separation bubble formation on flexible membrane wing. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 65, 326-338.

Uluslararası Bildiri:

1. Özahi Emrah, Demir Hacımurat (2012). Recent Developments on Fluidized Bed Drying of Particles. 7th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids-CHoPS 2012, Friedrichshafen, GERMANY
2. Özahi Emrah, Demir Hacımurat (2013). A Case Study on the Drying Performance of Batch Type Fluidized Bed Dryers at Constant Drying Temperatures. 12th International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation (ISPRA '13), 254-259, Clare College Cambridge, UNITED KINGDOM, UK
3. Özahi Emrah, Demir Hacımurat (2013). Fluidized Bed Drying Performance in Terms of Drying Rates. Proceedings of the 8th International Conference on Continuum Mechanics (CM '13), 51-55, Rhodes Island, GREECE
4. Özahi Emrah, Demir Hacımurat (2014). A Study on Energetic Efficiency of a Batch Type Fluidized Bed Dryer. Proceedings of the 5th European Conference of Mechanical Engineering (ECME'14), 168-172, Florence, ITALY
5. M. Serdar GENÇ, Mustafa ÖZDEN, Halil Hakan AÇIKEL, Hacımurat DEMİR, Iliasbek ISABEKOV (2015). Unsteady Flow over Flexible Wings at Different Low Reynolds Numbers, 10th International Conference on Experimental Fluid Mechanics, (EFM15), 17-20 November 2015, Prague, CZECH REPUBLIC
6. Hacımurat DEMİR, Mustafa ÖZDEN, M. Serdar GENÇ, Mücahit ÇAĞDAŞ (2015). Numerical Investigation of Flow on NACA4412 Aerofoil with Different Aspect Ratios, 10th International Conference on Experimental Fluid Mechanics, (EFM15), 17-20 November 2015, Prague, CZECH REPUBLIC
7. M. Serdar GENÇ, Halil Hakan AÇIKEL, Hacımurat DEMİR, Mustafa ÖZDEN, Mücahit ÇAĞDAŞ, Iliasbek ISABEKOV (2015). Effect of Tip Vortices on Membrane Vibration of Flexible Wings with Different Aspect Ratios, 10th International Conference on Experimental Fluid Mechanics, (EFM15), 17-20 November 2015, Prague, CZECH REPUBLIC

8. Mücahit ÇAĞDAŞ, M. Serdar GENÇ, Hacımurat DEMİR, Owl-Inspired Wind Turbine Blade, The International Symposium on Sustainable Aviation (ISSA-2016), 29 May - 1 June 2016, Istanbul, TURKEY.
9. M. Serdar GENÇ, Hacımurat DEMİR, Halil Hakan AÇIKEL, Time Dependent Laminar Separation Bubble Formation And Deformation Over Flexible Membrane Wing, The International Symposium on Sustainable Aviation (ISSA-2016), 29 May - 1 June 2016, Istanbul, TURKEY.
10. Genç G., Küçüksaraç M., Ulutürk A., Karasu İ., Karakaya B., Demir H., Investigation of Wind Distribution According to Dominant Wind Direction at Erciyes University, "2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2017), ADANA, TÜRKİYE, 25-27 Ekim 2017, pp.1-7
11. Açıkel H.H., Demir H., Özden M., Genç M.S., Özkan R., Karakaya B., Optimization of Twist Angle in Vertical Axis Wind Turbine Airfoils, "1. International Scientific and Vocational Studies Congress, NEVŞEHİR, TÜRKİYE, 5-8 Ekim 2017, pp.1-4
12. Demir H., Koca K., Özkan R., Açıkel H.H., Karakaya B., Genç M.S., Optimization of Length of Support Rods in Vertical Axis Wind Turbine, " First International Conference on Energy Systems Engineering, KARABÜK, TÜRKİYE, 2-4 Kasım 2017, pp.5-10
13. Demir H., Koca K., Özden M., Genç M.S., Karasu İ., Özkan R., A Numerical Study on Flow Control at Bumpy Airfoils, "First International Conference on Energy Systems Engineering, KARABÜK, TÜRKİYE, 2-4 Kasım 2017, pp.1-4
14. Genç G., Demir H., Açıkel H.H., Özden M., Koca K., Genç M.S., Numerical Investigation of Aeroelastic Behavior of Airfoil, "2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2017), ADANA, TÜRKİYE, 25-27 Ekim 2017, pp.1-9
15. Demir H., Karasu İ., Açıkel H.H., Özden M., Koca K., Genç M.S., The Identification of Laminar Separation Bubble and Transition Onset on Wind Turbine Blade at Low Reynolds Number, " 2nd International Conference On Advances In Science, ICAS 2017, İSTANBUL, TÜRKİYE, 13-15 Eylül 2017, pp.1-5

Ulusal Bildiri:

1. Özahi Emrah, Demir Hacımurat (2013). Akışkan Yataklı Bir Kurutucuda Enerji ve Ekserji Açısından Bir Termodinamik Analiz. *ULIBTK'13* 19. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 1070-1076.

