

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI

MİKRO HAVA ARAÇLARINDA YUNUSLAMA HAREKETİ
SONUCU OLUŞAN AERODİNAMİK PARAMETRELERİN
ROBOTİK SİSTEMDE TESPİTİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Metin UZUN

Danışmanlar
Yrd. Doç. Dr. MUSTAFA SOYLAK
Doç. Dr. MUSTAFA SERDAR GENÇ

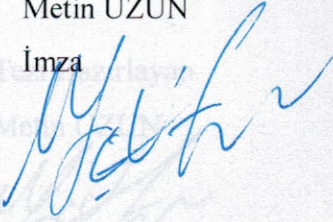
Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FYL-2013-4786 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Ocak 2015
KAYSERİ

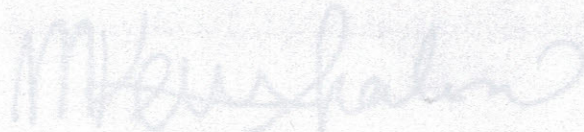
Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Metin UZUN

İmza



Doçent
Yrd.Doç.Dr. Mustafa STYLA



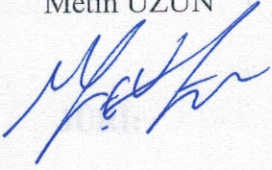
Anabilim Dalı Başkanı

Prof.Dr. Mustafa Kemal APALAK

Yrd.Doç.Dr. Mustafa SOYLAK danışmanlığında Metin UZUN tarafından hazırlanan **Mikro Hava Araçlarında Yunuslama Hareketi Sonucu Oluşan Aerodinamik Parametrelerin Robotik Sistemde Tespiti** adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

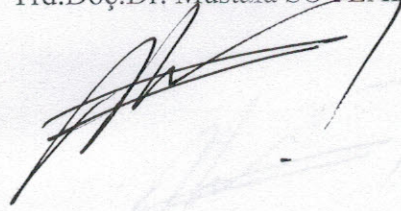
Tezi Hazırlayan

Metin UZUN



Danışman

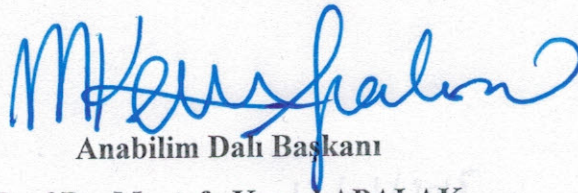
Yrd.Doç.Dr. Mustafa SOYLAK



Başkan : Yrd. Doç. Dr. Mustafa SOYLAK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Veyisel ERTURUN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tuğrul OKTAY



Anabilim Dalı Başkanı

Prof. Dr. Mustafa Kemal APALAK

ONAY

Bu tezin kabulü Enstitü

sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Kazım KESİNOĞLU

Enstitü Müdürü

Yrd.Doç.Dr. Mustafa SOYLAK danışmanlığında **Metin UZUN** tarafından hazırlanan “**Mikro Hava Araçlarında Yunuslama Hareketi Sonucu Oluşan Aerodinamik Parametrelerin Robotik Sistemde Tespiti**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

Bununla birlikte Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne FYL 2013-4786 kodlu araştırma projesi desteğinden dolayı çok teşekkür ederim. 06 /01 / 2015

Ayrıca tez çalışmam boyunca desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen Halil Hakan ve Gökhan Özcan'a, yoğun tez çalışması dönemimde desteklerini esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

JÜRİ:

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Mustafa SOYLAK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Veysel ERTURUN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tuğrul OKTAY

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 13/01/2015 tarih ve 2015/02-08 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Kazım KEŞLİOĞLU

Enstitü Müdürü

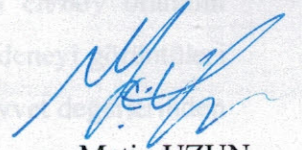
MİKRO HAVA ARAÇLARININ YÜZÜŞME HAREKETİ SONUCU OLUŞAN AERODİNAMİK PARAMETRELERİN ROBOTİK SİSTEMDE

TEŞEKKÜR

Tezimin yürütülmesinde ve sonuçlandırmasında yardımlarını ve katkılarını esirgemeyen 1. danışmanım Yrd.Doç.Dr. Mustafa SOYLAK ve 2. Danışmanım Doç.Dr. Mustafa Serdar GENÇ hocalarıma çok teşekkür ederim.

Bununla birlikte Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne FYL-2013-4786 kodlu araştırma projesi desteğinden dolayı çok teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmam boyunca desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen Halil Hakan Açıklık ve Gökhan Özcan' a, yoğun tez çalışması dönemimde desteklerini esirgemeyen eşime aileme çok teşekkür ederim.



Metin UZUN

Kayseri, Ocak 2015

Anahtar Kelimeler: Düşük Re sayısı, Laminar ayrılma kabarcığı, Yüzüşme hareketi

MİKRO HAVA ARAÇLARINDA YUVARLANMA HAREKETİ SONUCU OLUŞAN AERODİNAMİK PARAMETRELERİN ROBOTİK SİSTEMDE TESPİTİ

Metin UZUN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Aralık 2014

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Mustafa SOYLAK

ÖZET

Bu tez çalışmasında 3 farklı Düz Plaka (AR1, AR1.5, AR2) ve 2 farklı NACA 2415 (AR1, AR1.5) kanat profillerine ait en/boy oranı (AR) değişiminin aerodinamik parametrelere etkisi, bu profillerin 5×10^4 Re sayısında farklı hücum açılarında ve farklı konumlardan alınmış duman görüntüleri ve farklı hücum açısı (0-10, 5-15, 10-20, 15-25) aralıklarında farklı Re sayılarında (5×10^4 , 75×10^3 , 10^5) ki sinüs biçimli sade yunuslama hareketi deneysel çalışmaları sunulmuştur. Bu çalışma en/boy oranının değişiminin C_L ve C_D katsayılarını etkisinin nasıl olduğunu, duman deneyi görüntüleri ile akış durumlarını gözlemlemeyi ve yunuslama hareketinin statik kuvvet değerlerinden ne kadar fazla taşıma kuvveti oluşturduğunu araştırmayı amaçlamıştır. Farklı kanat profilleri ile yapılan bu çalışmada AR ve Re sayısı değerinin artmasının taşıma kuvvetini artırdığı sürüklenme katsayısını ise azalttığı görülmüştür. Yunuslama hareketi sonucu oluşan aerodinamik parametre değerleri statik kuvvetlerle karşılaştırıldığında, yunuslama hareketinin taşıma kuvvetini önemli derecede arttırdığı görülmüştür. En yüksek taşıma katsayısı değeri 21° hücum açısında NACA 2415 AR 1,5 profilinde görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Düşük Re sayısı, Laminer ayrılma kabarcığı, Yunuslama hareketi

DETECTION OF AERODINAMICS PARAMETERS OBTAINED VIA ROLLING MOTION OF MICRO AIR VEHICLES IN ROBOTIC SYSTEM

Metin UZUN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Science

M.Sc. Thesis, December 2014

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mustafa SOYLAK

ABSTRACT

In this study 3 different flat plates (AR1, AR1.5, AR2) and two different NACA 2415 (AR1, AR1.5) width / height ratio of the airfoil (AR) on the aerodynamic parameters of the change in the number $Re \ 5 \times 10^4$ of this profile as offensive smoke images taken from different angles and different location and angle of attack (0-10, 5-15, 10-20, 15-25) at different Reynolds numbers in the range (5×10^4 , 75×10^3 , 10^5) of simple sinusoidal pitching motion of experimental studies are presented. In this study, width / height ratio of the change in how the effects of C_L and C_D coefficients, to observe the flow condition with smoke test images and pitching motion was aimed to investigate the form how much load bearing capacity of the static force values. Made with different blade profiles in this study the increase of the Re AR, and the count value of the drag coefficient increases the load bearing capacity, decreases. Compared with the pitch of the resulting parameter values are static aerodynamic force generated, carrying the pitching movement strength was found to significantly increase. Maximum lift coefficient value of 210 NACA 2415 AR angle of attack was seen in 1.5 profile.

Keywords: Low Reynolds number, laminar separation bubble, Pitching motion

İÇİNDEKİLER

MİKRO HAVA ARAÇLARINDA YUNUSLAMA HAREKETİ SONUCU OLUŞAN AERODİNAMİK PARAMETRELERİN ROBOTİK SİSTEMDE TESPİTİ

	<u>Sayfa</u>
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL ve ONAY.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
KISALTMA VE SİMGELER.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
 GİRİŞ	 1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Giriş	2
1.2. Düşük Reynolds Sayısı.....	2
1.3. Sınır Tabaka	4
1.4. Laminer ayrılma kabacığı.....	5
1.5. Deneysel Metodlar ile Aerodinamik İnceleme.....	6

1.6. Kuşların Hareketi [6]	8
1.6.1. Güçlendirilmiş Uçuş: Çırpma	13
1.9. Literatür Çalışması	21

2. BÖLÜM

DENEYSEL YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Giriş	25
2.2. Deneysel Çalışmalar	26
2.2.1. Tünelin Türbülans Şiddeti ve Karakteristiği	26
2.2.2. Belirsizlik Analizi	26
2.3. En/Boy Oranı (AR) Değişiminin Aerodinamik Parametrelere Etkisi.....	28
2.4. Duman Deneyi İle Akış Görüntüleme	36

3. BÖLÜM

Yunuslama Yapan Kanat Deneyleri

3.1. Giriş	56
-------------------------	-----------

4. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma	73
4.2. Sonuç	74

4.3. Öneriler	75
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ.....	80

KISALTMA VE SİMGELER

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birimi</u>
c	Veter Uzunluğu	m
α	Hücum Açısı	o
ρ	Yoğunluk	kg/m ³
V_{∞}	Serbest Akım Hızı	m/s
CL	Taşıma Katsayısı	
CD	Sürükleme Katsayısı	
Re	Reynolds Sayısı	
AR	Aspect Ratio	

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Kullanılan tünel için farklı katsayılara ait belirsizlikler	28
---	----

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1. Hava araçlarının uçtuğu hız ve Re sayısı değişimi.....	3
Şekil 1. 2. Kanat profili üzerinde duman deneyi görüntüsü.....	7
Şekil 1. 3. Doğal kuşların manevra kabiliyetleri:	8
Şekil 1. 4. Doğal kuşlar beden kontrolü ve kuyruk ayarını yaptıkları görülmektedir....	10
Şekil 1. 5. Doğal kuşlar sudan, yerden ve ağaçlarını üstünden yükselebilmek için kanatlarını, bedenlerini, ayaklarını uyumlu bir şekilde kullanıyorlar	10
Şekil 1. 6. Martı gibi kuşlar kanatlarını esnettikleri zaman hızlarını bunun yanında yön kontrollerini de ayarlarlar.....	11
Şekil 1. 7. İniş anında kuşlar kanatlarını kaldırma kuvvetini azaltmak için toplarlar ve rüzgarı kontrol edebilmek için flap şekli oluştururlar ve inecek uygun bir yer ayarlarlar.....	11
Şekil 1. 8. Esnek kanatlı mikro hava araçları.....	13
Şekil 1. 9. Çeşitli kuşların kanat şekilleri oklarla gösterilmiştir.....	14
Şekil 1.10. Biyolojik kuşların çırpma kanat modelleri(ileri ve geri çevrim, esnek ve asimetrik kanat hareketleri, sekiz şekil modeli) gösterilmiştir.....	15
Şekil 1.11. Kanat açıklığının hız-vektör diagramı	17
Şekil 1.12. Böceklerin çırpma döngüsü boyunca yarım döngüleri. Not: Hücum kenarı her zaman öndedir.....	20
Şekil 1. 13. Böcek çırpma hareketinde sekiz şeklinin kinematiği.....	20
Şekil 2. 1. Temsili Rüzgar Tüneli	26
Şekil 2. 2. Farklı NACA 2415 kanat profillerinin farklı Re sayılarında taşıma katsayısı grafikleri a)Re=50000, b) Re=75000 c) Re=100000).....	29
Şekil 2. 3. Şekil 2.3 NACA 2415 Kanat profillerinin farklı Re sayılarında hücum açısı-sürüklenme katsayıları a) Re=50000, b) Re=75000, c) Re=100000	31
Şekil 2. 4. Farklı Re sayılarında 3 farklı Düz plaka kanat profillerinin taşıma katsayısı grafikleri a) Re=50000, b) Re=75000, c) Re=100000	33
Şekil 2. 5. Farklı Re sayılarında 3 farklı Düz plaka kanat profillerinin sürüklenme katsayısı grafikleri a) Re=50000, b) Re=75000, c) Re=100000	35
Şekil 2. 6. AR 1 NACA 2415 profilinin 5^0 hücum duman görüntüleri, Re=50000	37

Şekil 2. 7. AR 1 NACA 2415 profili 10^0 hücum açısında farklı bölgelerinden alınmış duman görüntüleri, $Re=50000$	38
Şekil 2. 8. AR 1 NACA 2415 profili 15^0 hücum açısında alınmış duman görüntüleri,	39
Şekil 2. 10. AR 1 NACA 2415 profili 25^0 hücum açısında duman görüntüleri,	40
Şekil 2. 11. AR 1,5 NACA 2415 profili 5^0 hücum açısında duman görüntüleri,	41
Şekil 2. 12. AR 1,5 NACA 2415 profili 10^0 hücum açısında duman görüntüleri,	42
Şekil 2. 13. AR 1,5 NACA 2415 profili 15^0 hücum açısında duman görüntüleri,	43
Şekil 2. 14. AR 1,5 NACA 2415 profili 20^0 hücum açısında duman görüntüleri,	44
Şekil 2. 15. AR 1,5 NACA 2415 profili 25^0 hücum açısında akış görüntüleri,	44
Şekil 2. 16. AR 1 Düz Plaka profili 5^0 hücum açısında duman görüntüleri,	45
Şekil 2. 17. AR 1 Düz Plaka profili 10^0 hücum açısında duman görüntüleri,	46
Şekil 2. 18. AR 1 Düz Plaka profili 15^0 hücum açısında duman görüntüleri,	47
Şekil 2. 19. AR 1 Düz Plaka profili 20^0 hücum duman görüntüleri,	48
Şekil 2. 20. AR 1 Düz Plaka profili 25^0 hücum açısında duman görüntüleri,	48
Şekil 2. 21. AR 1,5 Düz Plaka profili 5^0 hücum açısında duman görüntüleri,	49
Şekil 2. 22. AR 1,5 Düz Plaka profili 10^0 hücum açısında duman görüntüleri,	50
Şekil 2. 23. AR 1,5 Düz Plaka profili 15^0 hücum açısında duman görüntüleri,	51
Şekil 2. 24. AR 1,5 Düz Plaka profili 20^0 hücum açısında duman görüntüleri,	52
Şekil 2. 25. AR 1,5 Düz Plaka profili 25^0 hücum açısında duman görüntüleri,	52
Şekil 2. 26. AR 2 Düz Plaka profili 5^0 hücum açısında farklı bölgelerinden alınmış duman görüntüleri	53
Şekil 2. 27. AR 2 Düz Plaka profili 10^0 hücum açısında farklı bölgelerinden alınmış duman görüntüleri	54
Şekil. 2. 28. AR 2 Düz Plaka profili 15^0 hücum açısında farklı bölgelerinden alınmış duman görüntüleri	54
Şekil 2. 29. AR 2 Düz Plaka profili 20^0 hücum açısında farklı bölgelerinden alınmış duman görüntüleri	55
Şekil 3. 1. Yunuslama hareketi yapan deney düzeneği	57
Şekil 3. 2. Robota gönderilen sinus dalgaları	58
Şekil 3. 3. NACA 2415 AR 1 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketinin taşıma katsayısı grafiği	59
Şekil 3. 4. NACA 2415 AR 1,5 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile taşıma katsayısı grafiği	61

Şekil 3. 5. Düz Plaka AR 1 profilinin farklı farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile taşıma katsayısı grafiği	62
Şekil 3. 6. Düz Plaka AR 1,5 profilinin farklı farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile taşıma katsayısı grafiği	64
Şekil 3. 7. Düz Plaka AR 2 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketinin taşıma katsayısı grafiği.....	65
Şekil 3. 8. NACA 2415 AR 1 profilinin farklı farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile sürüklenme katsayısı grafiği	66
Şekil 3. 9. NACA 2415 AR 1,5 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile sürüklenme katsayısı grafiği	68
Şekil 3. 10. Düz Plaka AR 1 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile sürüklenme katsayısı grafiği	69
Şekil 3. 11. Düz Plaka AR 1,5 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile sürüklenme katsayısı grafiği	70
Şekil 3. 12. Düz Plaka AR 2 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile sürüklenme katsayısı grafiği	72

GİRİŞ

Son yıllarda yapılan araştırmalarda yunuslama, yuvarlanma ve çırpma hareketlerini içeren mikro hava araçları ve insansız hava araçları üzerinde ilgi oldukça artmıştır. Mikro hava araçları ve insansız hava araçları, kuşlar, böcekler ve rüzgar trbınlerin de düşük Re sayılı akışlar görülür. Düşük Re sayılı akışlarda kararsızlık ve laminar ayrılma kabarcığı oldukça sık görülür ve yüksek Re sayılı akışlara göre tutunma kaybı açısı dşrtr, bu yüzden düşük Re sayılı akışların kararlılıkla incelenmesi ve araştırılması büyük önem taşımaktadır.

İnsansız hava araçları ve mikro hava araçlarının haritalama, keşif ve askeri alanda oldukça ihtiyaç duyulmasından dolayı, bu konularda yapılan çalışmalara hız verilmiştir. Kuş hareketlerine benzer şekilde tasarlanan insansız hava araçlarında yapılacak sayısal ve deneysel çalışmalar bu alanda yeni tasarımlara ve kazanımlara yol açacaktır. Bu alanda yapılacak performans artırma, sürüklemeyi azaltma, laminar ayrılma kabarcığını yok etme çalışmaları aerodinamik alanda yapılacak önemli kazanımlar sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında NACA 2415' in farklı 2 AR profili ve Düz Plaka' anın 3 farklı AR profilinin farklı hücum açılarında taşıma ve sürükleme katsayıları, duman deneyi yardımıyla akış görüntülenmesi ve robotik sistem kullanarak yunuslama hareketi yapan mikro hava aracı tasarlanması amaçlanmıştır.

Bu amaçla birinci bölümde genel bilgiler aktarılmış ve literatür araştırması yapılarak güncel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde taşıma-sürükleme katsayı değerleri belirlenerek AR' un taşıma ve sürüklemeye etkisi sonuçlar irdelenerek yorumlanmıştır, ayrıca bu bölümde duman görüntüleri yardımıyla akış yapısı irdelenmiştir. nc bölümde yunuslama hareketi yapan kanat hareketinin statik kuvvet değerlerinden farkı yorumlanmıştır. Dördüncü ve son bölümde sonuçlar özetlenmiş ve öneriler aktarılmıştır.

1.BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Giriş

Mikro, mini ve taktik insansız hava araçlarının uçuş rejiminde düşük türbülans seviyeli ($<0.1\%$) ve düşük Reynolds (Re) sayılı akımlarla karşılaşmaktadır. Re sayısının düşük olmasının sebebi, adı geçen hava araçlarının kanatlarının birim uzunluklarının ya küçük olması (1-10 cm), ya da akım hızlarının düşük olması (1-10 m/s) veya bunların her ikisinin de aynı anda mevcut olmasıdır. Bazen de yüksek irtifalarda bulunan düşük hava yoğunluğu ve yüksek kinematik viskoziteye bağlı olarak da düşük Re sayısı elde edilmektedir.

1.2. Düşük Reynolds Sayısı

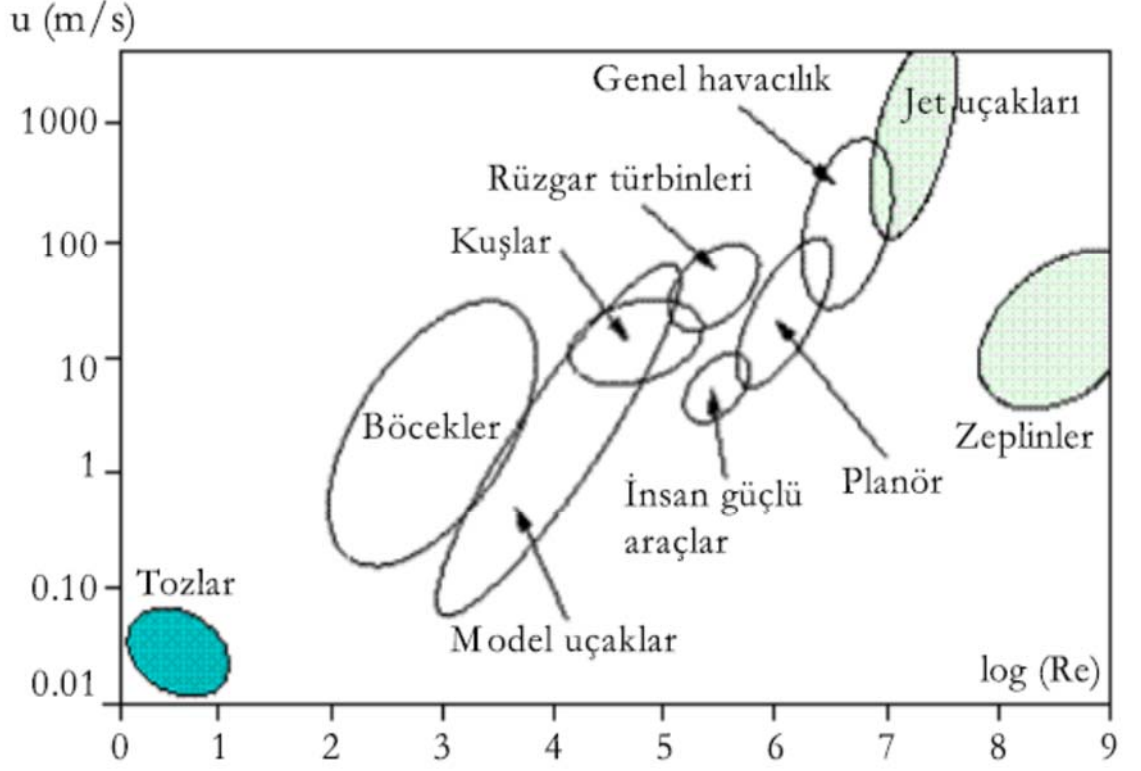
Reynolds (Re) sayısı, bir akışkanın atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlere olan oranına denir. Reynold sayısı akışın laminar veya türbülanslı yapıda olduğunu tanımlamaya yarayan bir boyutsuz parametredir. Osborne Reynold tarafından 1883 yılında boru içindeki akış için tanımlanan boyutsuz sayı olan Re sayısı, veter boyu c olan bir kanat üstündeki akış için şu şekilde tanımlanır:

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} c}{\mu} \quad (1.1)$$

Burada ρ yoğunluğu, V_{∞} serbest akım hızını, c veter boyunu, μ dinamik vizkoziteyi tanımlamaktadır.

50000-500000 Re sayısı arasındaki dış akış, düşük Reynolds sayısı akışı olarak tanımlanır. Klasik yüksek hızlı uçakların Reynolds sayısı 10^7 - 10^9 Arasında değişirken mikro hava araçlarının Reynolds sayıları 10^5 - 10^6 arasında değişmektedir.

$50000 < Re < 1000000$ aralığında olan akış rejimleri aerodinamiği düşük Re sayılı aerodinamik olarak adlandırılır. 500000 altında düşük ve çok düşük Re sayısı uygulama alanları; mikro hava araçları, gaz türbinli motorların türbin ve kompresör kanatçıkları, insansız hava araçları, deniz taşıtlarının kontrol yüzeyleri, rüzgar türbinleri, kara taşıtları, kuş ve böcek uçuşları olarak düşünülebilir.



Şekil 1. 1. Hava araçlarının uçuğu hız ve Re sayısı değişimi[1]

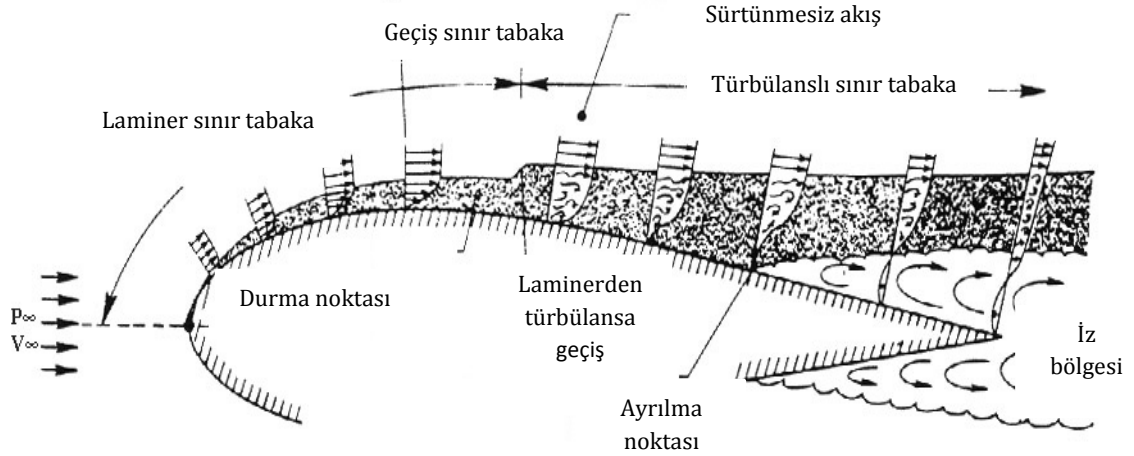
Şekil 1.1 de hava araçlarının uçuğu hız ve Re sayısı değişimi grafik olarak verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kuşlar düşük hızlarda (1-10 m/s) uçtukları için ve kanatlarının birim uzunluğunun küçük olmasından (1-10 cm) dolayı Re sayısı değişimi 10^4 - 10^5 arasında değişmektedir. Böceklerin kanat açıklığı daha küçük olmasından dolayı Re sayısı değişimi ise 10^2 - 10^3 arasında değişmektedir. Genel havacılık ve jet uçaklar ise uçtukları hız aralığı ve kanatlarının büyük olması nedeniyle yüksek Re sayısına (10^7 - 10^8) sahiptirler.

İnsansız hava araçlarına ve mikro hava araçlarına olan ilgi daha hafif malzemelerinin üretilebilmesi ve nano düzeyde sensörlerinin üretilmesiyle günden güne artmıştır. İnsansız hava araçları, hem askeri görevlerde hem de sivil amaçlı afet sonrası canlı

taraması gibi amaçlarda kullanılabilir. Düşük Re sayısı aerodinamiğine sahip diğer bir uygulama alanı olan rüzgar türbinlerine de ilgi, günümüzdeki yenilenebilir enerji kaynaklarına ilginin artmasıyla daha da artmıştır. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki; düşük Re sayılı akışlar, yüksek Re sayılı akışlara göre farklı karakteristiklere sahiptir. Çünkü düşük Re sayılı akışlarda viskoz kuvvetler yüksek Re sayılı akışlara göre oldukça baskındır ve istenmeyen sonuçlar doğurur. Laminer ayrılma kabarcığı bunların önemli ve en çok karşılaşılan sonucudur. Laminer ayrılma kabarcığı hava araçlarında titreşime ve gürültüye sebep olarak aerodinamik performansı olumsuz yönde etkiler. Araştırma sonuçlarına göre laminer ayrılma kabarcığına maruz kalmış bir hava aracı için hücum açısının artmasıyla kaldırma kuvvetinde oluşan değişim daha az, sürüklenme kuvvetinde oluşan değişim ise daha çok olduğu görülmüştür. Bazı durumlarda ise akım yüzeye yapışmadan kanat yüzeyini terk eder bu durumda ise tutunma kaybı olur.

1.3. Sınır Tabaka

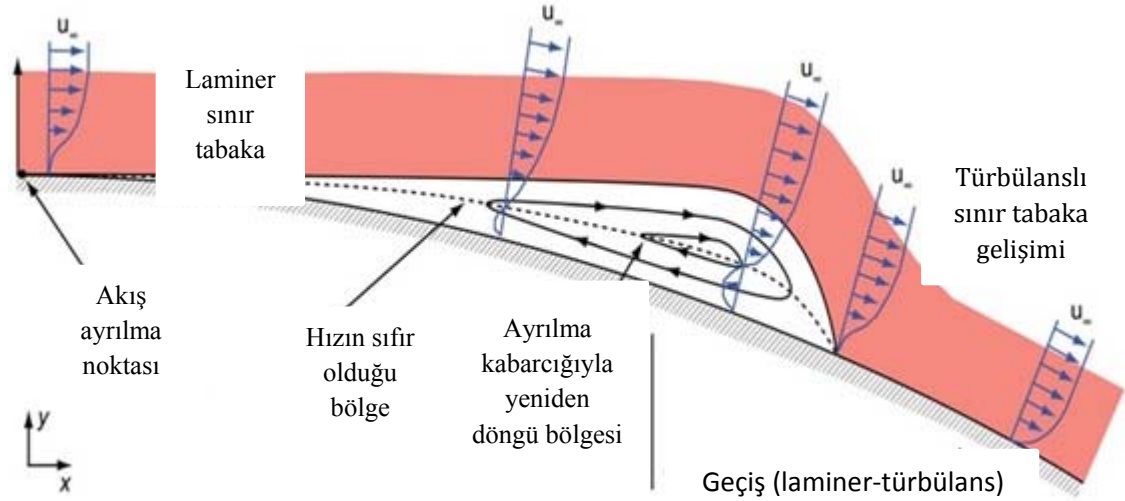
Akışkanlar mekaniğinde, akışkanın katı yüzeyle buluştuğu noktada kaymama koşulu nedeniyle hız sıfır kabul edilir, profilin etkisi dolayısıyla akış katı yüzeyden uzaklaştıkça akışkanın hızı artmaya başlar. Akışkanın hızının sıfır olduğu nokta ile serbest akım hızına ulaştığı nokta arasında ki bölgeye sınır tabaka denir. Sınır tabaka incelemesini 3'e ayrılabilir: bunlar laminer sınır tabaka, türbülansa geçişli sınır tabaka ve türbülanslı sınır tabakadır. Şekil 1.2 de görüldüğü gibi akımın düzenli ayrılmalara karşı kararlı olduğu bölge ve diğer tabakalara göre nispeten daha ince olan tabaka laminer sınır tabakadır. Akış kanat üstünde aktıkça diğer bir ifadeyle Re sayısı arttıkça, türbülansa geçişli sınır tabaka oluşur. Akış kararlılığının bozulmaya başladığı bölge türbülansa geçişli sınır tabakadır, hem laminer sınır tabaka hemde türbülanslı sınır tabaka akış özellikleri görülür. Akışın kararlılığının bozulduğu ve akışın türbülanslı olarak devam ettiği bu bölge ise türbülanslı akış olarak tanımlanır. Türbülanslı bölgede küçük girdaplar oluşup türbülanslı akım ayrılması da bu bölgede yaşanır.



Şekil 1. 2. Bir kanat profili üzerinde oluşan sınır tabaka gösterimi [2].

1.4. Laminer ayrılma kabacığı

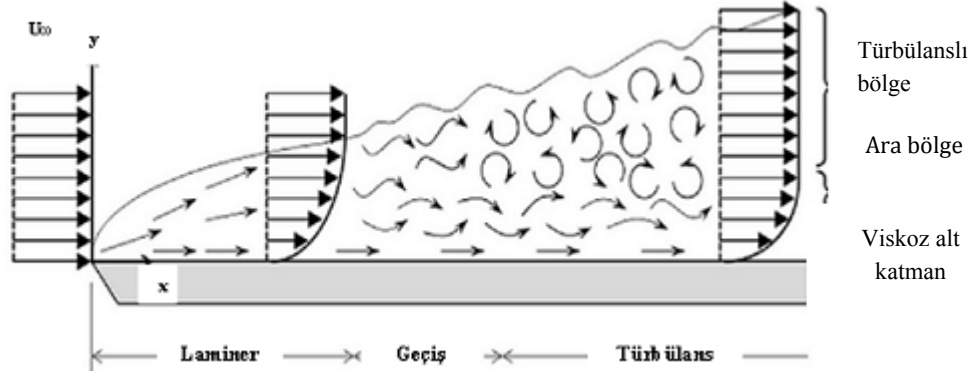
Kanat profili üzerinden geçen akış hız durumuna göre laminer türbülanslı akış olarak 2 ye ayrılır. Kanat profilinin hücum kenarında ki akış laminer akışa sahiptir. Akış firar kenarına doğru ilerledikçe türbülanslı akışa geçer.



Şekil 1. 3. Laminer ayrılma kabarcığı [3].

Şekil 1.3 te görüldüğü gibi akış hücum kenarında laminer iken firar kenarına doğru ters basınç gradyanları ve viskoz kuvvetler daha baskın geliyor ve ayrılma kabarcığı meydana geliyor. Ayrılma kabarcığından dolayı geri akış ters hız profilleri oluşur.

Türbülanslı bölgede ise akış enerji kazanır ve tekrar yüzeye tutunur. Türbülanslı ayrılma oluncaya kadar akış yüzeye yapışır ve düzgün bir şekilde devam eder.



Şekil 1. 4. Laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş bölgeleri [4].

Şekil 1.4 te Laminer akış bölgesi, geçiş bölgesi ve türbülanslı bölge gösterilmiştir. Akış hücum kenarında laminer, kararlı ve düzgün bir yapıya sahiptir ve türbülanslı bölgede kararsız yapıdadır ve akım çizgileri şekilde görüldüğü gibi düzensiz şekilde dağılmıştır. Türbülanslı akış bölgesinde küçük girdaplar oluşup akış ayrılmasında görülebilir.

1.5 Deneysel Metodlar ile Akış Görüntüleme

Cisimler üzerinde oluşan hava akımının hareketi hakkında net bilgi edinebilmek için akış görüntüleme tekniklerine ihtiyaç vardır. Rüzgar tünellerinde yapılan deneysel çalışmalarda katı cisimlerin aerodinamik kuvvet ve moment parametreleri ölçülebilmektedir. Ancak profillerin üzerinde oluşan akım hakkında net bilgi vermemektedir ve kanat üzerindeki akış olayları çıplak gözle görülememektedir. Akış hareketlerini görülebilir hale getirebilmek için yapılan bazı akış görüntüleme teknikleri mevcuttur. Bunlara bazı örnekler duman deneyi, iplik deneyleri, yağ deneyidir. Bu akış görüntüleme tekniklerinin yanısıra modern akış görüntüleme teknikleri olan parçacık (Particle Image Velocimeter =PIV) akım görüntüleme tekniği örnek verilebilir. PIV sistemi rüzgar tüneli, su tüneli ile akış deneylerinde yaygın olarak kullanılır. PIV sistemi kullanılarak istenilen hacim veya düzlemdeki hız komponentleri ölçülebilir. Akışkanın hız komponentleri, lazer ile aydınlatılan yüzeyden art arda iki fotoğraf çekilir ve çekilen iki fotoğraf arasında çapraz-korelasyon (cross-correlation) yöntemi

uygulanarak hız komponentleri hesaplanır. Püskül deneyinde gözlemlenecek katı cisim üzerine püsküller yerleştirilir ve akış profil üzerinde geçmeye başladığında püsküller akış durumuna göre şekil alır, bu durum fotoğraflanarak profil hakkında bilgi edinilir. Yağ deneyinde ise profil üzerine yağ sürülür ve profil çevresine akış yönlendirildiğinde profil üzerinde ki yağ akış etkisiyle bazı yerde hareket eder laminar ayrılma kabarcığı olan yerde ise toplanır. Bu durum profil üzerindeki akışın yüzeye etkisini gözlemleyebilmemize olanak sağlar. Duman deneyi de gözleme konusunda yağ deneyine benzerlik gösterir. İletken bir tel üzerinden makine yağı akıtılır ve bu tele elektrik akımı verildiğinde yağ yanar ve bu sayede duman oluşur. Oluşan duman serbest akış ile profilin üzerine yönelir ve dumanın profil üzerinde ki şekli akışa göre değişir, böylelikle akış hakkında görsel bilgi elde edilir. Örnek duman deneyi görüntüsü şekil 1.6 da verilmiştir.



Şekil 1. 2.Kanat profili üzerinde duman deneyi görüntüsü

1.5.2. Aerodinamik Kuvvet Değerlerinin Ölçümü

Kuvvet ölçüm sistemleri yük hücreleri kullanılarak gerinim pullarının (strain-gauge) Wheatstone köprüsü oluşturacak şekilde birleştirilmesiyle tasarlanır. Gerinme pulları uygulanan kuvvete göre meydana gelen deformasyon sonucunda boyları uzayan ve bu uzama miktarına bağlı olarak elektriksel dirençleri değişen hücrelerdir. Yük hücrelerinin

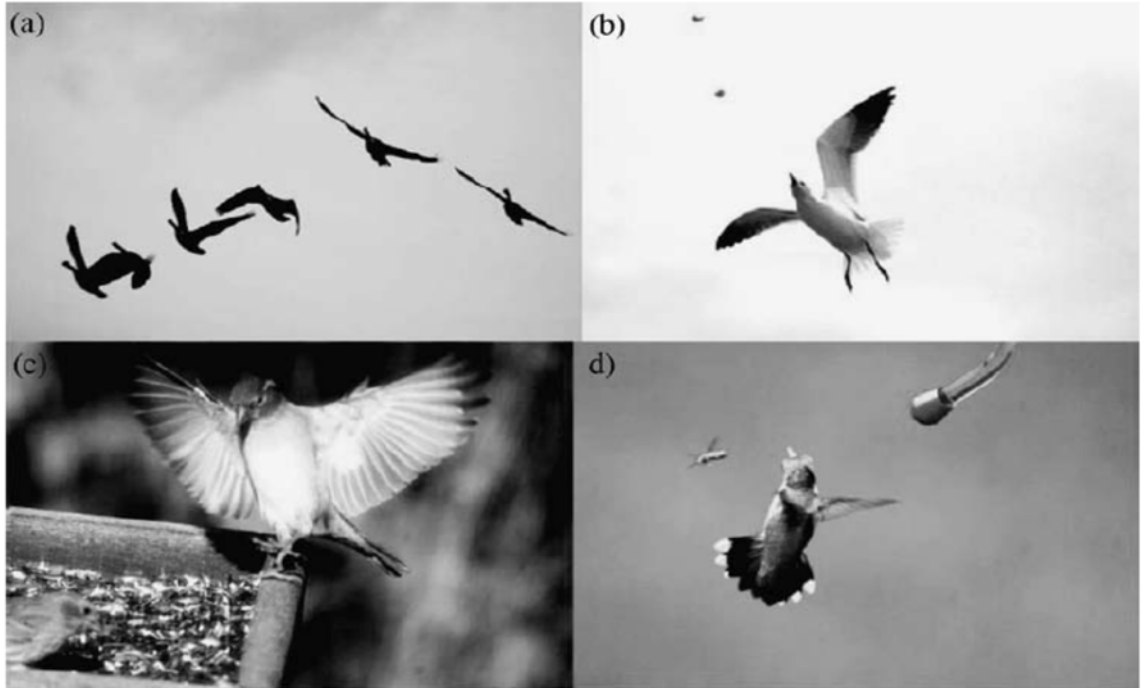
Çalışma mantığı Wheatstone köprüsündeki dirençlerin karşılıklı çarpımları eşittir prensibine dayanmaktadır. Yük hücrelerine kuvvet uygulandığında kuvvetle orantılı olarak boydaki değişme, direnci de değiştirecektir, bu değişimde çıkış voltaj değerini değiştirecektir. Voltaj değeri ölçülerek elektrik sinyallerine dönüştürülerek veri toplama kartı ve yazılımlar vasıtasıyla kuvvet cinsinden ölçülür. Ortam sıcaklığı gibi direnci etkileyecek diğer faktörlerin etkisini elimine etmek amacıyla ek devreler ve sistemler kullanılmaktadır [5].

1.6. Kuşların Hareketi [6]

Kuşların [6] hareketi diye anlatacağımız bu bölüm ‘‘Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers’’ adlı kitabın bir bölümünden eviri yapılarak alınmıştır. Kuşların ve böceklerin hareketi konusunda Türkçe kaynak sıkıntısı olduğu için yabancı kaynaklardan eviri yapılması ihtiyacı oluşmuştur. Yapılan bu eviri hem kendi tez çalışmamı yapmama yardımcı olmuştur hemde daha sonra bu konularda bir çalışma yapacak kişiler için kaynak olacaktır.

Kuşlar yarasa, ve böceklerin uçuş karakteristikleri yüzyıllardır insanları büyülemiştir. 1994 yılında Dial tarafından uçan hayvanların birçok türü incelenmiş ve neredeyse milyonlarca böcek türü, 13000 sıcak kanlı omurgalı (kuşlar, memeliler) türünün uzayda yer aldığını görmüştür. Bedenin verimli hareketiyle uzayda kuşlar doğanın en güzel hareketinden birini gerçekleştirirler. Havacılık teknolojisi son 100 yıldır gelişiyor olsa da, 150 milyon yıldır evrimleşen doğanın harika makinaları hala etkileyiciliğini sürdürmektedir. İnsanoğlunu saniyede bedeninin 3-4 katı hareket ettiğini düşünürsek, bir yarış atı saniyede bedeninin 7 katı hareket ediyor, çıta bedeninin 18 katı uzunluğu kadar, süpersonik uçaklar örneğin; siyah kuş olarak da adlandırılan SR-71 yaklaşık 3 mach seviyesinde hareket ediyor, yaygın olarak bilinen kaya güvercini şaşırtıcı olarak ara ara 50 mil/sa hıza ulaşır ki buda saniye de bedeninin 75 katı büyüklükte bir mesafeyi kapsar. Avrupa sığırcığı saniyede bedeninin 120 katı uzunlukta hareket etme kapasitesine sahiptir. Kılıç kırlangılarının bazı türleri ise oldukça şaşırtıcı olarak saniyede bedenlerinin 140 katı kadar hareket edebilirler. Yüksek akrobasi uçağının dönme oranı saniyede 720 derece, Barn Swallow kuşunun ise saniyede 5000 derecedir.

En genel hava araçlarında kuvvetine müsaade edilen G ölçüsü 4-5 G iken, bazı askeri hava araçların da 8-10 G arasındadır. Ancak birçok kuş türü rutin olarak 10-14 G arası maruz kalır. Böylesine süper manevra ve uçuş karakteristiklerinin öncelikli sebepleri bedenlerinin boyutları ile ilgili olarak ‘ölçeklendirme kanunu’ nu bunun yanı sıra sezgisel ama çok gelişmiş algılama, navigasyon ve kontrol yeteneklerini içerir. Mc Masters ve Handerson’ ın söylediği gibi insanlar eğlence veya ticari olarak, hayvanlar ise mesleki olarak uçarlar. Şekil 1.7 biyolojik kuşların çeşitli manevra kabiliyetlerini göstermektedir. Bu yeteneklerinin insan yapımı makinalar tarafından taklit edilmesi zordur. Beden şekilleri ve kuyruk ayarlamasıyla çırpma hareketini birleştiren doğal kuşlar tam olarak ve anında hedefi takip edebilirler. Şekil 1.8 de sinekkuşu hayli zor bir iş yönetiyor ve hassas uçuş kontrolü yapıyor. Havalanabilmesi için kuşların bedenleri, ayakları, kuyrukları ve kanatları eş zamanlı görev yapar. Şekil 1.9 a göre onlar sudan, karadan ve ağaçların üzerinden uçmaya başlayabilirler, bunun sonucunda değişik ve karmaşık şekiller sergilerler. Şekil 1.10 da gösterildiği gibi süzülme anında, hızlarını ve yönlerini kontrol edebilmek için kanatlarını esnetirler. İniş yaparken şekil 1.5 te olduğu gibi kanatlarını kaldırma kuvvetini azaltmak için katlarlar ve rüzgarı yönetebilmek için kanatlarını bir flap gibi kullanırlar ve incek yerlerini uygun bir şekilde ayarlarlar.



Şekil 1. 3. Doğal kuşların manevra kabiliyetleri: (a) Kanada kazların rüzgara karşı tutumu (b) Martının hız kontrolü ve hedefe varışı (c) Bir ispinozun hassas dokunuşu; (d) Bir sinekkuşunun arıya karşı kendini savunması [6].



Şekil 1. 4. Doğal kuşlar hedeflerine tam olarak ve ani bir şekilde varabiliyorlar. Burada sinek kuşları çırpın kanatlarını kullanıyor, uçuş kontrolü sağlamak için beden kontrolü ve kuyruk ayarını yaptıkları görülmektedir [6].



Şekil 1.5. Doğal kuşlar sudan, yerden ve ağaçlarını üstünden yükselebilmek için kanatlarını, bedenlerini, ayaklarını uyumlu bir şekilde kullanıyorlar [6].

1990'ların sonlarından beri mikro hava aracı olarak adlandırılan cisimler önemli derecede dikkat çekmiştir ve mühendislikte, bilim çevresindeki ilgisi artmaya devam etmektedir. 10-20 m/s uçuş hızı, böcek ve küçük kuşların bedenleri ile karşılaştırmalı olarak mikro hava araçlarını araç olarak gerçek anlamda boyutları maksimum 15 cm veya daha az olarak tanımlanıyor.



Şekil 1. 6. Martı gibi kuşlar kanatlarını esnettikleri zaman hızlarını bunun yanında yön kontrollerini de ayarlarlar.[6]



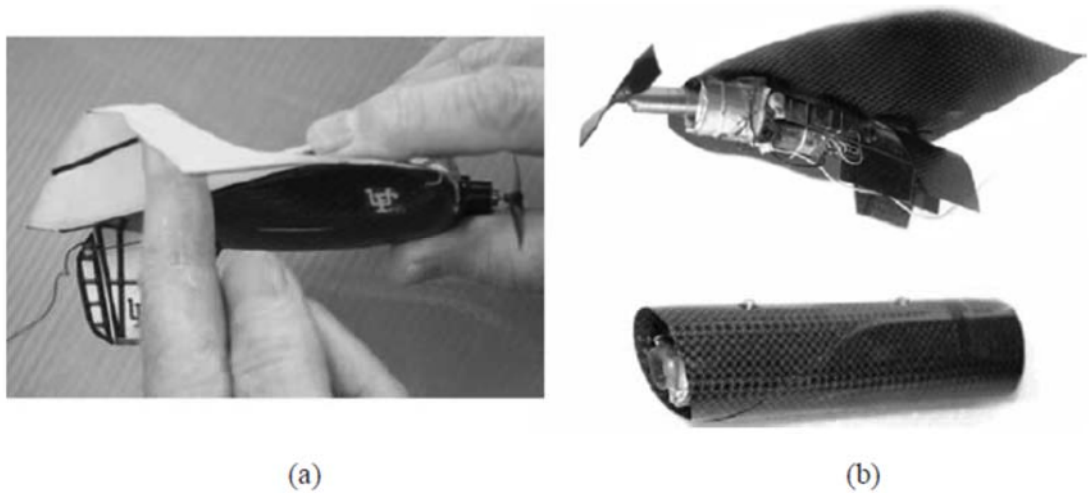
Şekil 1. 7. İniş anında kuşlar kanatlarını kaldırma kuvvetini azaltmak için toplarlar ve rüzgarı kontrol edebilmek için flap şekli oluştururlar ve incek uygun bir yer ayarlarlar[6].

Bir video kamera veya sensör ile donatılmış bu araçlar keşif ve gözlem, uzak ve tehlikeli bölgelerde biyokimyasal algılama yapabilirler. Yapısal, madde teknolojisi, güç ünitelerinin küçültülmesi, iletişim, gözlem ve kontrol üniteleri gibi birçok konudaki hızlı ilerlemeler başarılı mikro hava araçları geliştirdi. Sabit kanata dayalı, çırpın kanat ve döner kanatlı bütün mikro hava araçları türleri araştırılmıştır. Şekil 1.12 (a) da Ifju tarafından 15 cm boyutunda yapılmış, sabit kanat ve esnek kanat konseptleri kullanılmıştır. Şekil 1.8(b) de Muren tarafından tasarlan dönmeye çapı 8,5 cm olan, döner kanatlı mikro hava aracı gösterilmiştir. Şekil 1.8(c) da Jones ve Platzer tarafından tasarlanan çift kanatlı mikro hava aracı gösterilmiştir. Burada hibrit kanat ve sabit kanat tasarımı kullanılmış ve çırpın kanat güç üretir sabit kanat ise gerekli taşıma kuvvetini sağlar.

Şekil 1.6(d) de Kawamura tarafından son zamanlarda tasarlanan mikro hava aracı hem taşıma kuvveti hemde güç üretimi için çırpın kanat mantığına dayanır ayrıca bazı uçuş kontrol kapasitelerine de sahiptir. Şekil 1. 12 de Ifju ve arkadaşları tarafından tasarlanan esnek kanatlı mikro hava araçlarının özellikleri daha detaylı olarak verilmiştir.

Her yıl düzenlenen uluslararası mikro hava aracı yarışmaları mikro hava araçlarının gelişimini teşvik edecek önemli forumlar oluşturdu . Örneğin yarışma kategorilerinden biri 600 m uçmak, 1.5m x 1.5m alanında ki görüntü yakalamak ve görüntüyü merkeze iletmek. Başarıyla tamamlama misyonuna sahip en küçük mikro hava aracı galip ilan edilir. İlk yarışmadan beri, kazanan mikro hava araçlarının boyutları git gide küçülüyor ve şimdi maksimum boyutlar neredeyse 10 cm.

Düşük reynolds sayılı uçuşlarda çalışan mikro hava araçları ile insan yapımı yüksek reynold sayılı uçuşlarda kullanılan hava araçları karşılaştırıldığında mikro hava araçları düşük taşıma/sürükleme oranı gibi olumsuz aerodinamik özelliklere sahiptir.



Şekil 1. 8. Esnek kanatlı mikro hava araçları (a) ani gelişen aerodinamik kuvvetlerden şekil değişikliğinden faydalanarak kurtulabilir, ihtiyaç duyulduğunda (b) kolayca yük alabilir.

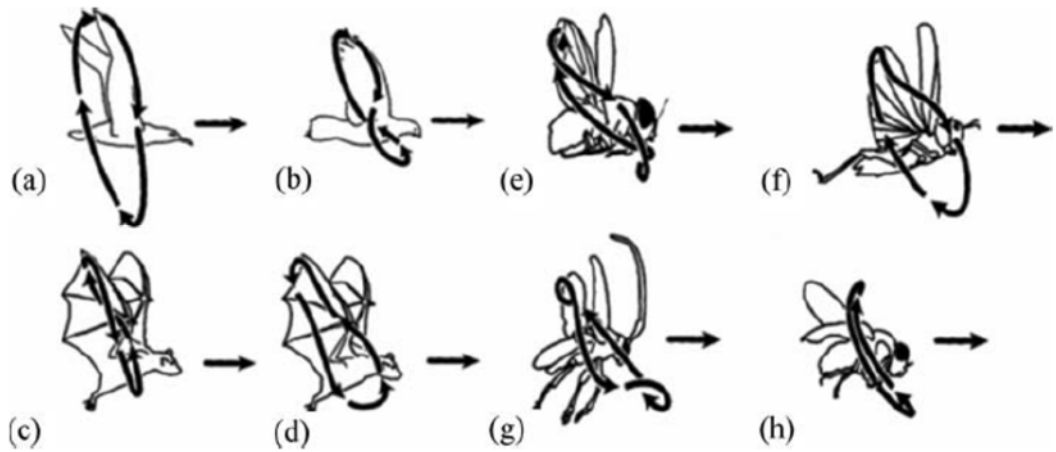
10^4 - 10^5 gibi düşük Re sayılı akışlarda hareket eden mikro hava araçları, düşük taşıma/sürüklenme oranı gibi olumsuz durumlara maruz kalırlar. Diğer bir yandan mikro hava araçlarının küçük geometrik boyutları düşük tutunma kaybı açıları ve daha iyi yapısal beka gibi olumlu özellikleri bulunur.

Mühendisler ve biyologlar arasında iş birliğiyle çalışabilecek önemli kaynaklar var, çünkü mikro hava araçları ve biyolojik kuşlar ağırlık, uçuş, hız ve uçuş çevresi gibi benzer özelliklere sahiptir. Özellikle biyolojik toplum önemli derecede kaynaklara sahip. Bu kitapta anlatmak istediğimiz amaç biyolojik kuşlar ile insan yapımı mikro hava araçları arasında ki aerodinamik ilişkidir.

Bu bölümde, öncelikle çırpın kanatlı araçların kinematikini, taşıma kuvveti, güç üretimi gibi parametreleri içeren doğadaki çırpın kanatları tanıtacağız. İkinci olarak ise kuşların enerjileri ve mekanizmaları ile ilgili olarak ölçeklendirme kanunundan bahsedeceğiz. Daha sonra kuşların uçuşlarındaki sürüklenme ve güç kuvvetleri arasındaki bağlantıyı tartışacağız.

1.6.1. Güçlendirilmiş Uçuş: Çırpma

Taşıma kuvveti üretmek için birçok biyolojik kuş tarafından kullanılan süzülme için alternatif metot çırpın kanatlı uçuştur. Döner kanat ile çırpın kanat aerodinamiği arasındaki benzerlik kısıtlı olmasına rağmen birkaç anahtar ifadeyle açıklanabilir. Merkez şafttan devamlı dönen döner kanatlı helikopter örnek verilirse, rotor çevresinde ki göreceli akış kaldırma kuvveti üretir. Benzer olarak çırpın kanat omuz eklemi boyunca döner ve her bir yarım çevrim sonunda çırpma tersine döner.



Şekil 1.9. Çeşitli kuşların kanat şekilleri oklarla gösterilmiştir. a) albatros, hızlı gidiş (b) güvercin, yavaş gidiş (c) yarasa, hızlı uçuş (d) yarasa, yavaş gidiş (e) sinek (f) çekirge (g) haziran böceği (h) meyve sineği

Helikopterler ve biyolojik kuşlar hızlanmak için süzülmeden ileri uçuşa kadar benzer teknikler kullanırlar. Helikopterler ileri uçuş için yatayda eğilimli olarak rotorları dönderirler. Rotorun bükülmesi ne kadar dik olursa, hızlanması da o kadar hızlı olur. Ayrıca biyolojik kuşlar kanatlarının aşağı doğru hareketinde çırpın kanat düzlemlerini hem aşağı hemde ileri doğru yönlendirirken; kanadın yukarı yönlü hareketinde aşağı ve ileri doğru hareket yaptırır. Daha hızlı uçmak için aşağı yukarı hareketinin frekansını artırarak biyolojik kuşlar daha dikey çevrimli uçuş oluştururlar. Biyolojik kuşlar hızlarını azalttıklarında, kanatlarını daha yatay konuma getirme eğilimindedirler, benzer şekilde helikopterler rotorlarının yönünü değiştirirler.

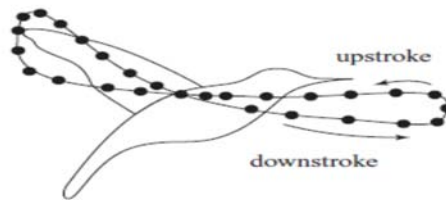
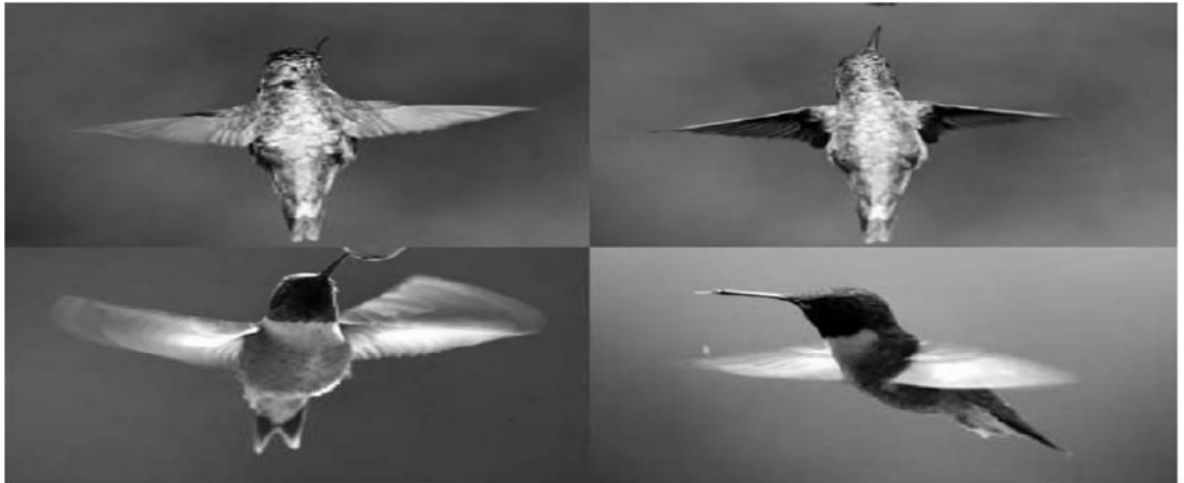
Kuşlar, böcekler ve yarasalar güç üretmek ve kaldırma kuvvetini yönetmek için ileri uçuş ve süzülüş durumunda farklı flap çeşitliliği yönetirler. Daha büyük kuşlar daha basit kanat tipine sahiptirler. Örneğin şekil 1.9 de ki albatrosun oval tip yol ilişkilendirilmiştir. Küçük kuşlar daha karmaşık kanat yapılarına sahiptirler. Şekil 1.9 de çekirge ve meyve sineğinin kanatlarının oldukça kavisli olduğu, güvercinin oluşturduğu sekiz şekli, haziran böceği ve sineğin daha karmaşık kanat yapısı gösterilmiştir.

1.7. İleri Uçuş

Doğal kuşların aerodinamik performansı incelendiği zaman, çırpma hızı ile ileri hız arasındaki indirgenmiş frekans olarak bilinen oran önemli bir parametredir.

$$k = \frac{\omega c}{2U_{ref}}$$

ω, c, U_{ref} sırasıyla; çırpma kanadın açısal hızı, kanadın genişliği ve referans hızıdır. İndirgenmiş frekansın artmasıyla kararsızlık etkisi artar, ve bu yüzden ileri hıza bağlı olarak özel türlerin kuvvetini hesaplamak için farklı teknikler tasarlanmıştır.



Şekil 1.10. Biyolojik kuşların çırpma kanat modelleri(ileri ve geri çevrim, esnek ve asimetrik kanat hareketleri, sekiz şekil modeli) gösterilmiştir [6].

Yavaş ileri hareketlerde, hem indirgenmiş frekans hemde kanat çarpma genliği yüksek olma eğilimindedir, buda oldukça düzensiz akış yapısını doğurur. Taşıma Hat Teorisine göre; kanat üzerinde ki taşıma kuvveti girdapların uzunluğuna bağlıdır. Firar kenarı girdapları(uç girdaplar) sınır girdaplar gibi aynı dolaşım büyüklüğündedir. Kanadın aşağı yönlü hareketinin başlangıcında ve bitişinde, yani çırpma hızının yönü değiştiği zaman, Kelvin'in dolaşım teorisine göre başlama ve son bulma girdapları firar kenarında oluşur, bu iki ters girdap iki tip girdapı bağlar ve sonucunda halka oluşur. Bazı kular başlangıç girdaplarını oluşturmak için el çırpma ve fırlatma mekanizmalarını kullanır ve kanadın aşağı hareketinin ilk bölümünde maksimum taşıma kuvvetinin gecikmesini azaltır.

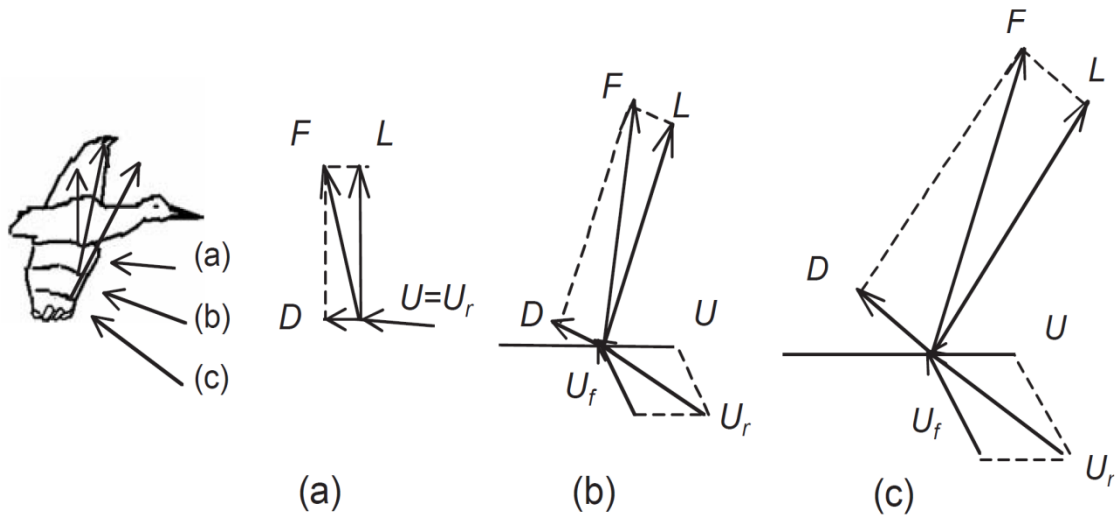
Hızlı ileri uçuşlarda, indirgenmiş frekans ve kanat çırpma genliği düşük olma eğilimindedir ve devam eden dalgalı girdap tüplerinin çiftini canlandırır veya çizgi girdapları yaklaşık olarak kanat ucundadır.

Bu gibi durumlarda, kanadın dış kısmının serbest-akış yönüyle birlikte kıvrılması olağan değildir, kanadın yukarı doğru hareketinde sadece kol-kanat aerodinamik taşıma kuvvetine katkıda bulunur.

Çırpma hareketi tarafından oluşturulan taşıma ve güç kuvvetlerini tanımlamak için daha sofistike araçlara ihtiyaç vardır. Ancak, indirgenmiş frekans açısından çırpma hızı ile ileri hız arasındaki ilişkiyi inceleyerek kararsız yapının yapının rolünü anlayabiliriz. Ayrıca kuvvet etkidiğinde kanadın farklı bölgelerinin fonksiyonları farklılık gösterir. Vektörel olarak gösterilen göreceli akış hızını (U_r) açıklayarak, bu kavramı daha iyi anlayabiliriz. U_r , kanat uzunluğu boyunca kanadın her bölgesinde aerodinamik kuvvet olan F' i meydana getirdiği için F kuvveti büyüklüğü ve doğrultuyu değiştirecektir.

$$U_r = U + U_f + w_i .$$

Burada U_r kuşların ileri hızını, U_f çırpma hızını, w_i ise indirgenmiş hızı gösterir. Kısmi hız kanat üzerindeki aerodinamik kuvveti tanımlar. Yüksek ileri hız için indirgenmiş hız düşüktür ve büyük oranda ihmal edilebilir. Daha büyük kanat açıklığıyla birlikte U_r nin yönünü ve büyüklüğünü etkileyen U_f artar ve yönünü değiştirir. Kanat açıklığı boyunca her bir kanat bölgesinde ki aerodinamik kuvveti U_r tanımladığı için, yön ve büyüklük olarak aerodinamik kuvvet değişebilir. Değişim şekil 1.14 te gösterilmiştir.



Şekil 1.11. Kanat açıklığının hız-vektör diagramı[26]

Şekil 1.11 Hızlı ileri uçuş için farklı çırpma kanat açıklığının uzunluğunun yerleşiminin hız-vektör diagramı verilmiştir. Burada, taşıma ve sürüklenme kuvvetleri ileri ve yerel çırpma hızlarını oluşturan etkin hıza dayanması olarak tanımlanıyor. Bütün araçlar için, ileri hız normal olarak dikey yönde tanımlanıyor , sürüklenme/güç yatay yöndedir. Elde edilen kuvvet vektörü F' e göre, araçların sürüklenmesi iç kanat tarafından gücü ise dış kanat tarafından yönetilir.

Kanadın aşağı doğru hareketi boyunca kanadın iç kısmının kaldırma ve sürüklenme kuvveti ürettiği bilinir, oysa kanadın dış kısmı güç ve kaldırma kuvveti üretir. Kanadın aşağı doğru hareketi boyunca üretilen net aerodinamik kuvvet yukarı doğru ve ileri doğru harekette kullanılır, bu kuvvet taşıma kuvveti ve güç üretir. Bu olumlu kuvvet dağılımını elde etmek için, kanatlar bükülmüş olmalıdır. Kanatlar büküldüğünde, kanadın hareketi boyunca optimal bağıl hız kanadın her bir bölgesinde elde edilebilir. Elde edilen aerodinamik kuvvetin yönünü göreceli hız tanımladığı için, kanat kökünün arkasına doğru yönlendirilebilir, kanat açıklığı boyunca hareket ettiğinde yavaş yavaş öne doğru kayar. Kanat ucunda elde edilen ileri yöndeki aerodinamik kuvvet noktaları, kaldırma kuvveti ve güç üretir. Fakat bu tür kesin olmayan ve incelenmesine ihtiyaç olan resimler dikkatli bir şekilde araştırılmalıdır.

Kalkış, iniş ve süzülme gibi çeşitli görevler için uçan hayvanlar farklı mekanizmalar kullanırlar. Hatta ileri uçuş için, kanatlarını ve beden hareketlerini uçuş hız aralığında

uçarken değiştirirler. Saksağanlara göre güvercinler yüksek kanat yüküne ve yüksek aspect ratio (kanat açıklığının kanat kesitine oranı) sahiptirler. Her iki türde özellikle orta dereceli uçuşlarda, yavaşlama ve hızlanma anında sabit hız uçuşunun aşamalarını değişimli olarak yaparlar. Kuşlar bu aşamalarındaki kanat çırpma kinematiğini ayarlarlar ve yavaşlarken çırpma hareketinin olmadığı sık sık gösterirler. Düzenli uçuş hızlarında buldukları şey dikey uçuş hızıyla birlikte kanat çırpma frekansının kayda değer biçimde değişmediğidir. Bunun yerine, artan uçuş hızıyla birlikte dikeyde gövde açısı kısmen azalır, dolayısıyla yüksek hızlardaki positif güç isteğinden düşük hızlarda ağırlık desteğine kanadın baskın özelliği geçer. Süzülme sırasında uçuş hızı arttığı için güvercinler kanatlarını devamlı olarak esnetirler, fakat hiçbir zaman bükmezler. Süzülüş sırasında güvercinlerde ki kanat açıklığı uçuş hızıyla değişkenlik göstermez, fakat çırpma hareketinin olmadığı aralıklarda bükülme yüzdesi 10-14 m/s hızıyla artar.

1.8. Böceklerin Uçuşu

Böceklerin uçuşu çağlar boyunca insan yapımı uçuşların gelişimiyle özellikle, 20. Yy' ın başlarında insanları büyülemiştir. İnsanoğlu kuşlar gibi yapay çırpma kanatlarla uçmayı önceden düşündüler aslında, Wright kardeşler yaptıkları ilk planörde kuşların uçuşları hakkında çalıştılar. Mikro hava araçları üzerinde son ilgiler çırpma kanatla birlikte yeniden canlandı, özellikle böceklerin çırpma kanadında bunun sebebi daha çok bilgi tabanındaki son gelişmelerden kaynaklıydı.

Böcek uçuşundaki en ayırt edici özellik kanat kinematiğidir. Bu kinematik diğer uçuş yeteneklerinde ve makinalarda bulunmaz. Onların daha küçük ölçeklerinden dolayı temel olarak kuşlardan böceklerin tüm durumlardaki farkı kanat kökünde yürütülür. Buna karşılık, birçok kuş kanadının bükülmesi pasif olmasına rağmen, kuşlar kasların hareketlendirdiği kanat boyunca daha lokalize çalışmasına izin veren iç iskelet yapısına sahiptirler. daha yerleşmiş kanat boyunca tahrike izin verir. Bu kinematiğin sonucunda böcek uçuşunun birleşimiyle aerodinamik sabit kanat, döner kanat ve hatta kuş kanadından oldukça farklılaştırır. Bu nedenle, tam olarak böcek uçuşunun sunumundaki mühendislik modellerinin gelişimi için, bu kinematiğin anlaşılması ilk olarak gereklidir.

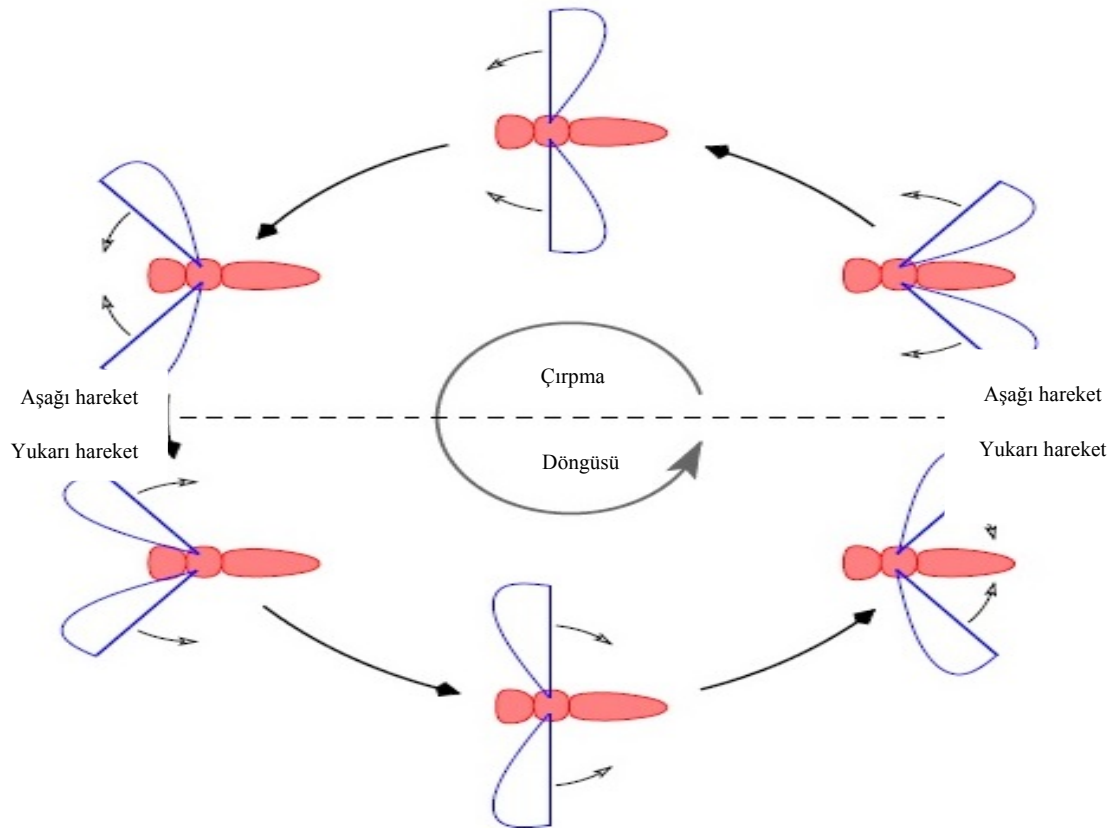
1.8.1. Kanat Kinematığı

Kameraların icadından bu yana böcek uçuşları araştırıldı, fakat onların kinematik hareketlerini yüksek hız yeteneklerini görüntülemeye başladığından beri sadece ortaya çıkarmıştır. Böcek uçuşları genel olarak iki gruba ayrılabilir. Bunlar bir kanat çifti ve iki kanat çiftidir. Biz kendi kendimize kısıtlı olarak ilkinden bahsedersek özellikle, iki kanatlı uçuşlar Dipteria sineği ve Drosophia meyve sinekleri, çünkü onları analiz ve taklit etmek daha kolay ve harika uçuculardır.

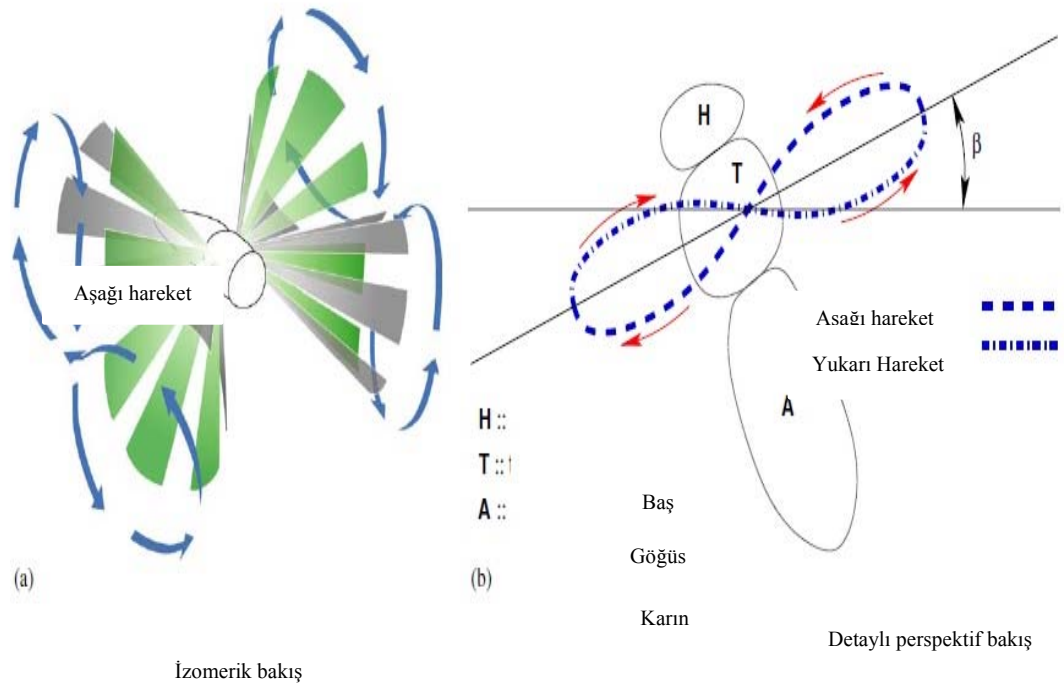
Böcekler uçuş için karşılıklı hareket eden kanat kullanırlar. Bütün çırpma hareketi, kürek botlarındaki küreğin çekme hareketiyle karşılaştırılabilir, temelde üç bileşenli hareketi içerir ki bunlar; süpürme, yunuslama ve dalma veya kaldırma hareketidir. Tipik çırpınma frekansı 5-200 Hz arasındadır, genellikle böceklerin boyutunun ve ağırlığının artmasıyla frekans azalır.

Bu döngü boyunca, çırpın kanat hareketi ayrıntılı olarak geçiş ve dönüş fazı olarak ayrılır. Geçiş fazı Şekil 1.15 de görüldüğü gibi aşağı ve yukarı hareketin iki ayrı döngüsünden oluşur. Aşağı hareket şunu ifade eder: bedene göre en arka bölgeden en ön bölgeye kanat hareketidir. Yukarı hareket tanımı ise, ters döngüsüdür. Yarım döngülerin her birinin sonunda dönme fazı rol oynar ve çevrim tersine döner, bu sayede kanadın döngüsü hızlanır ve bir sonraki yarım çevrim için yönünü tersine çevirir. Bu durum boyunca biçimsel alt yüzey üst yüzey olur ve hücum kenarı her zaman önde olur. Dışa bükülme ve içe bükülme terimleri sırasıyla aşağı hareket ve yukarı hareketi tanımlar.

Kanat çevrimi boyunca kanat tipleri tarafından dışarı doğru izlenen yol küresel yüzeydeki sekiz şekline benzerlik gösterir, çünkü kanat-yarı açıklığı sabittir. Kanatların ileri ve geri çırpınması yüzey üzerinde çevrim yüzeyi olarak tanımlanır ki bu döner kanatlı uçakların blade tipleri tarafından tanımlanan yol düzleminin ucu için analogdur ve çevrim yüzeyindeki açı(β) için dikey olarak içerebilir.



Şekil 1.12. Böceklerin çırpma döngüsü boyunca yarım döngüleri. Not: Hücüm kenarı her zaman öndedir.[7]



Şekil 1.13. Böcek çırpma hareketinde sekiz şeklinin kinematiği[7]

Yarım çevrim boyunca hızın sabit olması için kanat yarım çevrimin ortalarında yavaşlamadan önce kanat ivmelenir. Kanat vuruşu sırasında hız homojen değildir ve özellikle süzülüş için kanat ucu hareketi basit bir sinüs hareketinden farklı değildir. Kanat yunuslama hareketi de yarım çevrim boyunca değişir, yarım çevrimi geçme sırasında yunuslama yavaş yavaş artar. Yarım çevrim boyunca hücum açısı ortalama kanat açıklığının % 70 inde ve 35^0 dir ve tipik çevrim uzunluğu 3-5 kanat açıklığı kadardır.

Normal süzülme uçuşlarında birçok sinek simetrik yarım kanat çevrimini ve dikey çevrim yüzeylerini kullanır. İleri uçuş, aşağı ve yukarı hareket arasındaki asimetri boyunca mümkün olur ve aşağı hareket yukarı hareketten daha uzundur ve çevrim yüzeyini içerir. Sağ ve sol kanat arasındaki çırpma asimetrisi dönme manevrası için kullanılırken, yunuslama hareketi böceklerin vücutlarındaki bazı yardımlarla kanatlar tarafından kontrol edilen aerodinamik momentler sonucunda görülür.

1.19. Literatür Çalışması

Mikro hava araçlarının avantaj-dezavantajları, boyutları hakkında bilgiler, çırpma özellikleri, kuşlar-böcekler gibi canlılarla uçuş benzerlikleri, taşıma kuvveti için gerekli enerjiyi nasıl ürettikleri, kanat şekilleri, uçuş yaptıkları Re sayısı aralığı farklı çalışmalarda incelenmiştir[8-13]. Yapılan araştırmalarda mikro hava araçları için rijit kanat ve esnek kanat şekilleri kullanılmıştır. Mikro hava aracı çeşitleri; çırpma kanat, döner kanat ve sabit kanattır. Mikro hava araçları kendi biyolojik karşılıklarıyla kıyaslandığında kanat açıklıkları 15 cm'yi geçmediği için uçuş hızları düşük olacaktır ve uçuş rejimi(10^4 - 10^5) arasındadır[14].

Mikro hava araçları için esnek kanat çalışmalarında esnekliğin açısı itki bakımından faydalı olduğu özetlenmiştir[15-17]. Son yapılan çalışmalarda ayrıca ayrılma kabarcığı araştırılması ön plana çıkmıştır. Çırpma kanat mikro hava araçlarında düşük Re sayılı akışlarda kararsız (unsteady) akışlar incelenmiştir[18,19].

2D ve 3D [20] düz plaka kanat profillerinin 10^6 Re sayılı akışta yunuslama ve dalma hareketleri sonucu oluşan aerodinamik parametrelerinin deneysel incelenmesi sonucunda düz plaka profili ile SA7003 profili düşük ve yüksek Re sayılarında karşılaştırıldığında Re sayısı değişiminde düz plaka daha hassas olduğu görülmüştür. SD7003 profilinde akış yüzeysel tutunma kaybı hareketi için daha çok tutunuyorken, düz plaka profilleri keskin hücum açılarında daha erken ve daha güçlü hücum kenarı girdaplarına yol açıyor. Hücum açısının azalması durumunda ise uç girdapları önemli derecede azalmıştır. 74 cm kanat span uzunluğuna [21] sahip kanat profilinde çırpma hareketi yapan profilin uçuş dinamiği araştırılmış ve taşıma, sürüklenme, yunuslama momenti değerleri tespit edilmiştir. Rüzgar tünelinin hızı sabit 7,2 m/s ve hücum açısı 0^0 - 41^0 arasında değişimlerin ölçümleri yapılmıştır. Bu çalışmada ornit hopter isimli bir robot tasarlanmış ve rüzgar tüneline çırpma hareketi sonucu elde edilen değerler verilmiştir. Çırpma hareketi farklı hız aralığında yapılmış ve çırpma hareketinin hızı arttığında C_L katsayısının da arttığı gözlenmiştir. San-Yih LIN ve arkadaşları [22] bazı NACA profillerinin sabit ince ve kamburlu profillerini incelemiş ve çırpma hareketi sonucu hücum açısının azalması durumunda normal kuvvet pozitif güç ve taşıma kuvveti üretirken, hücum açısının artması durumunda pozitif taşıma negatif güç oluşmuştur. Profilin aşağı iniş durumunda tersi hareketine göre daha fazla kaldırma kuvveti elde edilmiştir. Wang ve arkadaşları [23] düşük Re akışlarda $AR=5$ olan kanat profillerinin çırpma, yunuslama, dönme hareketi sonucu oluşan aerodinamik parametreleri incelemiş. Hücum kenarı girdapları kanat yüzeyine firar kenarını terk edinceye kadar tutunabildiğini fakat ikinci girdaplarında oluşabileceği tespit edilmiştir. Hücum açısının artışıyla daha güçlü hücum kenarı girdapları oluşmuştur. Bu durum taşıma kuvvetini artırırken dönme momentini azaltmıştır. Kurtuluş havada asılı [24] durum da bulunan kanat hareketinin aerodinamik parametreleri incelemiş ve maksimum kuvvet oluşturmak için aerodinamik kuvvetleri inceleyecek bir analitik model oluşturulmuştur. Hız değişim zamanı, Re sayısı değişimi, dönme eksenini gibi parametreler de değişiklik yapılmış ve yapılan çalışmalar sayısal verilerle karşılaştırılmıştır. Kaya [25] yunuslama ve dalma hareketi yapan kanat kesitlerini incelemiş ve kuvvet değerlerini artırmak için çırpma hareketi iyileştirmiştir. Çırpma kanat kesitleri ile itki üretiminin faz farkına oldukça bağlı olduğu ve yüksek itki değerlerinin, düşük verim durumunda elde edilebileceği gözlenmiştir. Havada asılı kalarak ve sekiz çizen [26] çırpma kanat hareketinin girdap oluşum mekanizmaları

deneysel olarak incelenmiştir. Üretilen mekanizma genlik ve frekansa kolaylıkla programlanabilmekte ve sekiz hareketini çok kolay tamamlamaktadır. Çırpan kanat hareket genliklerinde, farklı ölçüm açılarında, ve kanat profillerinde test edilmiştir. Deney sonucunda oluşan düzensiz yapılar incelenmiş, kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri değerlendirilmiştir. Daha yüksek taşıma oluşumunda hücum ve firar kenarı girdapları daha yüksek görülmüştür. Ayrıca kanat profili şeklinin hücum ve firar kenarı girdapları ve aerodinamik katsayılarda önemli bir etkisi olmadığı anlaşılmıştır. İleri hava da uçan [27] kanat kesitleri sayısal olarak incelenmiştir. Dalma ve dalma-yunuslama hareketi için Re sayısı, indirgenmiş frekans daimi çırpan kanat hareketine etkisi araştırılmış ve Re sayısı değişimiyle kaldırma kuvvetinin artışı sağlayan dinamik taşıma kaybı olduğu görülmüştür. Düşey öteleme genliği artarken, girdapların daha güçlü olduğu ve hücum kenarı girdabının oluşumunun hareketin ortalarına doğru ilerlediği görülmüştür. Kıran [28] çalışmasında insansız hava aracı yapımında küçük kuşlardan esinlenmiştir ve çırpan kanatlı insansız hava araçları diğer hava araçlarına göre daha avantajlı olduğunu ve aerodinamik karakteristikleri bilinen kanatlar için denklemler uygulanarak doğrulukları tespit edilmiştir. Havada asılı kalma [29] durumundaki çırpan kanat ile havada asılı kalan çizgisel hareket karşılaştırılmış ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve Parçacık Görüntüleme ile Hız Ölçümü (PGHÖ) kullanılarak analizler yapılmış. Sayısal analizlerde y yönündeki hareket genliği, hücum açısı, Reynolds sayısı ve kamburluklu kanat gibi farklı parametrelerin aerodinamik kuvvet katsayıları üzerindeki etkisi araştırılmış ve sekiz şekli üzerinde gerçekleşen hareketin çizgisel harekete göre avantajları olduğu ortaya çıkmıştır. Mashud ve arkadaşları[30], bir kanat profilinin aerodinamik karakteristiklerinde spoylerinin etkisini HAD analizinde gözlemlemişlerdir. Kanat yapısı olarak NACA 2415 kullanılmış ve spoiler kord boyunca 5 farklı pozisyonda uzatılmıştır. Geometri 2 boyutlu, spoiler ile ve spoylersiz olarak Gambit programında çizilmiş ve nümerik simülasyon Ansys Fluent programında yapılmıştır. Tüm pozisyonlar için spoiler bulunan kanat yapısının taşıma katsayısı spoiler bulunmayan airfoil yapısınıninkine göre düşüktür. Aynı zamanda sürüklenme kuvveti spoiler yerleştirilmiş kanat yapısında yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Genç ve Kaynak [31], 2×10^5 geçiş Re sayılı akışta NACA 2415 profilinin çevresinde ki akışta laminer ayrılma kabarcığını emmeli ve üfleli olarak sayısal incelemişlerdir. k-kL- ω k- ω SST geçiş modelleri kullanarak laminer ayrılma kabarcığının yerini doğru bir şekilde tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu geçiş modellerinin ters akış bölgelerini daha

belirgin şekilde tahmin ederken, $k-\epsilon$ RNG geçiş modeli ayrılma kabarcığını tespit etmişlerdir. Emme/üfleme mekanizması sürüklemeyi azaltmak ve taşımayı artırmak için üst yüzeydeki basınç katsayısının azalmasını ve ayrılma kabarcığını bastıracağını ifade etmişlerdir. Araque ve Nozicka[32], 2 boyutlu sıkıştırılmaz, iç itki sistemi ile güneş enerjili insansız hava aracı için düzgün hava geçişinin sayısal simülasyonunu yapmışlardır. Çalışmada taşıma ve sürüklenme kuvvetleri ve ayrıca 0-16 arası farklı hücum açılarında yunuslama moment katsayısı ve ayrıca ayrılma ve yeniden birleşme noktalarının yeri hız kontrolleri ve akış çizgileri belirlenmiştir. Sonuçta, her iki durum sonuçları kıyaslanmış ve kanat profilinin aerodinamik karakteristiklerinde itki akışının etkisi analiz edilmiştir.

2. BÖLÜM

Deneysel Yöntem ve Materyal

2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında farklı Re sayılarında farklı kanat profillerinde robotik sistemle değişik akış ve kanat koşullarında aerodinamik parametrelerin tespiti yapılmıştır. Re sayısı 50000-100000 arasında değişmekte, kullanılan kanat profilleri ise NACA 2415 ve düz plakadır. 2 farklı en/boy oranına (AR) sahip NACA 2415 ve 3 farklı en boy oranına sahip düz plaka incelenmiş olup NACA 2415 profillerinin teknik özellikleri AR 1 için veter uzunluğu 18 cm –kanat açıklığı 18 cm, AR 1,5 için veter uzunluğu 18 cm- kanat açıklığı 27 cm dir. Düz plakaların teknik özellikleri ise AR 1 için veter uzunluğu 12 cm- kanat açıklığı 12 cm, AR 1,5 için veter uzunluğu 12 cm-kanat açıklığı 18 cm, AR2 için veter uzunluğu 12 cm- kanat açıklığı 24 cm dir. NACA 2415 kanat profillerinin maksimum kamburluğu, veter boyunun %2'si kadar olup veter boyunun %40'ındadır ve maksimum kalınlığı veter boyunun %15'i kadardır. Düz plakalar için kalınlık 2mm olarak her bölgesinde aynıdır.

Bu bölümde öncelikle kanat profilleri üzerinde oluşan kuvvet değerleri, kuvvet ölçüm sistemi ile ölçülmüş ve değerler boyutsuzlandırılarak kuvvet katsayıları hesaplanmıştır. Re sayısı ve hücum açısı değişimleri incelenerek her bir kanat profili için tutunma kaybı (*stall*) açıları ve bu açılara karşılık gelen maksimum kuvvet değerleri tespit edilmiştir. Daha sonra kuvvet değerlerini ölçmeye çalıştığımız kanat profilleri kuş kanadı gibi düşük frekanslı çırpma hareketi yaptırarak çırpma hareketi sonucu oluşan kuvvet değerleri tespit edilerek statik kuvvet değerlerinden farkı ortaya konmuştur. Akış olaylarını görüntülemek için duman görüntüleme tekniği kullanılmıştır, bu teknik sayesinde kullanılan kanak profillerinin tutunma kaybı öncesi ve tutunma kaybı sonrası akış görüntüleri incelenmiştir. Bütün deneysel çalışmalar Erciyes Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümüne ait Rüzgar Mühendisliği Aerodinamik Laboratuvarında bulunan emmeli açık çevrimli tip rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. Tünelin test odası boyutu 50 cm x 50 cm test odasına sahip açık çevrimli bir rüzgar tüneldir. Tünelin fan gücü 15kW, devri ise 1500 devir/dakika olup harici bir kontrol ünitesi ile hızı ayarlanabilmektedir. Tünelin test odası akışı görüntülemeye uygun şeffaf yapıdadır, ve diğer bölgeleri metaldir. Deneylerin gerçekleştirildiği temsili tünel resmi verilmiştir.



Şekil 2. 1. Temsili Rüzgar Tüneli

2.2 Deneysel Çalışmalar

2.2.1 Tünelin Türbülans Şiddeti ve Karakteristiği

Türbülans şiddeti test bölgesinin geneli için yaklaşık %0.4 dür [25]. Bu değerden tünelin türbülans değerinin çok iyi olduğu görülmektedir ve çoğu akışkanlar mekaniği çalışmaları için yeterli bir tünel olduğunu göstermektedir.

2.2.2. Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalarda ölçümler her zaman bir miktar hata içerir. Bu hata belirleme miktarını tespit etmeye belirsizlik analizi denir ve deneylerdeki belirsizlikler hesaplanırken her deney serisinde maksimum-minimum belirsizlikler hesaplanır.

Belirsizlik hesabı yapılırken, her hangi bir ölçümü yapılan değişkene R dersek u değerleri hata miktarlarını göstermek üzere R'nin hata payı Denklem 1 ile hesaplanır [25].

$$u_R = \left[\left(\frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Örneğin basınç katsayısı C_p için belirsizlik hesabı yapılacak olursa; bu değer basınç farkı, yoğunluk ve hıza bağlıdır. Yukarıda ki formülde yerine yazılırsa;

$$\left[\left(\frac{\Delta p}{C_p} \frac{\partial C_p}{\partial \Delta p} u_{\Delta p} \right)^2 + \left(\frac{\rho}{C_p} \frac{\partial C_p}{\partial \rho} u_{\rho} \right)^2 + \left(\frac{U}{C_p} \frac{\partial C_p}{\partial U} u_U \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

denklemini elde edilir. Gerekli işlemler yapıp türevleri alındığında;

$$u_{C_p} = \left[\left(\frac{1}{0.5\rho U^2} u_{\Delta p} \right)^2 + \left(-\frac{1}{0.5\rho^2 U^2} u_{\rho} \right)^2 + \left(-2\frac{1}{0.5\rho U^3} u_U \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

Katsayılar yerine konulup bütün sadeleştirmelerden sonra aşağıdaki denklem elde edilir ve hata payları bu denklemde yerine yazılarak C_p için belirsizlik yüzde olarak hesaplanır.

$$u_{C_p} = \left[(u_{\Delta p})^2 + (-u_{\rho})^2 + (-2u_U)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

Tablo 2.1. Kullanılan tünel için farklı katsayılarla ait belirsizlikler [5]

Reynolds Sayısı	UCP	UCL	UCD	UCM	UR _e
50000	6.6	5.6	6.4	7.0	5.5
100000	5.3	5.0	5.2	6.1	4.7
200000	4.6	4.5	4.4	5.5	4.0
300000	-	4.0	3.3	4.3	3.2

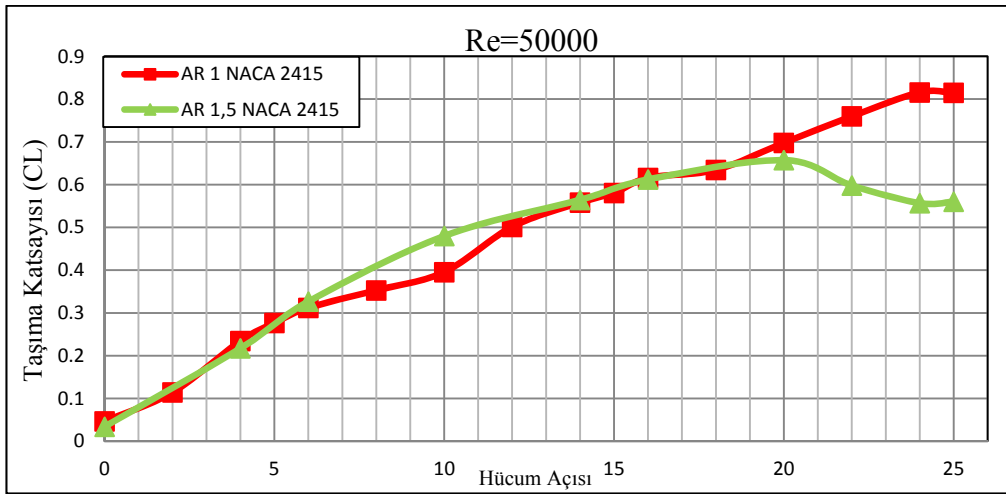
CP gibi CL, CD ve CM için de aynı hesap yapılarak Tablo 2.1’de verilen belirsizlikler yüzde cinsinden elde edilmiştir. Deneyde basınç farkı ve hızdaki hata payı hız arttıkça artmıştır [5].

2.3. En/Boy Oranı (AR) Değişiminin Aerodinamik Parametrelere Etkisi

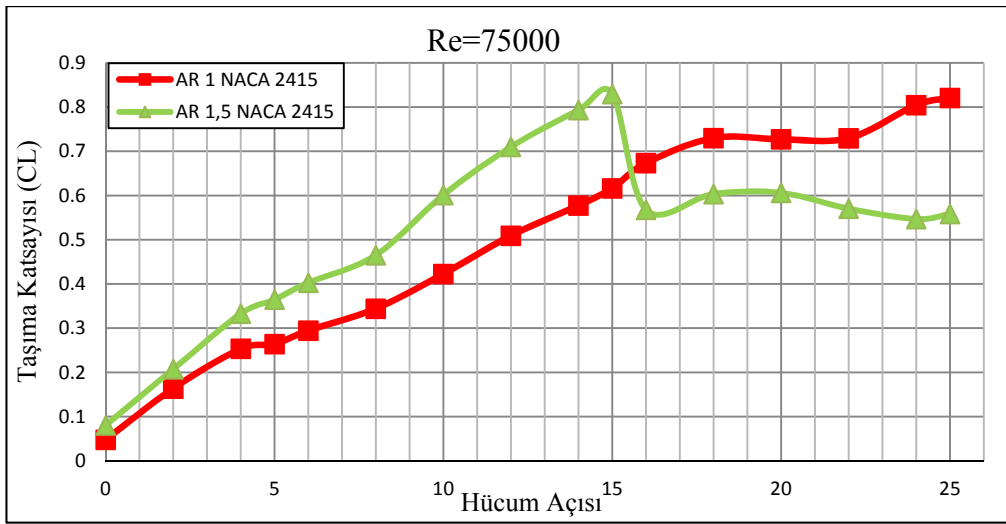
Mikro hava araçları uzaktan kontrol edilebilir veya verilen bir uçuş planı üzerinde hareket edebilen araçlardır. Mikro hava araçları mikro boyutları sayesinde ve uzaktan kontrol edilebilir özelliklerinden dolayı çeşitli görevler için kullanıma elverişlidirler. Özellikle askeri alanda, keşif ve haritalandırma konularında ihtiyaç duyulmaktadır.

Mühendislik alanında yapılan son gelişmeler dikkate alındığında mikro hava araçları büyük bir gelişme göstermiştir. Mikro hava araçları modern dünyanın gelişmiş bir bilim alanı olarak kabul edilmektedir. Kullanım alanları çok geniş ve kullanımının kolaylığı gibi etkenlerden dolayı bu araçlara olan ilgi günden güne artmaktadır. Mikro hava araçları askeri alanda ve keşif işlemlerinde daha çok tercih edilmektedir. Manevra kabiliyetlerinin güçlü olması, yerden kontrol edilebilir olması ve mikro boyutlarda olduğu için maliyetlerinin düşük oluşu tercih sebepleri arasındadır. Mikro hava araçlarına entegre edilecek kamera GPS gibi küçük aparatlarla bu araçlardan yapması istenilen görevler mikro hava araçları tarafından kolaylıkla yerine getirilebilir. Mikro hava araçları son gelişmelerle robotik özellik göstererek yön bulma işlemlerini de yapabilmektedir ve karmaşık ortamlarda dahi keşif yaparak bölgelerin haritalarını çıkarabilmektedir.

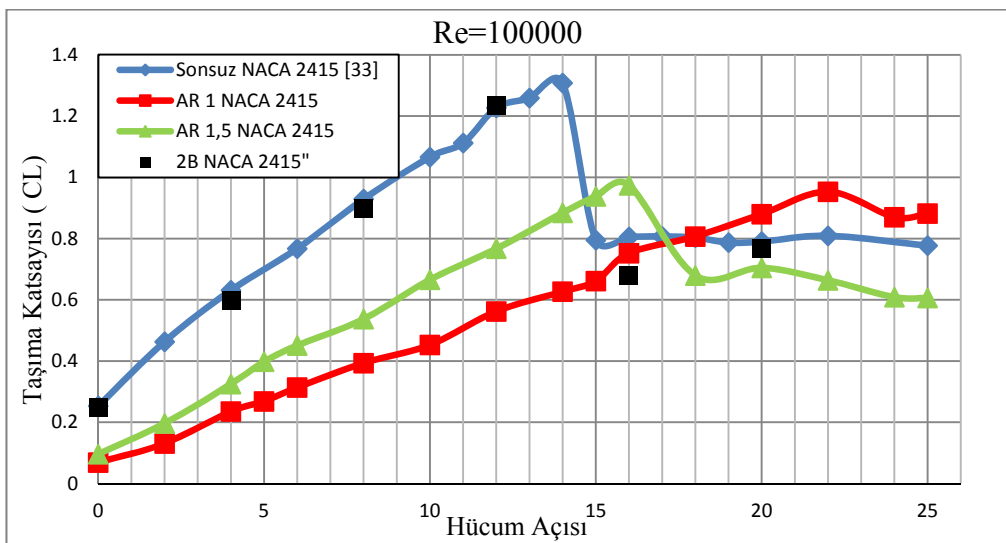
Tezin bu bölümünde mikro hava araçları için kullanabileceğimiz kanat profillerinin farklı geometrilerdeki kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin katsayıları ölçülmüştür. Bu profillerin AR değişimlerinin profillerin kuvvet değerlerinin değişimi hakkında bilgi verecek grafikler ve duman deneyi görüntüleri verilmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 2. 2. NACA 2415 kanat profillerinin farklı Re sayılarında hücum açısı-taşıma katsayısı grafikleri (a) Re=50000, b) Re=75000 c) Re=100000))

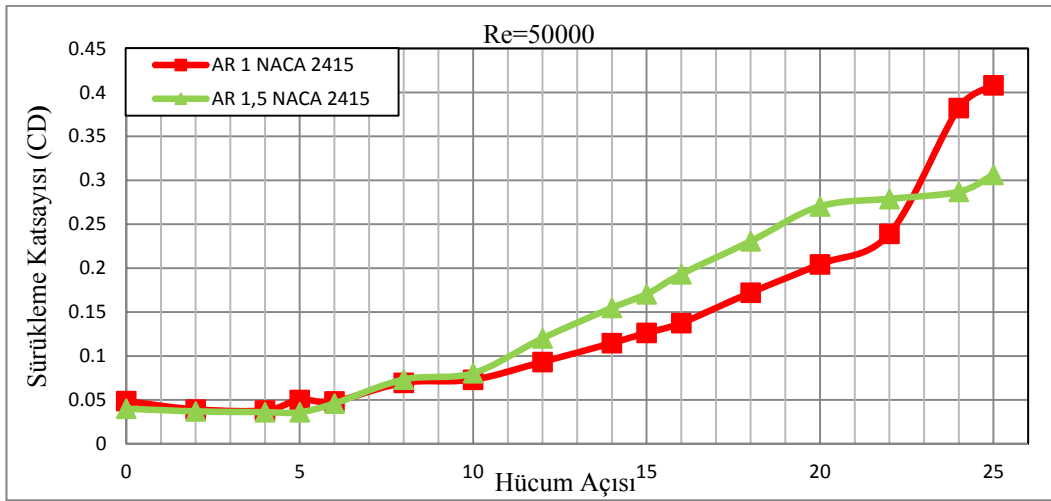
Farklı Re sayılarında elde edilen NACA 2415 kanat profilinin hücum açısı-taşıma katsayısı grafikleri şekil 2.2 de verilmiştir. 100000 Re sayılı grafikte kullandığımız rüzgar tüneline daha önce aynı kanat profiliyle yapılan deneysel çalışmadan örnek vererek ölçümlerimizin doğruluğu gösterilmiştir.

Grafikler incelendiğinde NACA 2415 profillerinin tutunma kaybı açıları ve maksimum, minimum taşıma katsayıları görülmektedir. Ancak 50000 Re sayılı düşük hızlı akışta basınç farkının fazla olmaması sebebiyle maksimum taşıma katsayısı diğer akışlara göre daha düşük ölçülmüştür ve yumuşak tutunma kaybı oluşmuş ve 20^0 de tutunma kaybı tamamen görülmüştür.

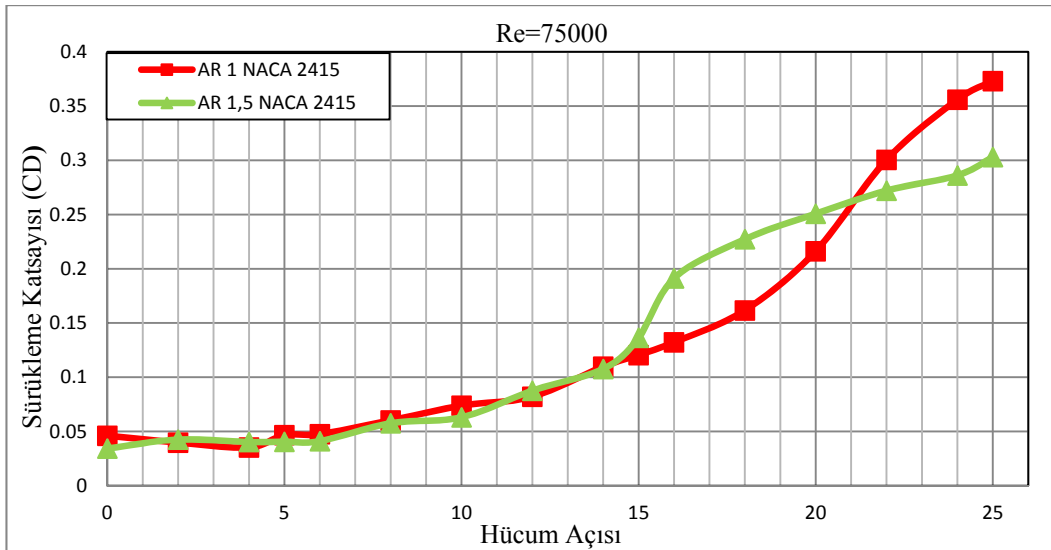
AR 1,5 olan kanat profili 75000 ve 100000 Re sayılı akışlarda sırasıyla 14 ve 16 derece hücum açılarında tutunma kaybına uğramaktadır. Re sayısı artışı her iki en boy oranlı profil için taşıma katsayısını kısmen artırdığı görülmüştür. Grafikler incelendiğinde AR 1 profili için tutunma kaybı uç girdapların ayrılma kabarcığını daha fazla etkilediği için daha geç görülmüştür.

50000 Re sayılı akış grafiği incelenecek olursa 5 derece hücum açısına kadar her iki profil içinde taşıma katsayısı değişimi benzer görülmektedir, ancak 5-12 derece hücum açısı arasında önemli bir fark oluşmuş ve AR 1,5 profilinde 20 derece hücum açısında tutunma kaybı görülmüş AR 1 profilinde ise taşıma katsayısı daha hızlı artmaya başlamıştır.

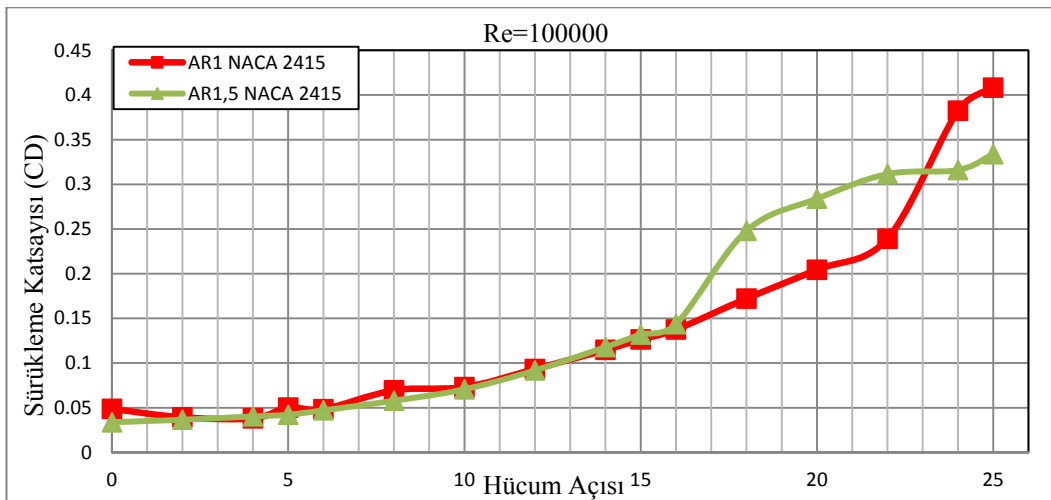
75000 ve 100000 Re sayılı akışlar incelendiğinde AR 1,5 profilinin taşıma katsayısı AR 1 e göre tutunma kaybı açısına kadar daha fazladır, ancak 15-16 derece hücum açısından sonra ise AR 1 profilini taşıma katsayısı daha fazladır, bu farkın ayrılma kabarcığından kaynaklandığını düşünmekteyiz. Duman görüntüleri ile nedenleri açıklanmıştır.



a)



b)

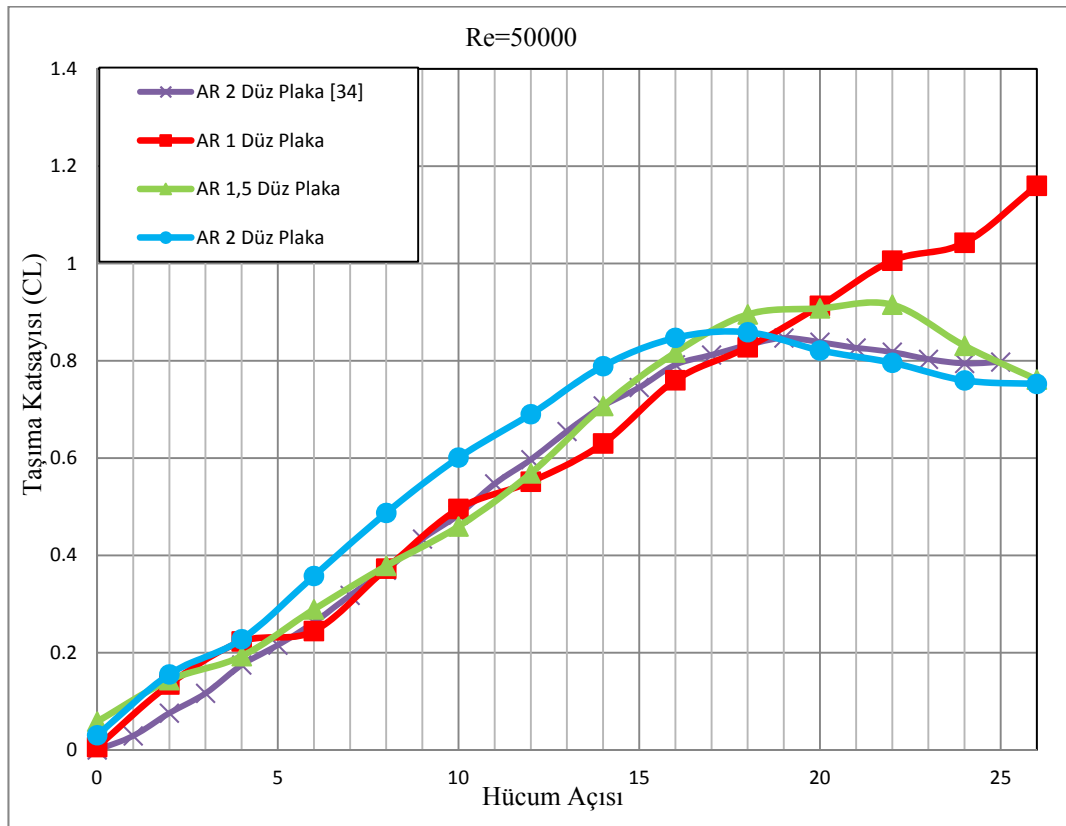


c)

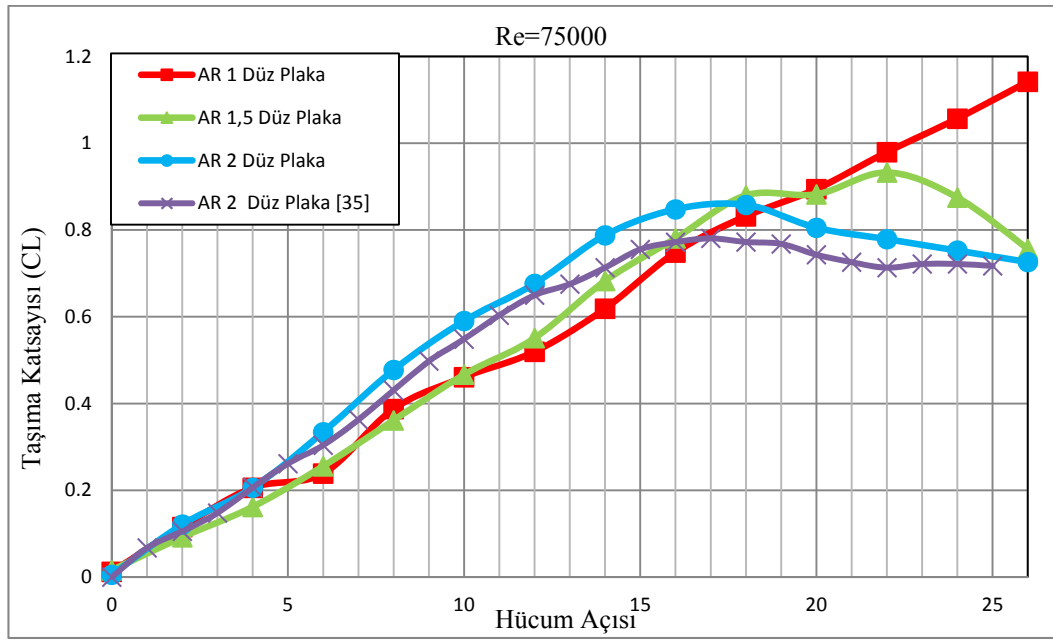
Şekil 2. 3. NACA 2415 Kanat profillerinin farklı Re sayılarında hücum açısı-sürüklenme katsayıları (a) Re=50000, b) Re=75000, c) Re=100000)

Şekil 2.3 deki grafiklerde NACA 2415 kanat profillerinin farklı Re sayılarında hücum açısı ile sürüklenme katsayılarının değişimi grafikleri verilmiştir. Her iki kanat profili de incelendiğinde Re sayısı artışıyla kısmen sürüklenme katsayısı değerinin arttığı görülmüştür.

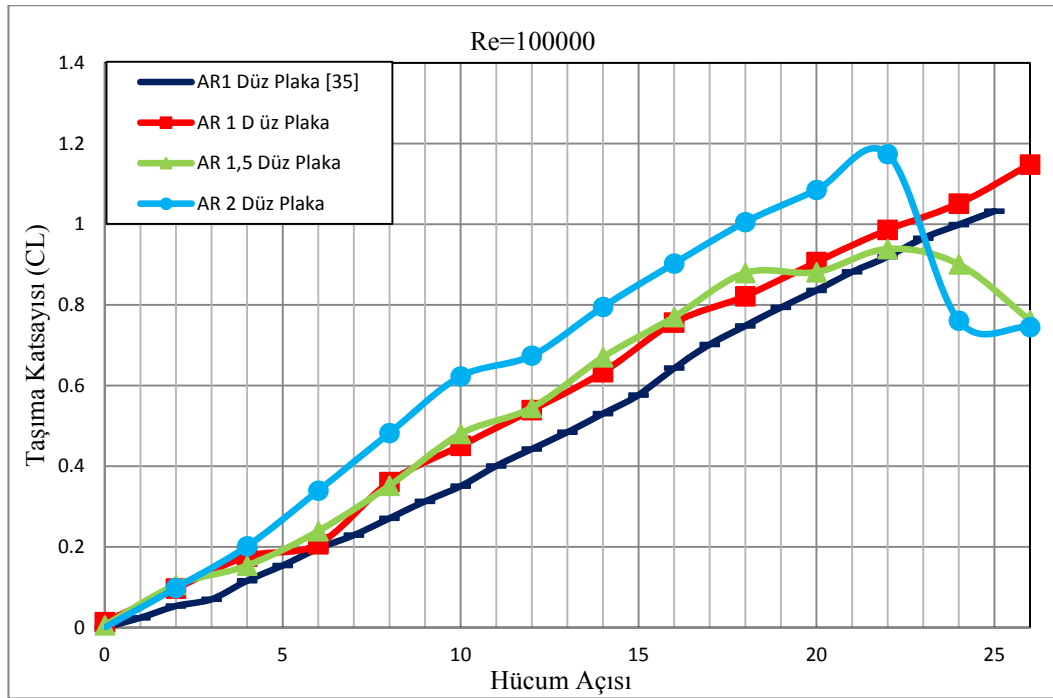
Hücum açısının artışıyla CD değerinin arttığı ancak tutunma kaybı açısından sonra ise daha hızlı bir artışın olduğu görülmüştür. Profillerin tutunma kaybı hücum açısına kadar sürüklenme katsayıları aynı seyri izlemekle birlikte değişim oldukça düşük görülmüştür. 15° - 20° hücum açıları arasında AR 1,5 profilinin sürüklenme katsayısında ani artış oluşmuş ancak, AR1 profilinde artış düşük kalmıştır. 20° hücum açısından sonra ise AR1 profilinin sürüklenme katsayısında ani artış görülmüştür ve maksimum sürüklenme katsayısı her Re sayılı akış için AR 1 de görülmüştür. Ayrılmış akışın bu tür farklılıklara neden olacağı düşünülmektedir.



a)



b)



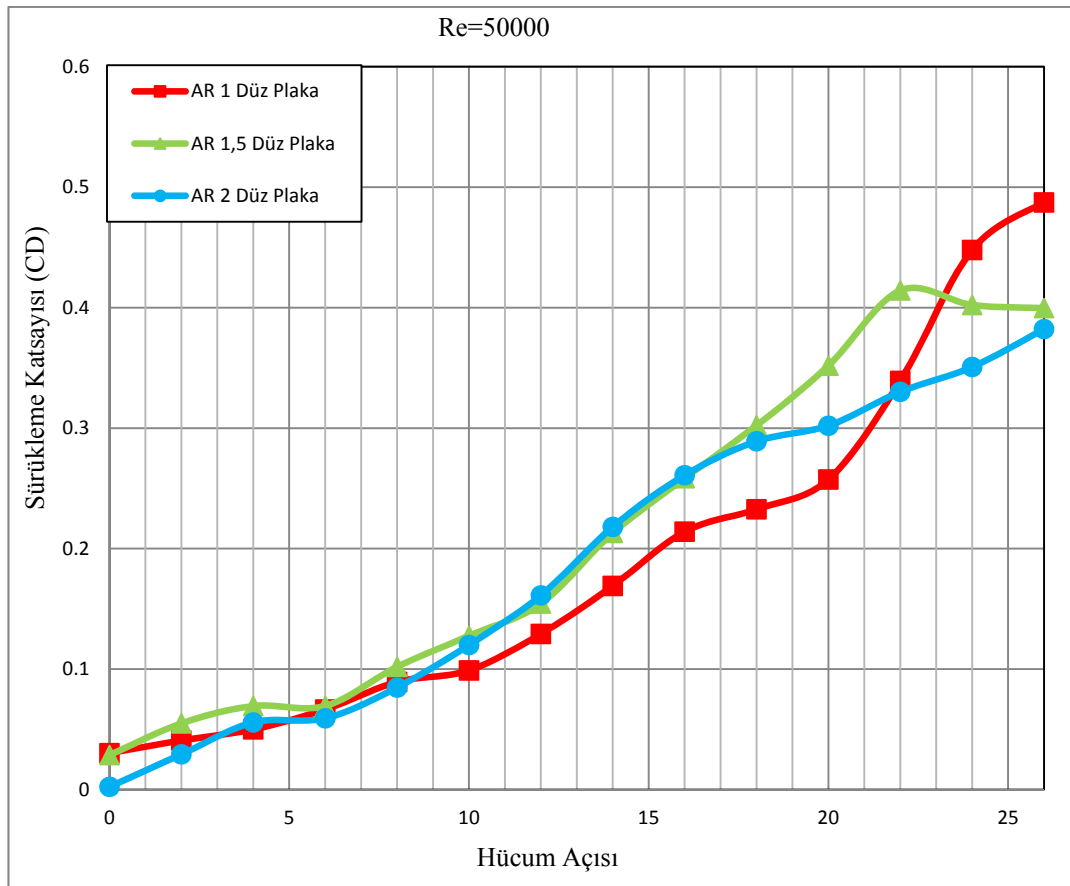
c)

Şekil 2. 4. Farklı Re sayılarında Düz plaka kanat profillerinin hücum açısı-taşıma katsayısı grafikleri a) Re=50000, b) Re=75000, c) Re=100000

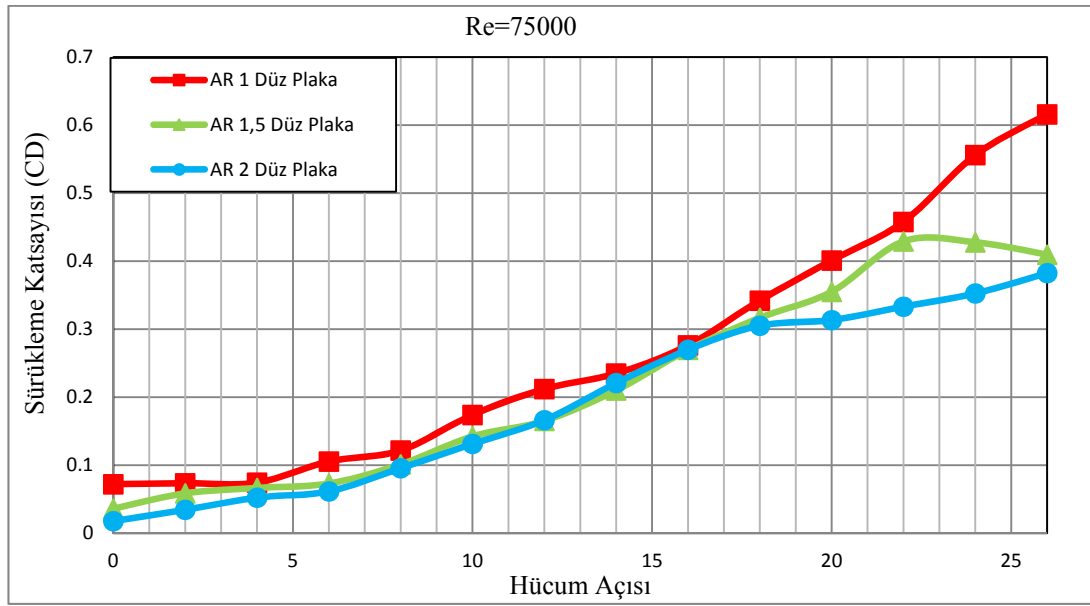
Yukarıda 3 farklı düz plaka kanat profillerinin farklı Re sayılarında elde edilen taşıma kuvveti katsayılarının grafikleri verilmiştir. Her bir Re sayısı değişimi için referans olarak daha önce yapılan çalışmalar örnek gösterilmiştir. Alınan örnekler karşılaştırıldığında aynı boyut ve yaklaşık aynı olan Re sayısı değerinde ölçümler de

küçük farklılıklar olmakla birlikte aynı eğilimler elde edilmiştir ve deneylerimizin doğruluğu görülmüştür. Şekil 2.4 incelendiğinde farklı en/boy oranına sahip Düz Plaka profilinin tutunma kaybı, maksimum-minimum taşıma katsayıları farklı Re sayılarında verilmiştir.

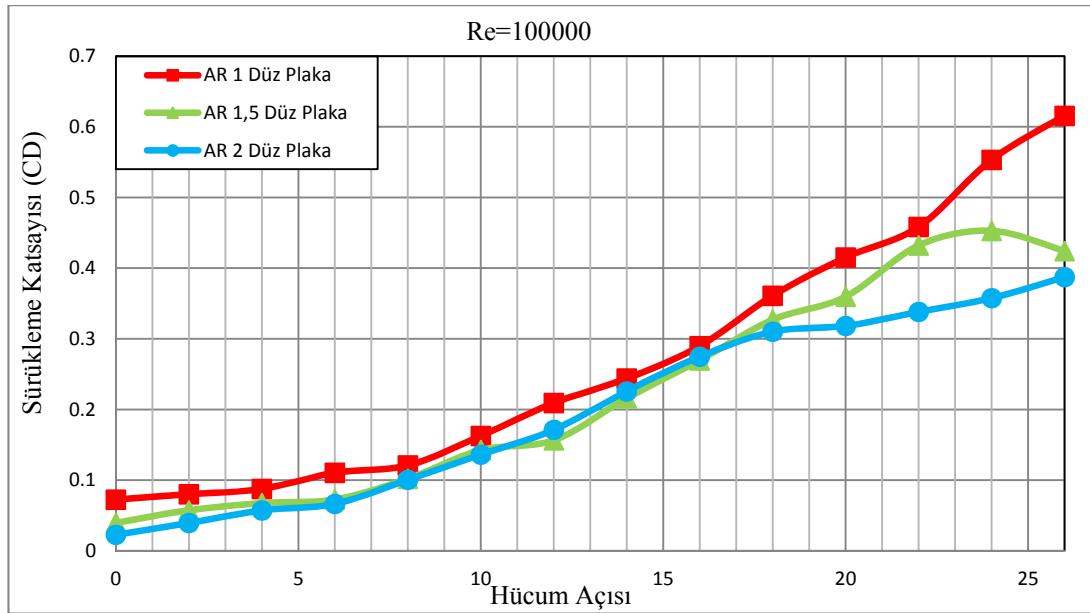
Grafikler incelendiğinde kısmen AR değeri ve Re sayısı arttığında taşıma katsayısı değeri de artmaktadır. Profillerin kamburluğu olmadığı için 0° hücum açısında grafiklerde görüldüğü gibi taşıma kuvveti oluşmamıştır. AR 1 profili referansda da karşılaştırıldığı gibi hiçbir Re sayısında uç girdaplarının etkisinden dolayı tutunma kaybına uğramamıştır. AR 2 profili düşük Re (5×10^4 - 75×10^3) sayılarında 15° hücum açısında yumuşak tutunma kaybına (mild stall) uğramıştır. Yüksek Re (10^5) sayılı akışta ise 22° hücum açısında ani tutunma kaybına (abrupt stall) uğramıştır. AR 1,5 profili farklı Re sayılarında 18° hücum açısında yumuşak tutunma (mild stall) kaybına uğramıştır.



a)



b)



c)

Şekil 2. 5. Farklı Re sayılarında Düz plaka kanat profillerinin hücum açısı sürüklenme katsayısı grafikleri (a) Re=50000, b) Re=75000, c) Re=100000)

Şekil 2.5 ile 3 farklı Düz Plaka profillerinin farklı Re sayılarında hücum açısı-sürüklenme katsayısı grafikleri gösterilmiştir. Şekil 2.5 de verilen grafikler incelendiğinde Re sayısı artışı ile kısmen sürüklenme katsayısı değerlerinin azaldığı, Re sayısının artması ile de sürüklenme katsayısının arttığı görülmektedir. AR 1 profilinin sürüklenme katsayısı şekilde görüldüğü gibi her Re sayısı değişimi için en yüksek ölçülmüştür. AR 1,5 ve AR 2 profillerinin sürüklenme katsayısı değerleri kısmen benzer olsa da AR 1,5 profilinin her

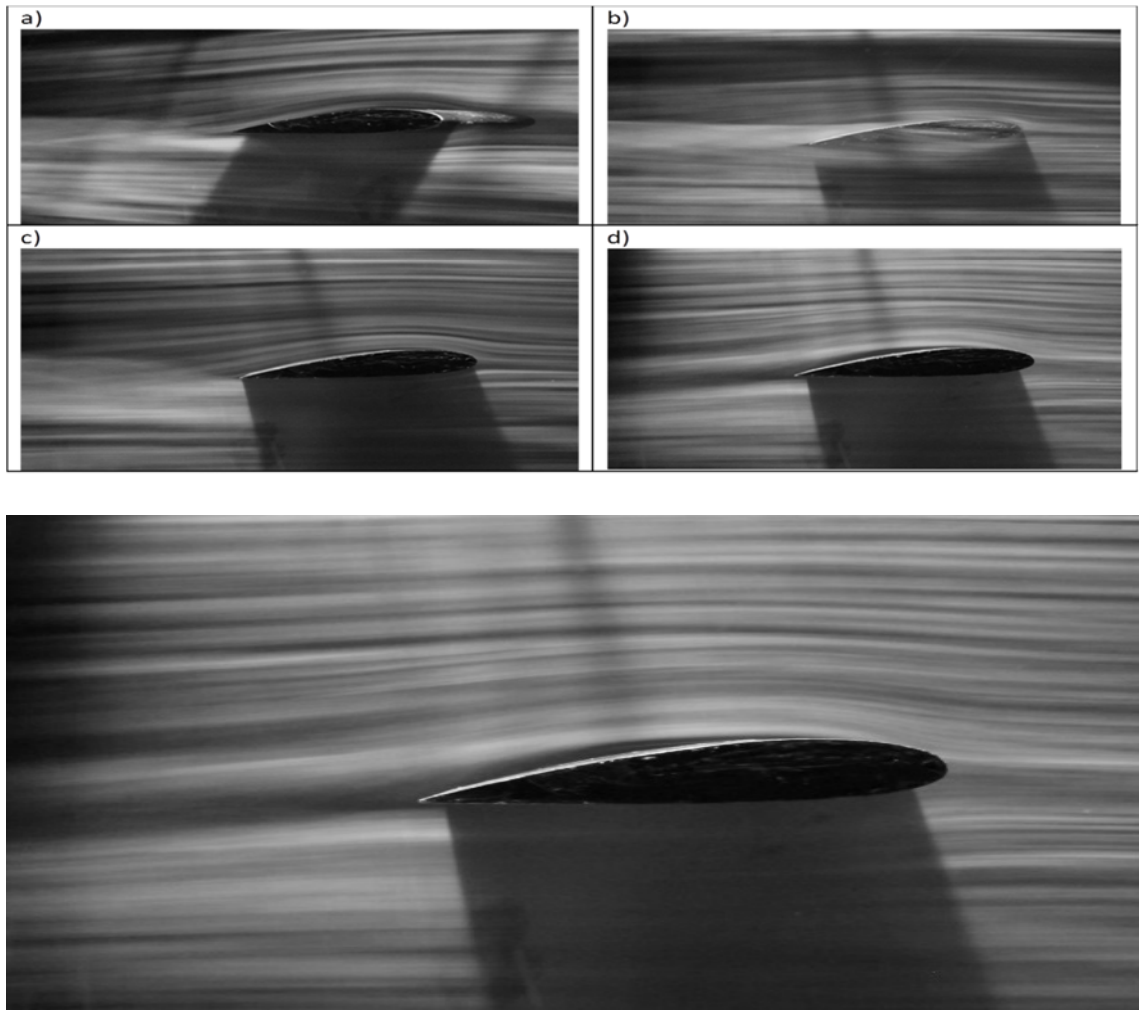
bir Re sayısı değeri için maksimum değerleri daha fazla ölçülmüştür. Şekil 2.4 ile profillerin taşıma katsayısı grafikleri verilmişti, burada AR değeri büyük olanın taşıma katsayısı daha fazla iken sürüklenme katsayısı değerleri daha az ölçülmüştür. Bu bilgiler ile sürüklenme katsayısı fazla olan profilin taşıma kuvveti daha düşük olduğu anlaşılmaktadır.

2.4. Duman Deneyi İle Akış Görüntüleme

Statik olarak kanat profillerinin farklı en/boy oranlarındaki hücum açısına göre aerodinamik parametrelerinin değişimleri önceki bölümde incelenmiştir. Bu bölümde dumanla akış görüntüleme tekniği kullanılarak kuvvet deneyleri sonuçları desteklenmiştir.

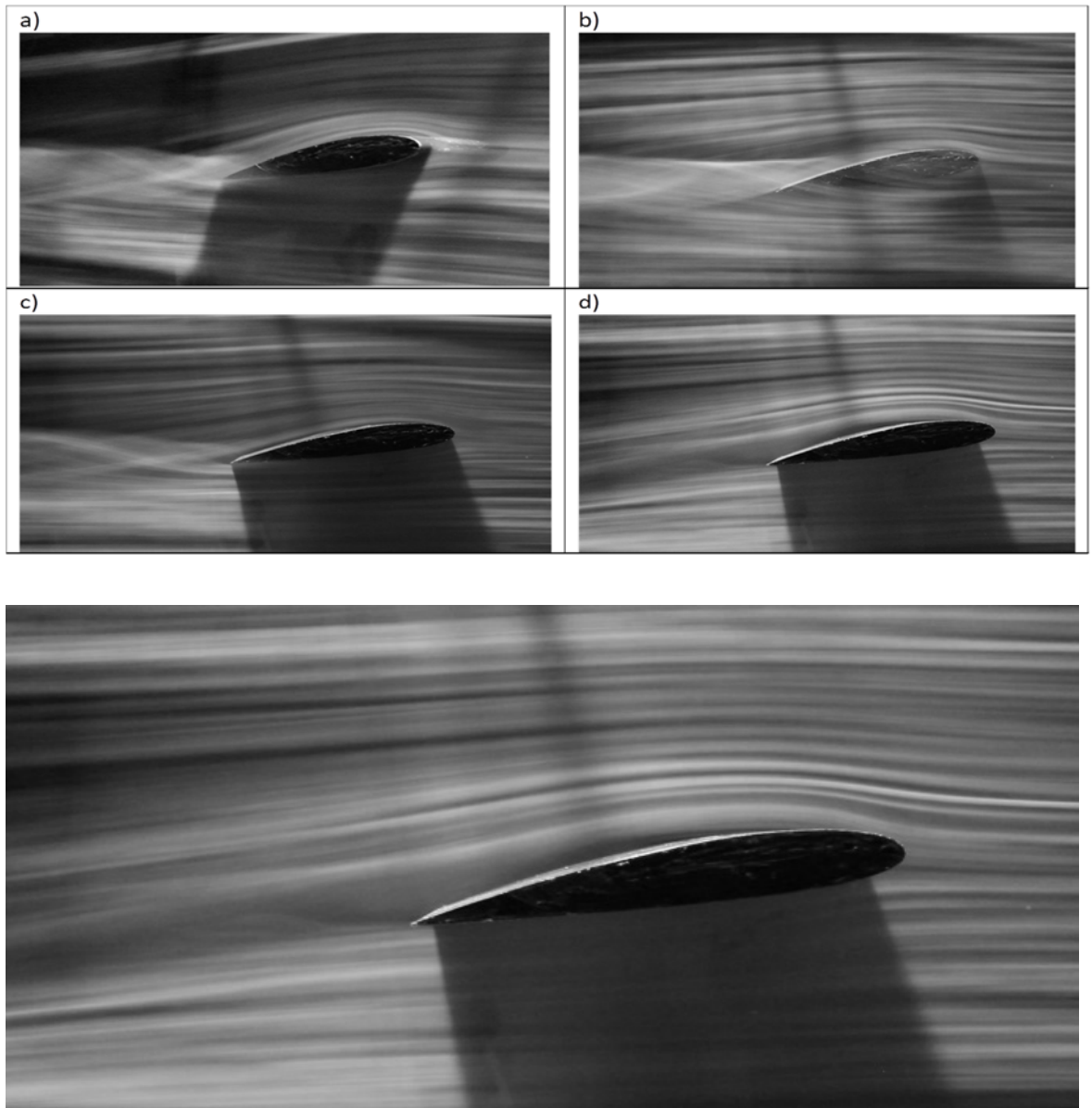
Duman deneylerinde 4 farklı açıdan her bir profil için değişen hücum açılarında akış görüntüleri alınmıştır. Hücum açıları değişimi kuvvet deneylerinde ki kritik noktalar belirlenerek seçilmiştir.

Kullanılan kanat profillerinin öncelikle perspektif bakış görüntüsü, uç kısım olarak adlandırdığımız kanat profilinin kenar görüntüsü, $x/c=0.1$ olarak adlandırdığımız her profil için kenar kısmında profilinin veterinin 1/10 nu kadar iç kısım görüntüsü ve son olarak profillerin orta kısım görüntüleri alınmıştır. Perspektif bakış görüntüsüyle uç girdaplar ve ayrılma kabarcığı gözlemlenirken, uç kısım görüntüsü ile uç girdaplar ayrıntılı incelenmiş ve $x/c=0.1$ görüntüleri ile de uç girdapların büyüklüğü incelenmiş son olarak orta kısım görüntüsü ile ayrılma kabarcığı ayrıntılı olarak görüntülenmiştir. Ayrıca orta kısım görüntüleri kritik hücum açıları olan 5^0 ve 10^0 hücum açılarında ayrılma kabarcığının konumu ve büyüklüğü ayrıntılı incelenmiştir.



e)
Şekil 2. 6. AR 1 NACA 2415 profilinin 5^0 hücum duman görüntüleri, $Re=50000$
(a)Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden
çekim d) Orta kısımda çekim e) Orta kısımda çekim)

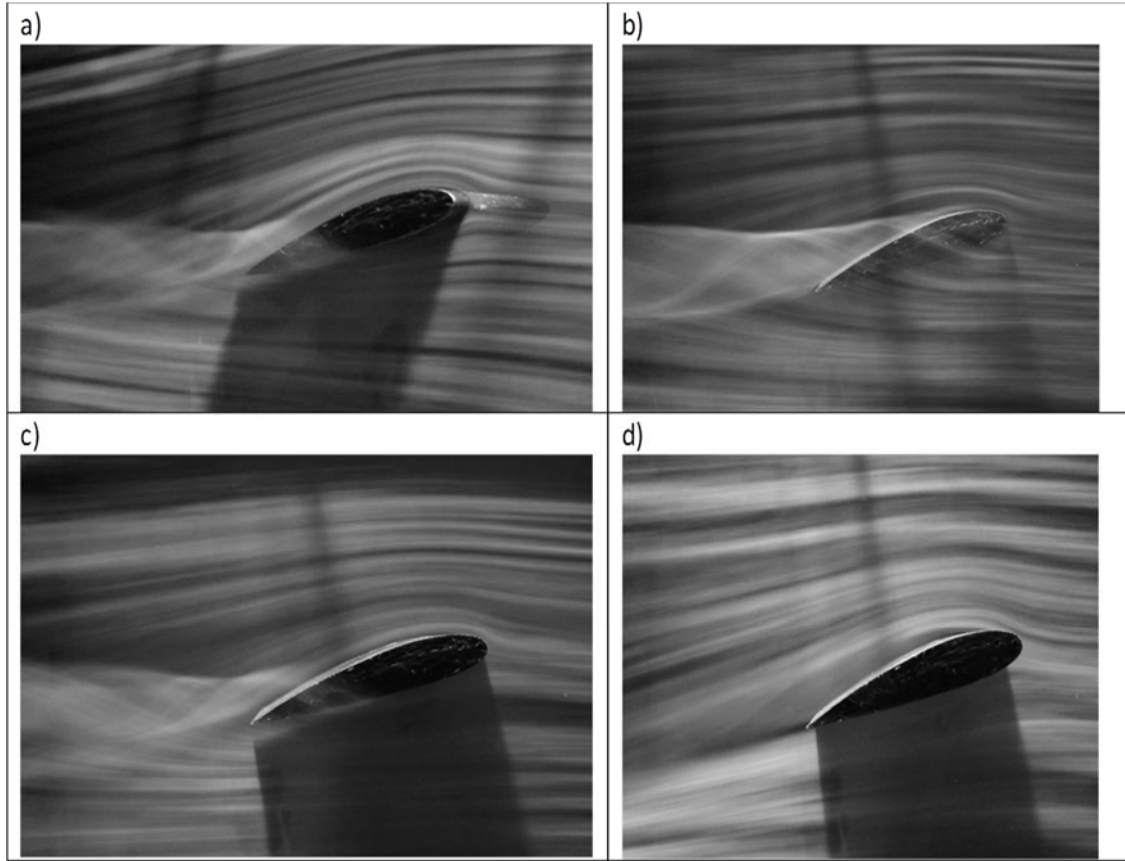
Şekil 2.6 da görüldüğü gibi NACA 2415 AR1 profilinin 5^0 hücum açısında 4 farklı durumdan incelenmiş duman deneyleri görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde laminar olduğu ayrılma kabarcığının ve uç girdaplarının oldukça küçük olduğu görülmektedir. 5^0 hücum açısında akışın laminar ve kararlı olduğu resimlerden anlaşılmaktadır. Orta kısım resmi ayrıntılı incelendiğinde laminar ayrılma kabarcığı yaklaşık olarak $0,285x/c-0,72x/c$ arasındadır.



e)
Şekil 2.7. AR 1 NACA 2415 profili 10° hücum açısında farklı bölgelerinden alınmış duman görüntüleri, $Re=50000$ (a) Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim e) Orta kısımda çekim)

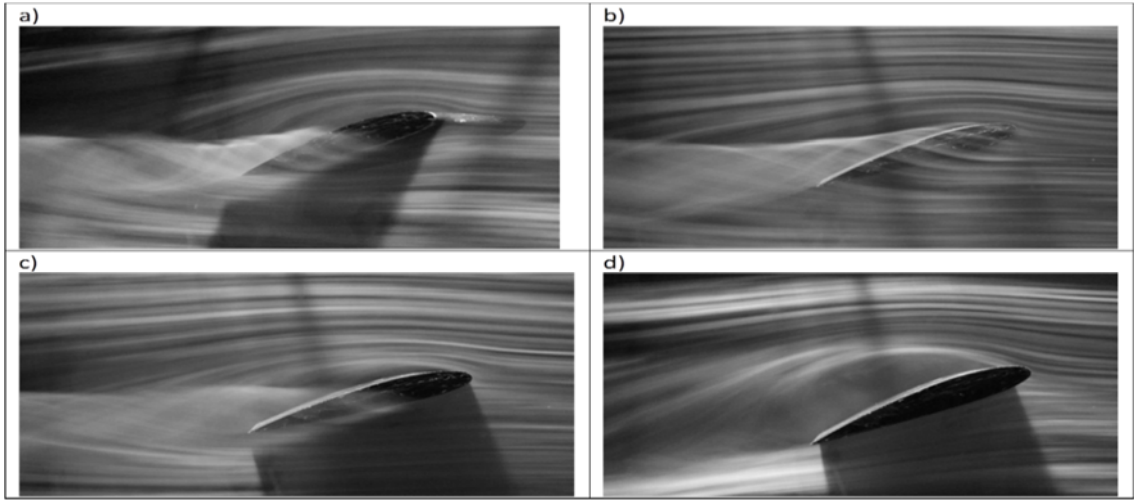
Şekil 2.7 de 10° hücum açısında profil için duman görüntüleri görülmektedir ve ayrılma kabarcığının büyüklüğü hücum açısının artmasıyla artış göstermiştir. Uç girdapları da aynı şekilde artarak şekil 2.3 de ki grafikte görüldüğü gibi sürükleme katsayısını artırmıştır. 10° hücum açısı için laminer ayrılma kabarcığı yaklaşık olarak $0,27 x/c$ - $0,81x/c$ arasında belirlenerek 5° hücum açısı görüntüsüyle karşılaştırıldığında hücum

kenarına yaklaşarak daha erken başlamış, ayrıca boyutu büyüyerek daha geç akış tutunmuştur. Bu durumda sürüklenme katsayısının artışına neden olmuştur.



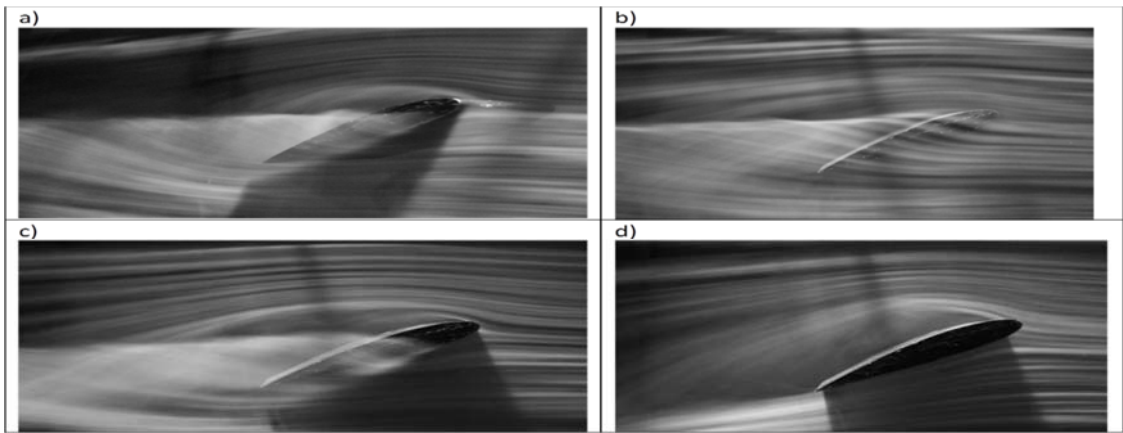
Şekil 2. 8. AR 1 NACA 2415 profili 15° hücum açısında alınmış duman görüntüleri, $Re= 50000$ (a)Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim)

Şekil 2.8 ile aynı profilini 15° hücum açısında duman görüntüleri verilmiştir. Uç girdaplar ve ayrılma kabarcığı giderek artış göstermiştir. Uç kısım görüntüsü incelendiğinde profilde hücum kenarı ayrılması olduğu görülmektedir. Uç girdaplarının artışı sürüklenme katsayısını şekil 2.3 te görüldüğü gibi artırmış, ancak ayrılma kabarcığına kısmen ayrılmasını etkileyerek aşım katsayısını artırmıştır. Orta kısım görüntüsü incelendiğinde ayrılma kabarcığı hücum kenarına daha da yaklaşmış ve ayrılan akış oldukça geç tutunmuştur.



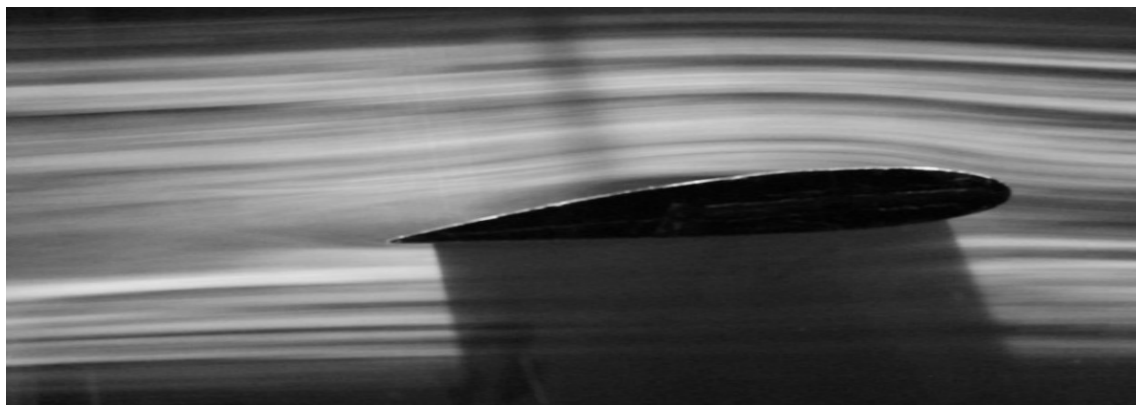
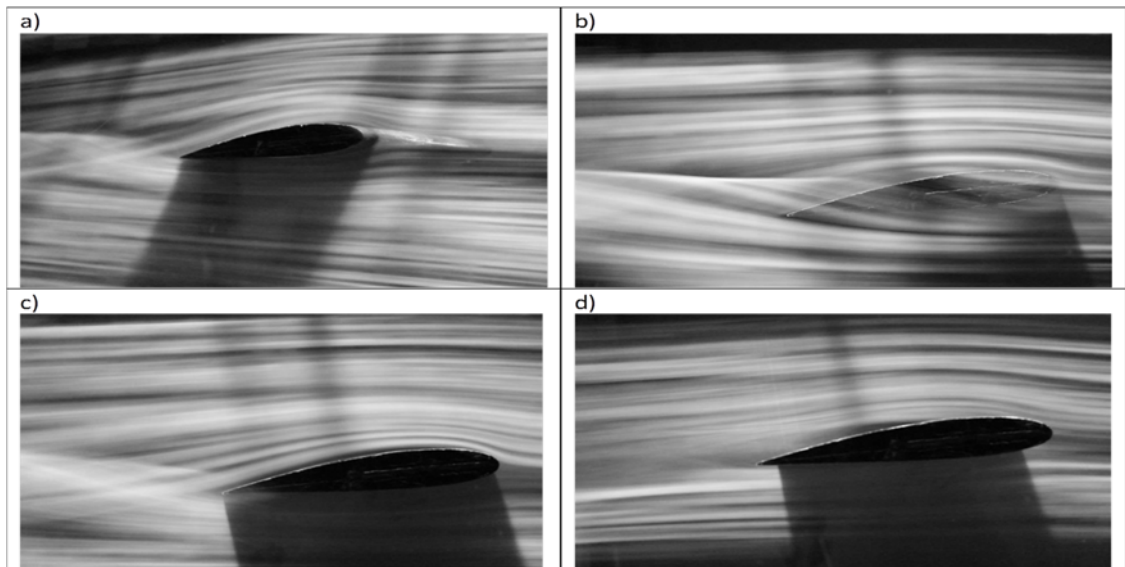
Şekil 2. 9. AR 1 NACA 2415 profili 20° hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$
 (a)Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim)

Şekil 2.9 ile bu profil için 20° hücum açısı duman görüntüleri incelenmiştir. AR 1 değeri için bu hücum açısı kritik noktadır. Şekil 2.9 da b ve c görüntüleri incelendiğinde uç girdaplarının iç kısımlara kadar ilerlediği bu nedenle de sürüklenme katsayısı oldukça artırdığı açıktır. Şekil 2.8 ile karşılaştırıldığında artık akışın tutunamadığı ve ayrılmış akışın olduğu görülmektedir. 15° - 20° hücum açısı görüntüleri farkına bakıldığında akışın ayrılmasının sonucunda kuvvet grafiklerinde sürüklenme katsayısının ani artışına neden olduğu görülmektedir.



Şekil 2.10. AR 1 NACA 2415 profili 25° hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$
 (a)Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim)

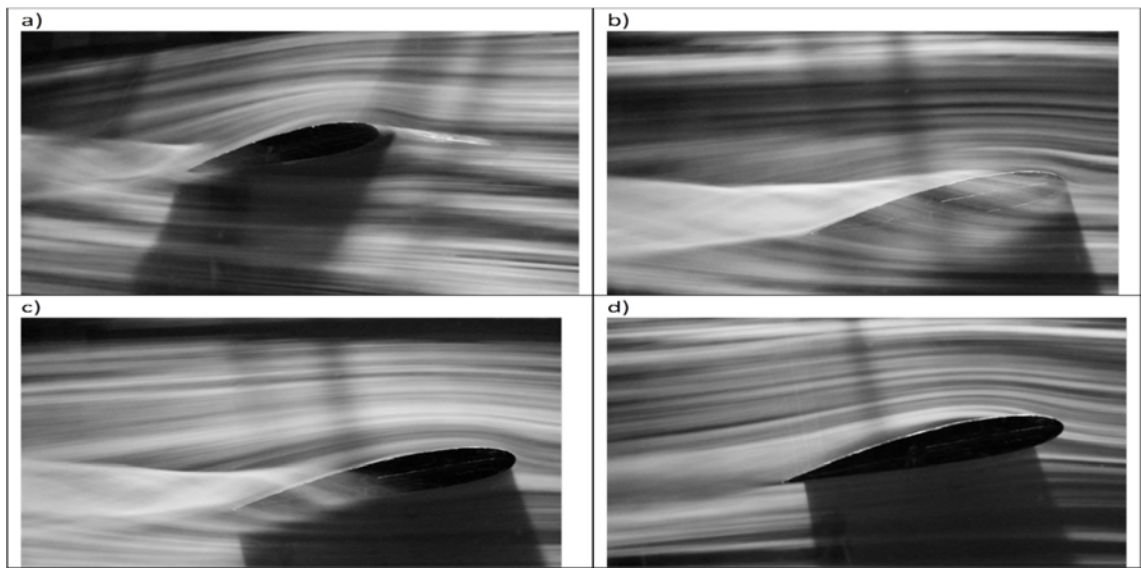
Şekil 2.10 da 25° hücum açısında bu profil için akış görüntüleri verilmiştir. Tutunma kaybı sonrası oluşan akış görüntüleri oldukça kararsız yapıda olduğu görülmüştür. Akış profil üzerinde nerdeyse hiç tutunamamıştır ve ayrılma hücum kenarında başlamıştır, bundan dolayı sürükleme katsayısı hızlı bir şekilde artış göstermiştir. Akışın bu kadar net ayrılmasına rağmen c resmi incelendiğinde uç girdaplarının ayrılan akışı bastırdığı ve tutunma kaybını geciktirme etkisi görülmektedir. Hücum açısı-sürükleme katsayısı grafikleri incelendiğinde 20° - 25° hücum açıları aralığında sürükleme katsayısı farkının oldukça fazla olduğu göstermiştik, uç girdaplarının profilinin tamamını bu hücum açısında etkilemesi oluşan farkın nedenidir.



e)

Şekil 2.11. NACA 2415 AR 1,5 profili 5° hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$ (a)Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim e) Orta kısımda çekim)

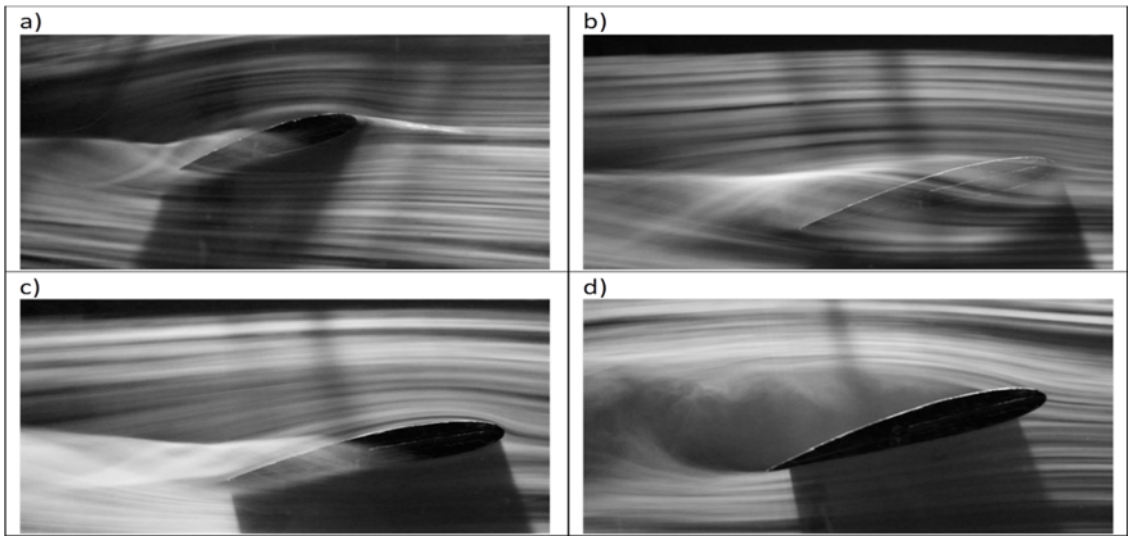
Şekil 2.11 de AR 1,5 profili için 5° hücum açısında duman görüntüleri verilmiştir. Şekil 2.11 incelendiğinde akışın oldukça kararlı ve düzgün olduğu görülmektedir. Uç girdapları b şeklinde yoğun gözükmesine rağmen c şekli incelenecek olursa profilin üst kısımlarını etkileyecek düzeyde görülmemiştir. Orta kısım görüntüsü incelendiğinde laminar ayrılma kabarcığının $0,4 x/c$ - $0,77 x/c$ arasında görülmektedir. Laminar ayrılma kabarcığı bu şekilde hücum kenarından oldukça uzakta oluşmuştur ve tutunmayı fazla etkilememiştir.



e)

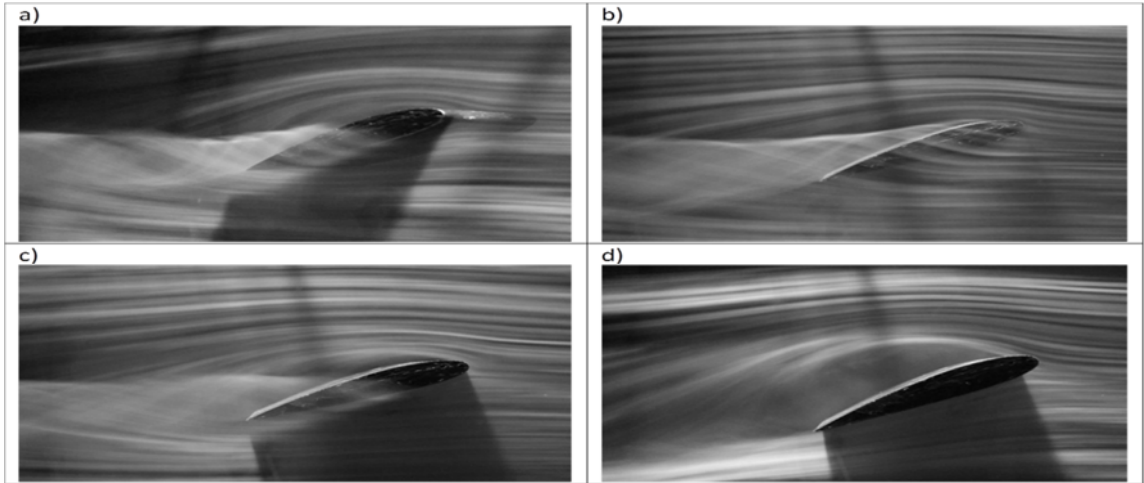
Şekil 2.11. AR 1,5 NACA 2415 profili 10° hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$ (a)Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim e) Orta kısımda çekim)

Şekil 2.12 de 10^0 hücum açısında akış görüntüleri verilmiştir. Akışın laminar olduğu uç girdapları ve ayrılma kabarcığı firar kenarına yakın olduğu görülmüştür. Kuvvet grafikleri incelenecek olursa AR 1,5 profili için 5^0 - 10^0 hücum açıları arasında sürükleme katsayısı değerinde çok az artış, taşıma katsayısı değerinde ise 0,2 birim artış görülmüştür. Şekil 2.12 incelenecek olursa uç girdaplarında 5^0 hücum açısından sonra etkili bir artış göstermediği bu yüzden sürükleme katsayısında önemli bir artışa neden olmamıştır ve yaklaşık olarak laminar ayrılma kabarcığı $0,3 x/c$ - $0,81 x/c$ arasında olduğu için taşıma katsayısını etkileyecek bir ayrılma da görülmemiştir.



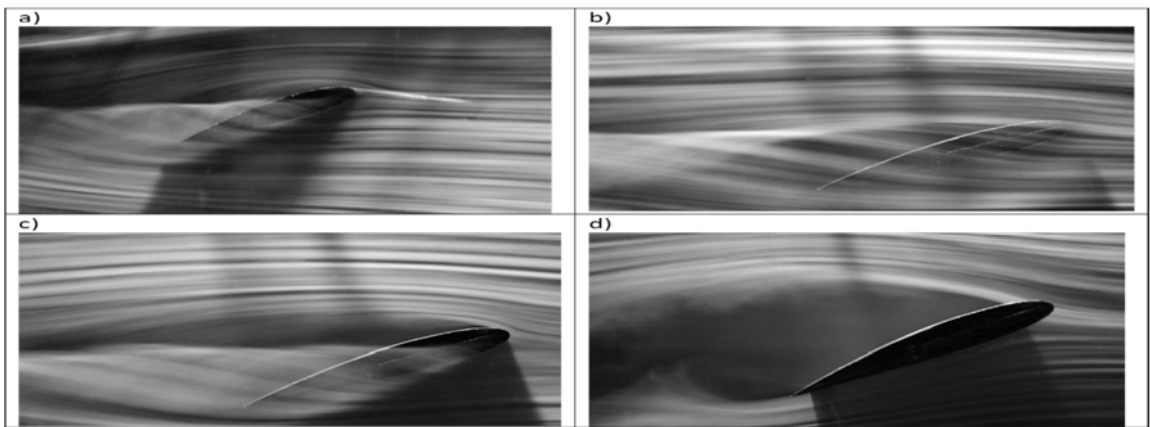
Şekil 2.12. AR 1,5 NACA 2415 profili 15^0 hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$ (a)Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim)

Şekil 2.13. de bu profil için 15^0 hücum açısında duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Şekil 2.13 incelendiğinde uç girdapların arttığı ve profilin üst kısmını etkilediği görülmektedir. Sürükleme katsayısı-hücum açısı grafiklerine baktığımızda 10^0 hücum açısından sonra aşırı olduğu görülmektedir, uç girdaplarının sürüklemeyi artırdığı anlaşılmaktadır. Orta kısım görüntüsü incelendiğinde bu hücum açısında ayrılmış akış görülmektedir. Taşıma katsayısı-hücum açısı grafikleri incelendiğinde 10^0 hücum açısından sonra taşıma katsayısında çok az artış olduğu görülmüştür. Ayrılmış akışı uç girdapları fazlaca bastıramadığı için taşıma katsayısı fazla artış gösterememiştir.



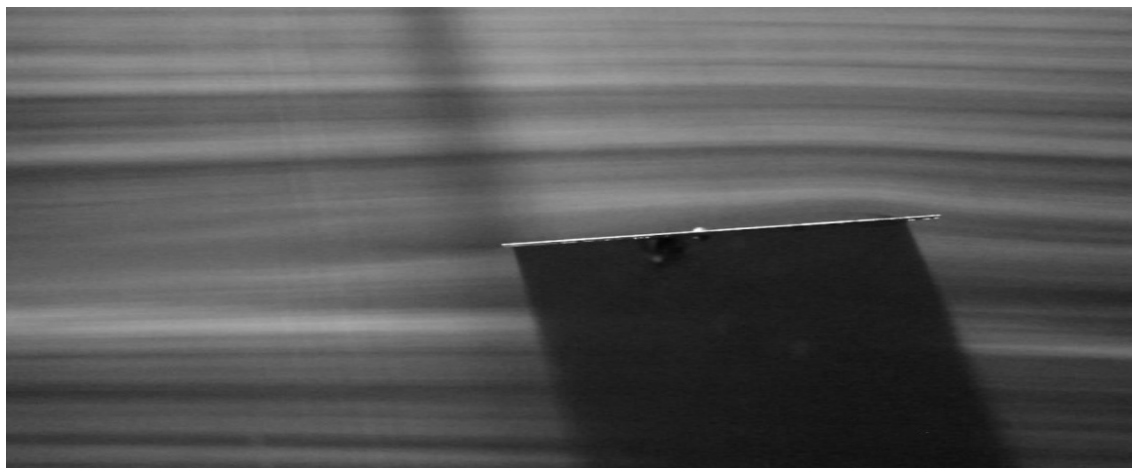
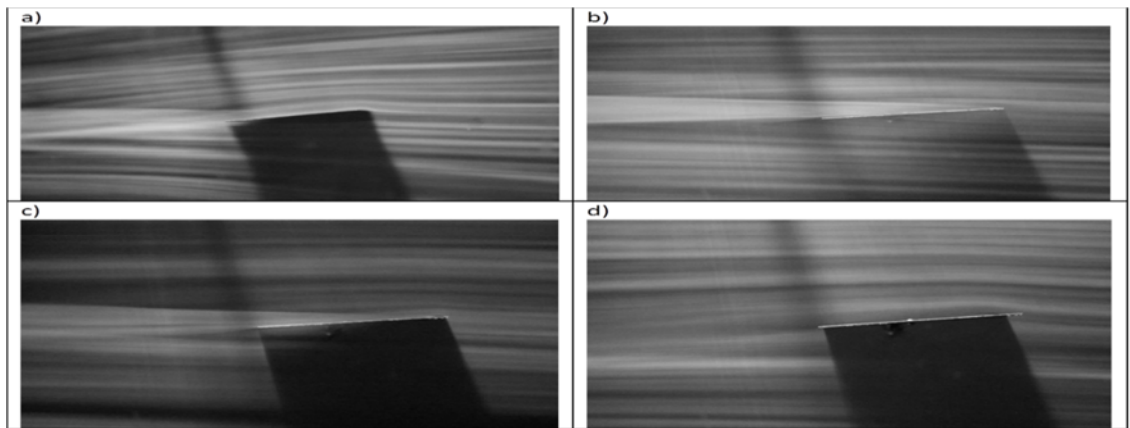
Şekil 2.13. AR 1,5 NACA 2415 profili 20° hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$ (a)Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim)

Şekil 2.13 da 20° hücum açısında bu profil için duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Orta kısım görüntüsü incelendiğinde ayrılma kabarcığı oluşmamış, ayrılmış akış görülmüştür. Şekil c incelendiğinde uç girdaplarının profilinin üst kısmına etki alanı toplam alana oranla çok düşük olduğu için taşıma katsayısını fazla artıramamıştır. Statik kuvvet değerlerini hatırlayacak olursak profil 14° - 20° hücum açıları arasında tutunma kaybına uğramaktaydı. Duman deneylerinden de görüldüğü gibi ayrılmış akış tutunma kaybına neden olmuştur.



Şekil 2. 14. AR 1,5 NACA 2415 profili 25° hücum açısında akış görüntüleri, $Re=50000$ (a)Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim)

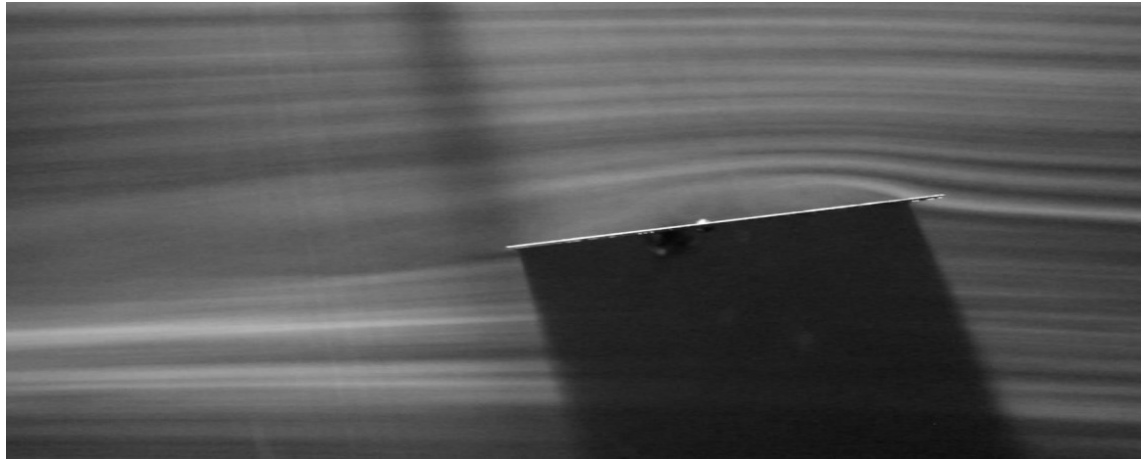
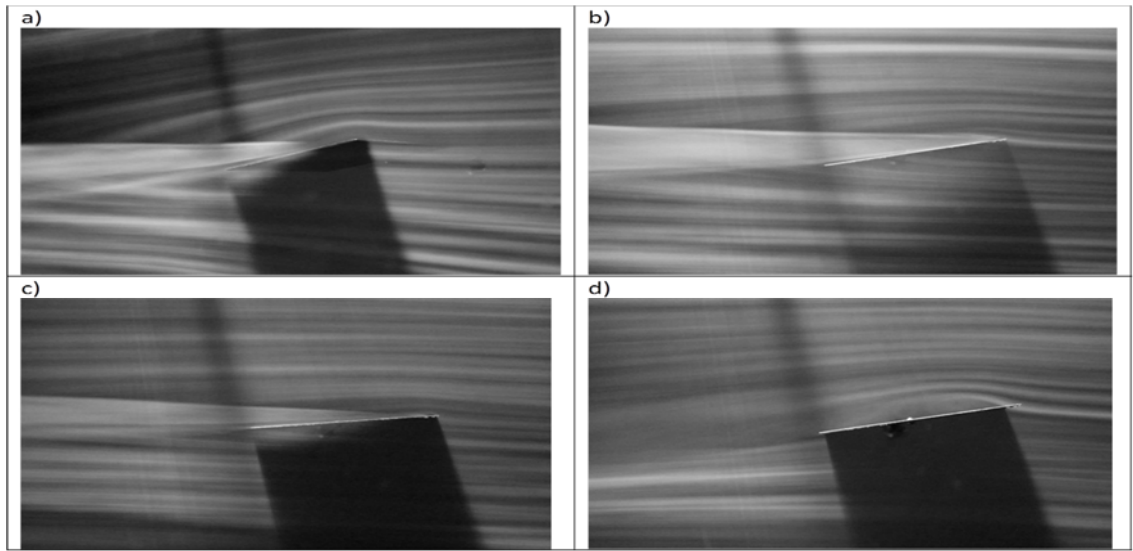
Şekil 2.14 ile 25° hücum açısında tutunma kaybı sonrası kararsız akışın görüntüleri verilmiştir. Şekil b ve c incelendiğinde uç girdaplarının küçük hücum açılarında laminar ayrılma kabarcığını etkileyerek taşıma katsayısını artırdığı görülmekteydi ancak, 25° hücum açısında uç girdaplar da ayrılmış akış görüntüsü izlemektedir. Orta kısım görüntüsün de ise akış tamamen ayrılmış ve bu ayrılma hücum kenarına daha yakın bölgeden başlayarak taşıma kuvvetini oldukça düşürmüştür. Statik kuvvet değerlerine bakacak olursak 20° - 25° hücum açısı aralığında taşıma katsayısı ani düşüşle 0.1 birim azalmıştır. Benzer şekilde sürüklenme katsayısı değeri de 0.2 birim artmıştır. Akışın tamamen ayrılması ve uç girdaplarının da oldukça büyümesi kuvvet değerlerini bu şekilde etkilemiştir.



e)
Şekil 2.15. AR 1 Düz Plaka profili 5° hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$

(a)Perspektif çekim b) Uç kısımdan çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim e) Orta kısımda çekim)

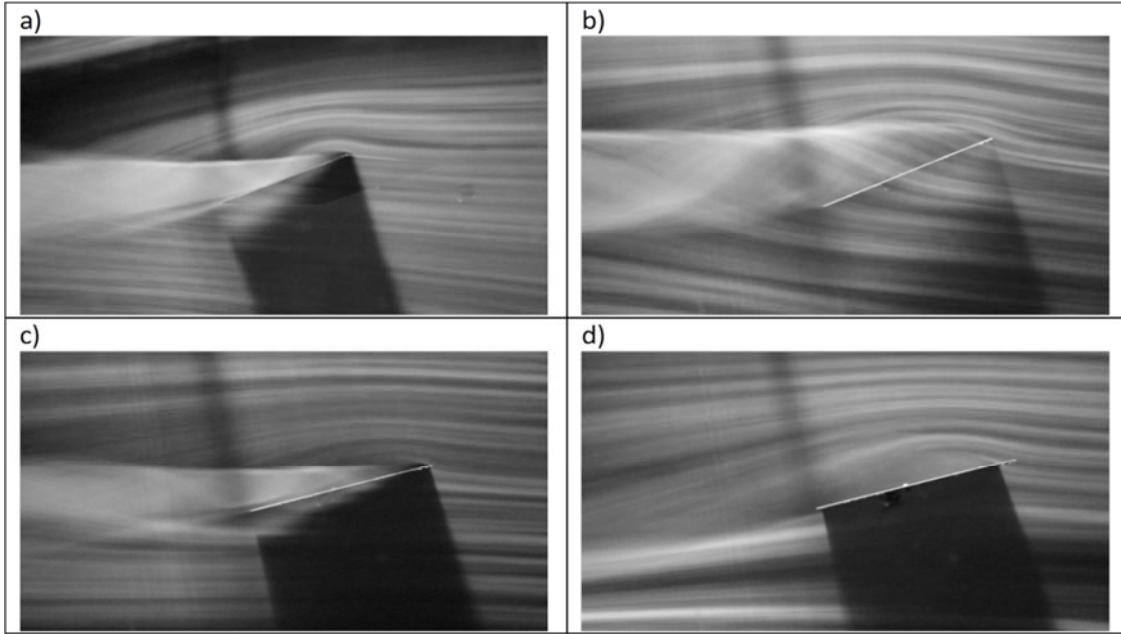
Şekil 2.15. de Düz Plaka AR 1 profilin 5^0 hücum açısında yapılmış duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde akışın laminar olduğu profil üzerinde düzgün tutunduğu görülmüştür. Orta kısım görüntüsü incelendiğinde laminar ayrılma kabarcığı görülmemiştir. Uç girdapları görüldüğü gibi profilin üst kısmını etkilemeyecek kadar küçük olmuştur.



e)
Şekil 2.16. AR 1 Düz Plaka profili 10^0 hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$
(a)Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim e) Orta kısımda çekim)

Şekil 2.16 de 10^0 hücum açısında profil için duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Uç girdaplarının arttığı ve hücum kenarına yaklaştığı görülmüştür. Bu girdaplar statik

kuvvet değerlerinde sürüklenme kuvvetini artırmıştır ancak şekil c ye bakacak olursak uç girdaplar profil üzerinde etkin olduğu görülmektedir, bu yüzden taşıma katsayısında artış olmuştur. Ayrılma kabarcığı yaklaşık olarak $0,23x/c-0,69x/c$ arasında oluşmuştur.

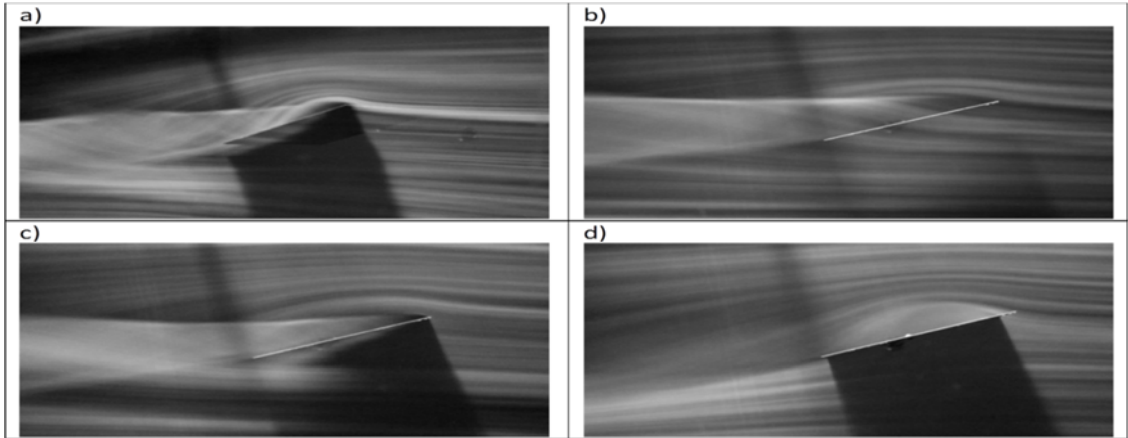


Şekil 2.17. AR 1 Düz Plaka profili 15° hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$

(a)Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim)

Şekil 2.18 de 15° de hücum açısında profil için duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde ayrılma kabarcığı hücum açısı artışıyla artmaya devam etmiş ve hücum kenarına yaklaşmıştır. Şekil b ve c de görüldüğü gibi uç girdapları artarak sürüklenme katsayısını artırmıştır. Ancak uç girdapları sarmal yapı oluşturarak profilinin üst kısmına yönelmiştir, bu nedenle laminar ayrılma kabarcığının ayrılmış akışa dönüşmesini engelleyerek taşıma katsayısını artırmıştır.

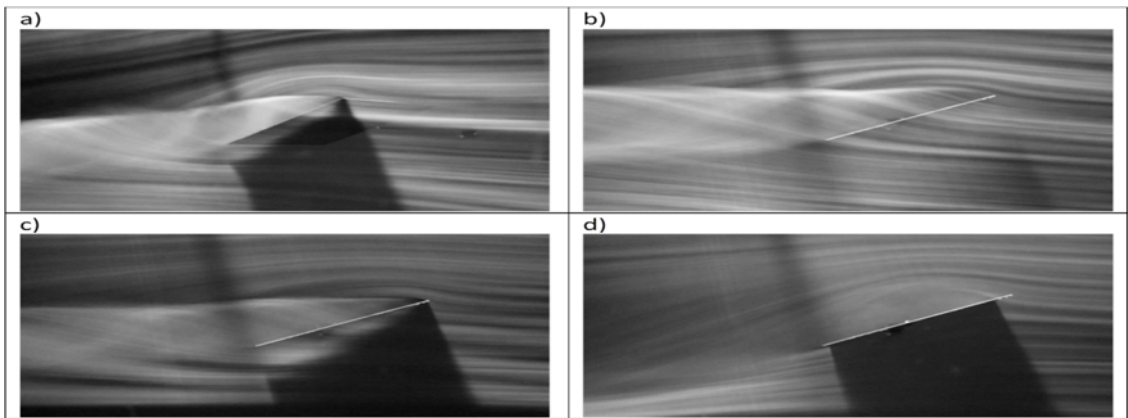
Statik kuvvet değerleri incelendiğinde yaklaşık 15° hücum açısında AR 2 ve AR 1,5 profillerinde yumuşak tutunma kaybı görülmüştür, ancak AR 1 profilinin alanının küçük olmasından dolayı uç girdaplar bu profilde etkin olmuş ve tutunma kaybını engellemiştir.



Şekil 2.18. AR 1 Düz Plaka profili 20° hücum duman görüntüleri, $Re=50000$

a) Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim

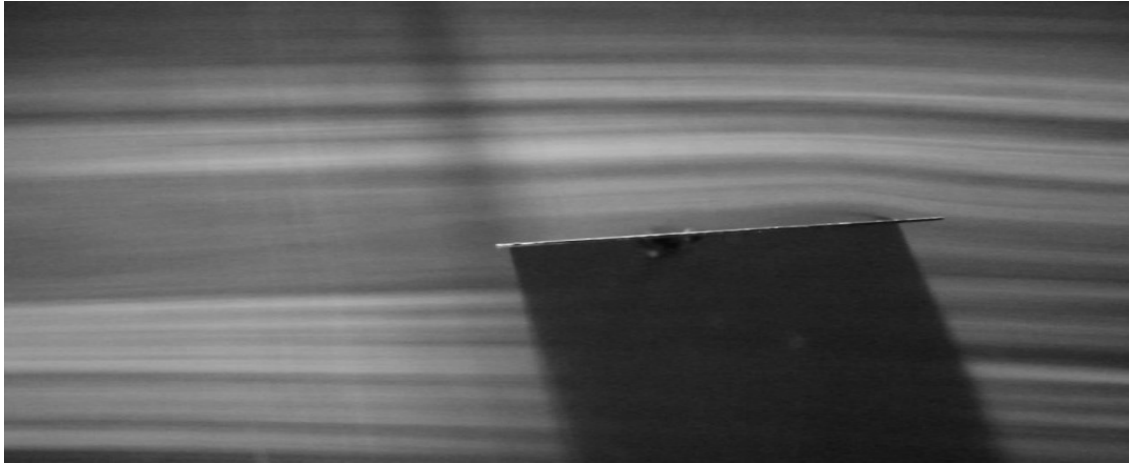
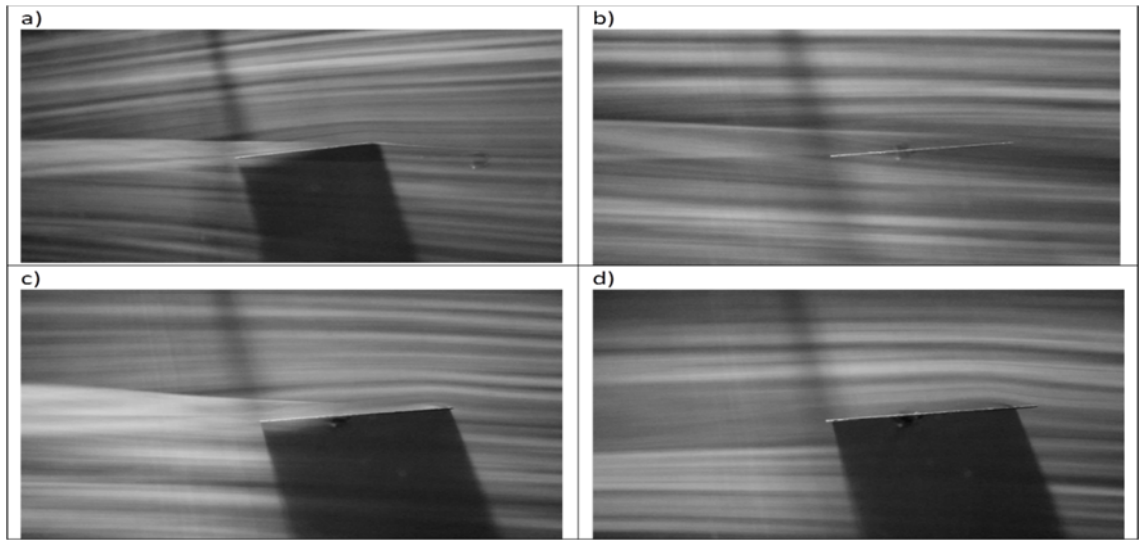
Şekil 2.18 de 20° de hücum açısında bu profil için duman deneyi görüntüleri verilmiştir. AR 1 profili diğer AR değerleri ile kıyaslandığında bu hücum açısında tutunma kaybı yaşanması beklenmekteydi. Fakat AR 1 profilin de 25° hücum açısına kadar tutunma kaybı görülmedi. Görüntüler incelendiğinde ayrılma kabarcığı oldukça büyük oluşmuş ancak akış tekrardan tutunmuş ve tutunma kaybı oluşumuna kısmen engellemiştir. Ayrıca bu profil için kanat açıklığı küçük olduğu için her iki tarafından kopan uç girdaplar profilin orta noktasında buluşmuş ve buluşma da tutunma kaybı oluşumuna engel olmuştur.



Şekil 2.19. AR 1 Düz Plaka profili 25° hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$

(a) Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim)

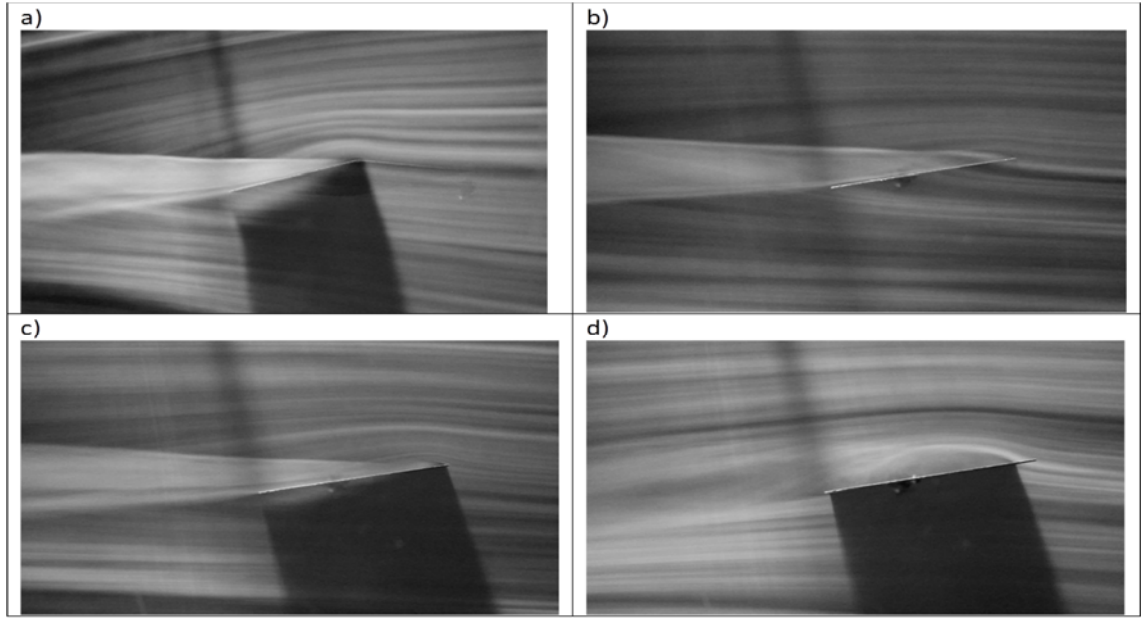
Şekil 2.19 de profil için 25° hücum açısında duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Şekil 2.18 de anlattığımız tüm durumlar bu hücum açısı içinde geçerlidir. Uç girdapları şekilde görüldüğü gibi sarmal yapı oluşturarak profilin orta noktasına kadar etki etmiştir, bu yüzden ayrılmış akış yerine kopan girdaplar tutunmayı sağlamıştır. Ayrılma kabarcığının ve uç girdapların oldukça büyük olmasına rağmen tutunma kaybı bu hücum açısında da görülmemiştir.



e)
Şekil 2.20. AR 1,5 Düz Plaka profili 5° hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$
(a) Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim e) Orta kısımda çekim)

Şekil 2.20 da AR 1,5 profili için 5° hücum açısında duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Bu hücum açısında oluşan uç girdapları ve ayrılma kabarcığı açık şekilde

verilmiştir. Akışın profil çevresinde laminar ve düzenli olduğu açıktır. Yaklaşık olarak ayrılma kabarcığı $0,14 x/c-0,42 x/c$ arasında oluşmuştur.



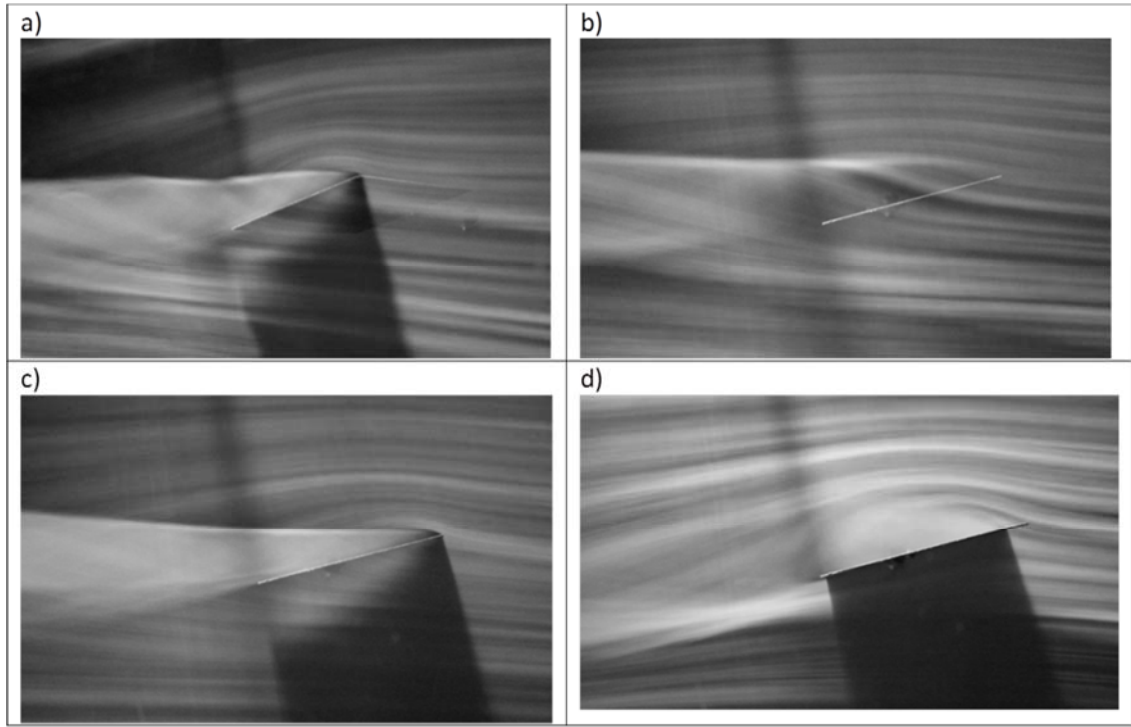
e)

Şekil 2.21. AR 1,5 Düz Plaka profili 10° hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$

(a)Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim e) Orta kısımda çekim)

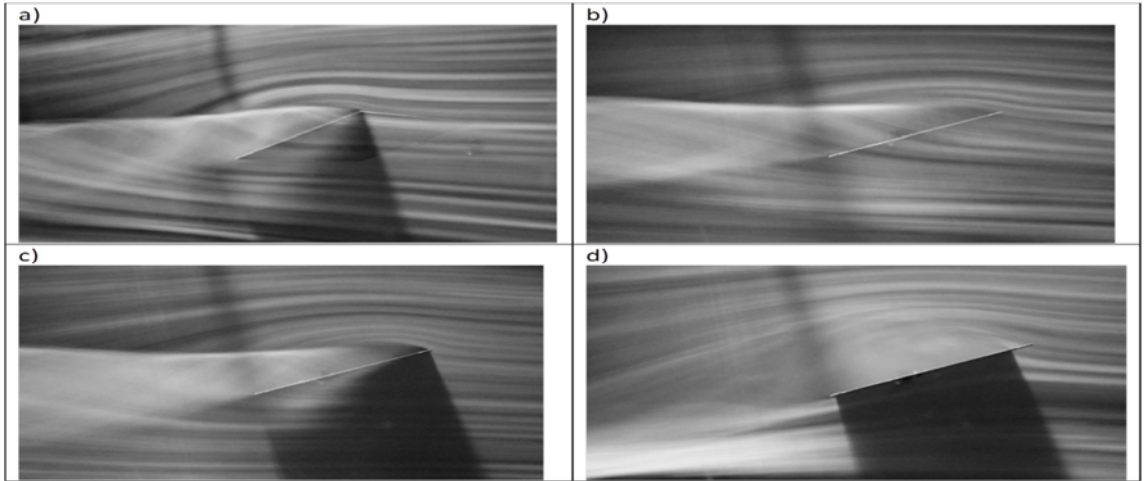
Şekil 2.21 de 10° hücum açısı için duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Ayrılma kabarcığının ve uç girdaplarının büyüklüğü hücum açısı artışıyla artmaya devam etmiştir. Uç girdapları neredeyse hücum kenarından başlamıştır ve sürükleme katsayısının artmasına neden olmuştur. Yaklaşık olarak laminar ayrılma kabarcığı $0,08 x/c-0,71 x/c$

arasında görülmüştür. Laminer ayrılma kabarcığının alanı artmış ve hücum kenarına oldukça yaklaşmıştır ancak uç girdaplar şekil c de görüldüğü gibi profilinin üst kısmına yapışarak devam ettiği için taşıma katsayısını artırıcı etki yapmıştır.



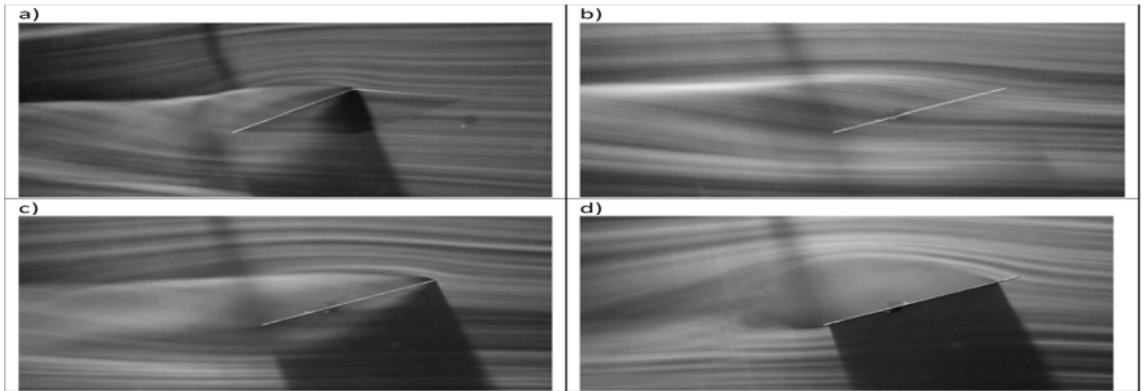
Şekil 2.22. AR 1,5 Düz Plaka profili 15° hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$ a) Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim

Şekil 2.22 de 15° hücum açısında profil için duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde ayrılma kabarcığının ve uç girdaplarının oldukça arttığı görülmüştür. Orta kısım görüntüsünde ayrılma kabarcığı hücum kenarına oldukça yakın bölgeden başlamıştır ve aynı şekilde uç girdaplarında nerdeyse hücum kenarında başlamıştır. Bu yüzden sürüklenme kuvveti 10° hücum açısından sonra oldukça artmıştır. Orta kısım görüntüsü incelendiğinde ayrılmış akış dan bahsedilebilir, ancak dumanın orta kısımda yoğun olduğu da görülmektedir. Kopan uç girdapları bu bölgede yoğunlaşmış ve tutunma kaybını geciktirmiştir.



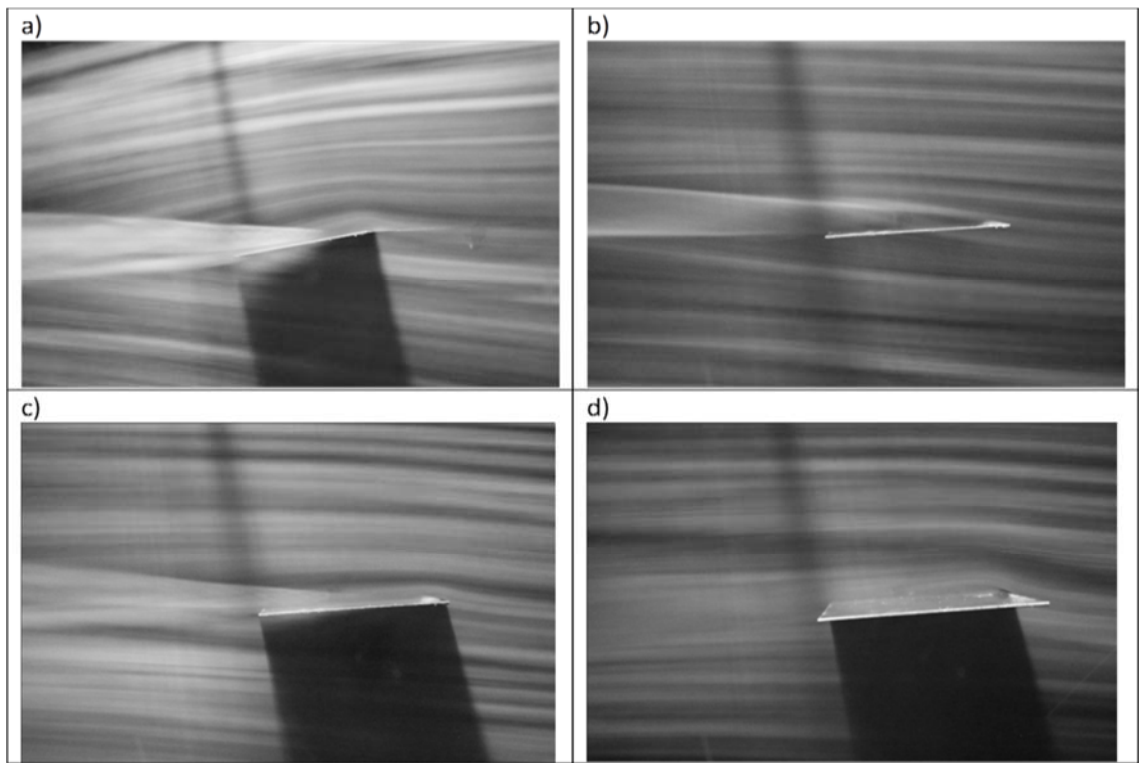
Şekil 2.23. AR 1,5 Düz Plaka profili 20° hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$
 a) Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim

Şekil 2.23 da bu profil için 20° hücum açısında duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Duman deneyi görüntüleri incelendiğinde uç girdaplarının ve ayrılma kabarcığının oldukça arttığı görülmüştür. Statik kuvvet değerleri incelendiğinde profil 18° hücum açısında tutunma kaybına uğramıştır. Orta kısım görüntüsü incelendiğinde akış tamamen hücum kenarından başlayarak ayrılmıştır ve bu bölgede yoğunluk 15° hücum açısında ki kadar yoğunluk oluşmamıştır. Uç girdapları şekil c de görüldüğü gibi 15° hücum açısında ki kadar ayrılmış akışı bastıramamıştır. Bu yüzden tutunma kaybı görülmüştür.



Şekil 2. 24. AR 1,5 Düz Plaka profili 25° hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$
 (a) Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim)

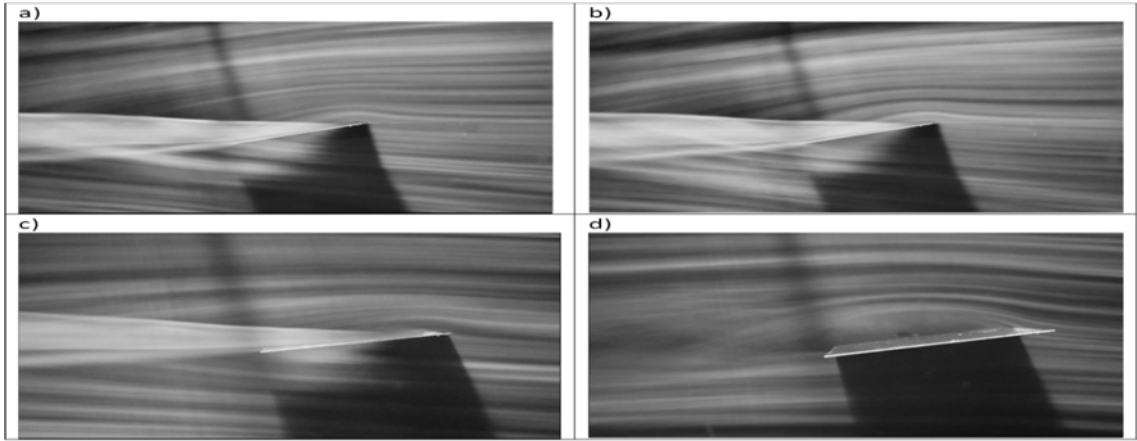
Şekil 2.24 de 25^0 hücum açısı için duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Akışın karasız ve düzensiz olduğu görülmektedir. Şekil b ve c incelendiğinde uç girdaplarının oldukça büyüdüğü ve 20^0 hücum açısından sonra profilin üst kısmında yoğunluk oluşturamadığı ve ayrılmış akışla birlikte devam ettiği görülmektedir. Orta kısım görüntüsü incelendiğinde akış hücum kenarından ayrılmış ve orta kısımda neredeyse akışın hiç olmadığı görülmektedir.



Şekil 2. 25. AR 2 Düz Plaka profili 5^0 hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$

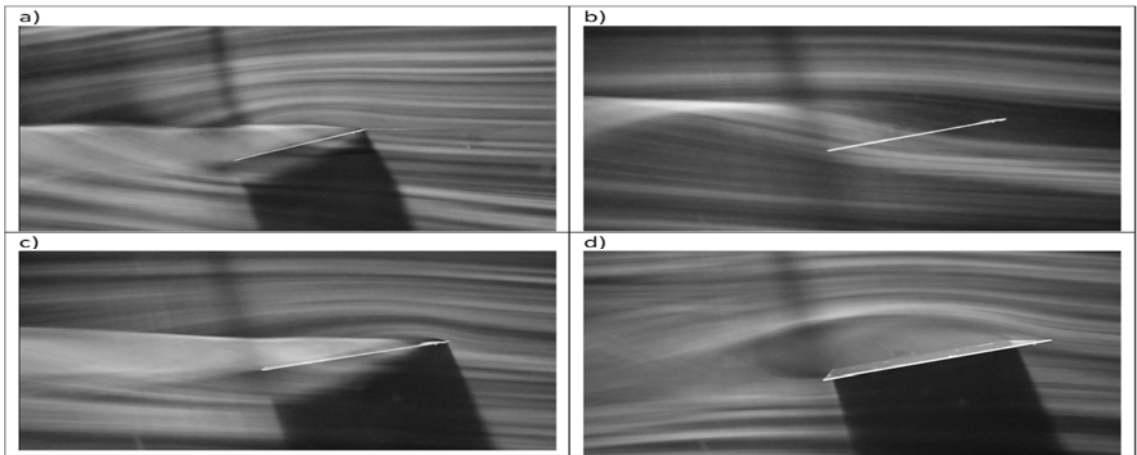
a) Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim

Şekil 2.25 AR 2 profilinin 5^0 hücum açısında duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde profil çevresindeki akış açık şekilde görülmektedir. Uç girdapları ve ayrılma kabarcığı oldukça küçük görülmektedir.



Şekil 2. 26. AR 2 Düz Plaka profili 10^0 hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$
(a)Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim)

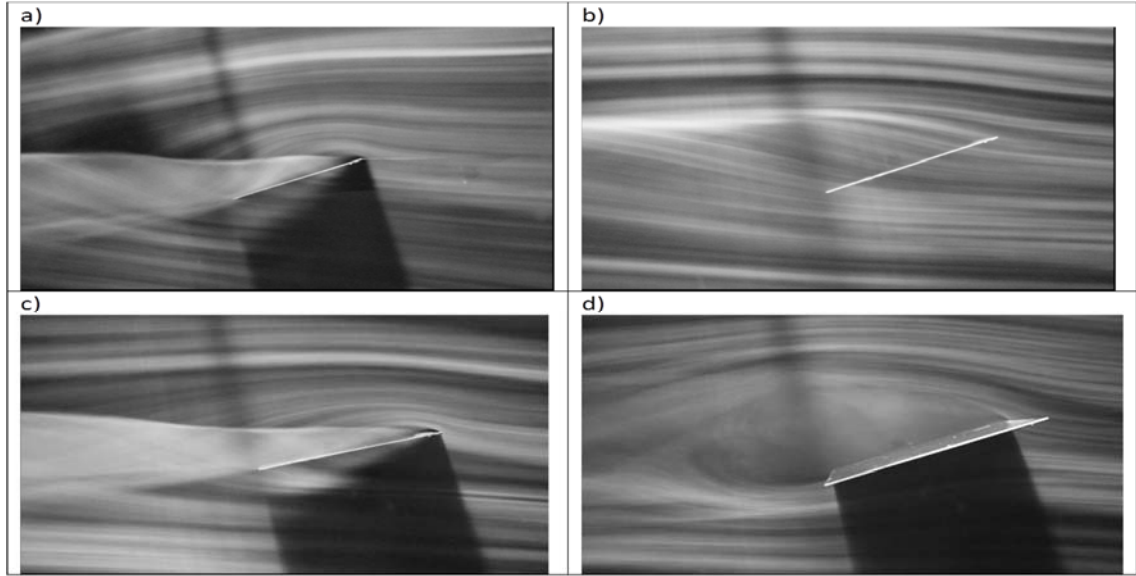
Şekil 2.26 de bu profil için 10^0 hücum açısında duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde uç girdapları ve ayrılma kabarcığı hücum açısıyla artış göstermiş ve hücum kenarına yaklaşmıştır.



Şekil. 2.27. AR 2 Düz Plaka profili 15^0 hücum açısında duman görüntüleri
a)Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim

Şekil 2.27 de bu profil için 15^0 hücum açısında duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Statik kuvvet deneyi grafikleri incelendiğinde bu profil için 15^0 hücum açısı tutunma kaybı açısidir. Duman deneyi görüntüleri incelendiğinde uç girdaplarının büyüklüğü

oldukça artmıştır. Orta kısım görüntüsü incelediğinde akışın erken koptuğu açıktır, ancak bu kopma aşırı büyük olmadığı için taşıma kuvvetinde ani düşüşe sebep olmamıştır.



Şekil 2. 28. AR 2 Düz Plaka profili 20° hücum açısında duman görüntüleri, $Re=50000$
a) Perspektif çekim b) Uç kısmından çekim c) Uçtan $x/c=0,1$ kadar içerden çekim d) Orta kısımda çekim

Şekil 2.28 de bu profil için 20° hücum açısında duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Tutunma kaybı sonrası görüntüler incelendiğinde akışın kararsız olduğu uç girdaplar ve ayrılma kabarcığının değerleri oldukça büyümüştür.

3. BÖLÜM

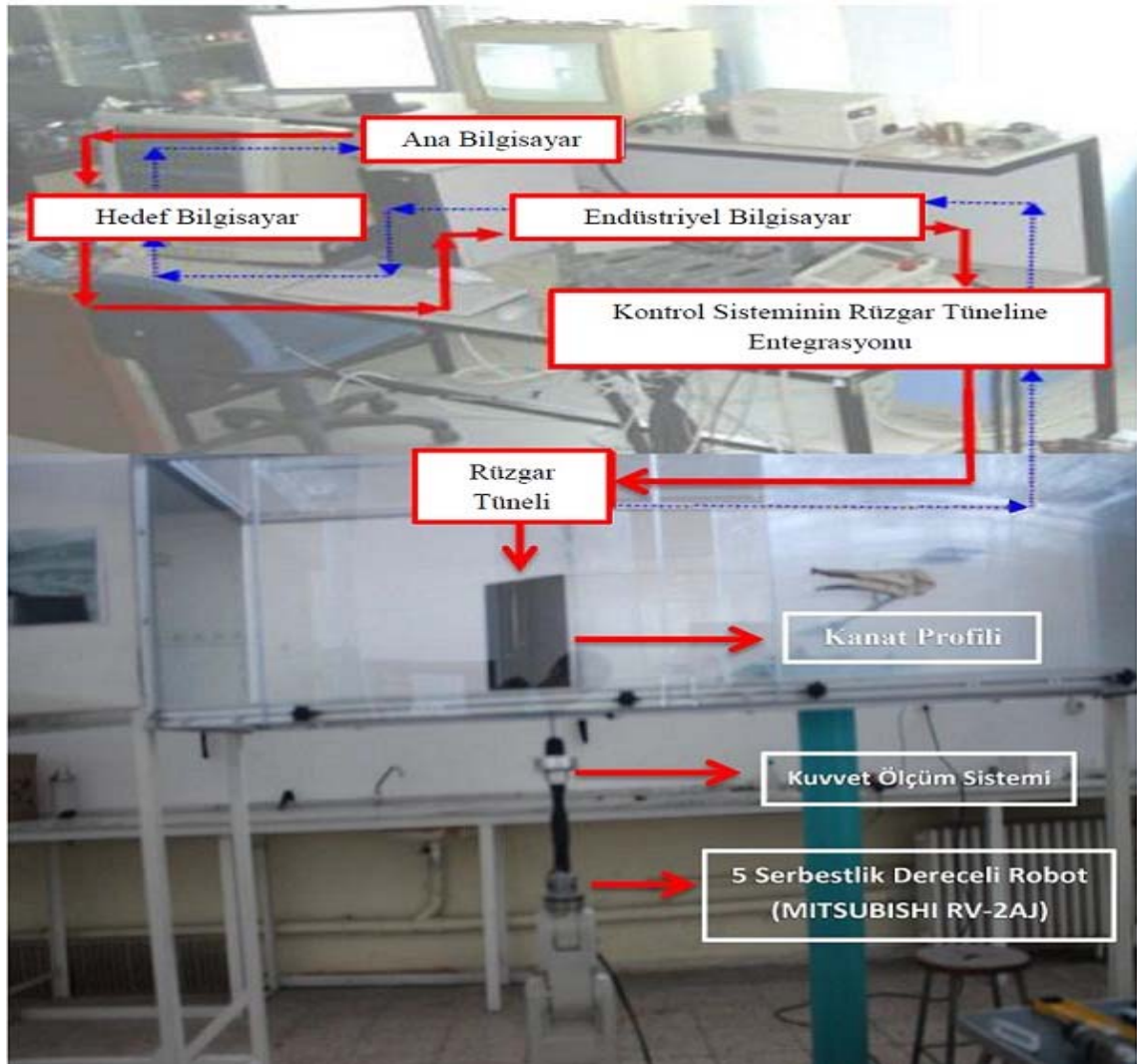
Yunuslama Yapan Kanat Deneyleri

3.1 GİRİŞ

Bu bölümde statik kuvvet değerleri tespit edilen kanat profillerinin yunuslama hareketi yapması sonucu oluşak aerodinamik parametreleri incelenmiştir. Kuşların ve böceklerin kanat hareketi sekiz çizen sinüs dalgası şeklindedir. Kanat profiline sinüs dalgası hareketi yaptırılmış ve kuşların ve böceklerin kanat hareketi incelenmiştir. Yapılan bu yunuslama hareketi çalışmalarını 5 serbestlik dereceli robot(MITSUBISHI RV-2AJ) ile yapılmıştır. Deneysel sistem elektronik yapısında bilgisayar ile deneysel sistem arasında haberleşme ve veri transfer işlemleri Matlab X-PC Hedef ile gerçekleştirilmiştir. Rüzgar tüneline robot ile kuvvet sisteminin bağlantısı şekil 3.1 de verilmiştir.

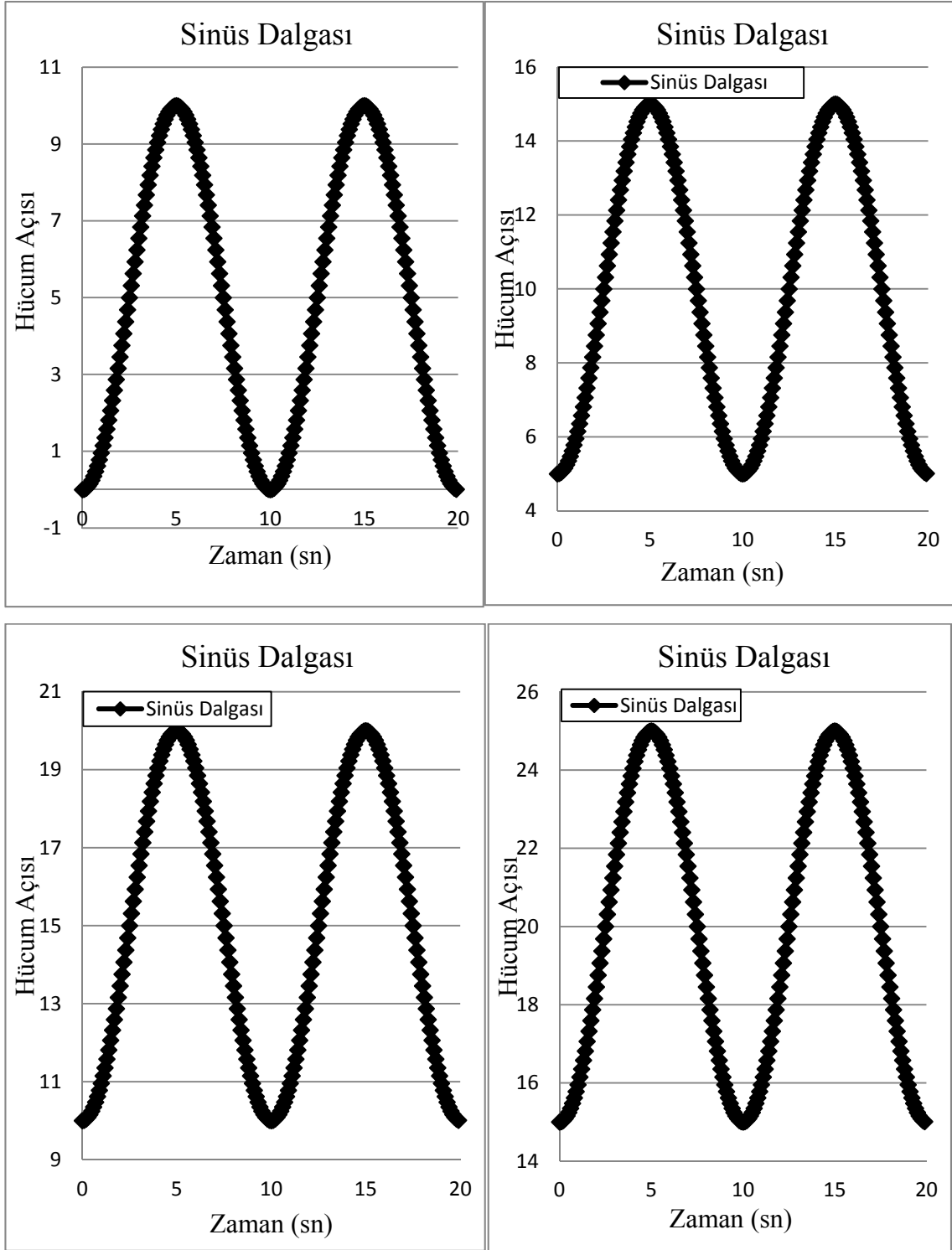
Robota 4 farklı açı aralıklarında sinus dalgaları(0-10, 5-15, 10-20, 15-25) gönderilmiştir. Sinüs dalgaları tam turunu yaklaşık 10 sn de tamamlamaktadır. Her bir deney için 100 tam tur sinus dalgası uygulanmış ve sonucunda bu 100 dalganın ortalaması alınarak veriler elde edilmiştir.

Alınan bu ortalama değerlerde ilk en küçük değer ile en büyük değer arası yukarı hareket olarak tanımlanmış, en büyük değer ile sonraki en küçük değer arası aşağı hareket olarak tanımlanmıştır. Tanımlanan bu değerlerle statik kuvvetin farkları taşıma ve sürükleme katsayıları grafikleriyle aşağıdaki gibi verilmiştir.

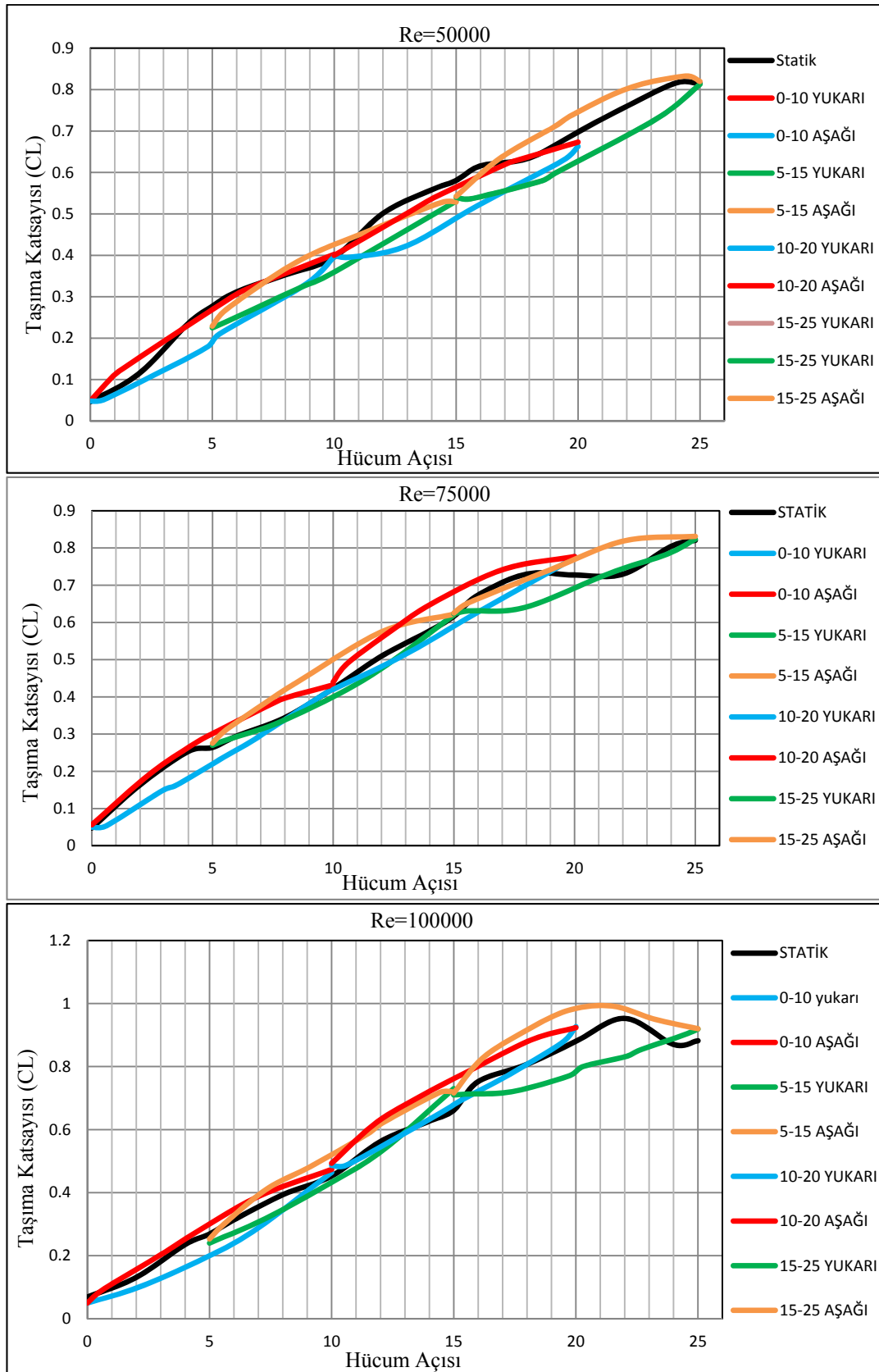


Şekil 3. 1. Yunuslama hareketi yapan deney düzeneği

Deneysel sistem ayrıca kontrol ve haberleşmeyi oluşturan üç bilgisayar içermektedir. Bunlardan birincisi Ana bilgisayar olarak adlandırılmaktadır ve MATLAB yazılımının hedeflenen yörünge verilerini oluşturduğu ve bu verileri Hedef PC olarak adlandırılan ikinci PC'ye gönderen bilgisayardır. Hedef PC MATLAB-XPC sisteminin parçası olan ve gerçek sisteme verileri gönderen bilgisayardır. Üçüncü bilgisayar olarak endüstriyel PC kullanılmış olup, bu bilgisayar hedef PC'den gelen verilere sürücü ve robot kontrolcüsünün istediği gerekli düzenlemeleri yapar ve robota gönderir. Kurulan bu deney düzeneğinde MATLAB/SIMULINK programı üzerinde ki yazılım ile ana bilgisayardan gelen sinüs dalgası robota aktarılır ve robotta kanat profiline yunuslama hareketi yaptırır. Robota gönderilen sinüs dalgası denklemi $y=A\sin(x)$ olup dalga grafikleri şekil 3.2 de gösterilmiştir.

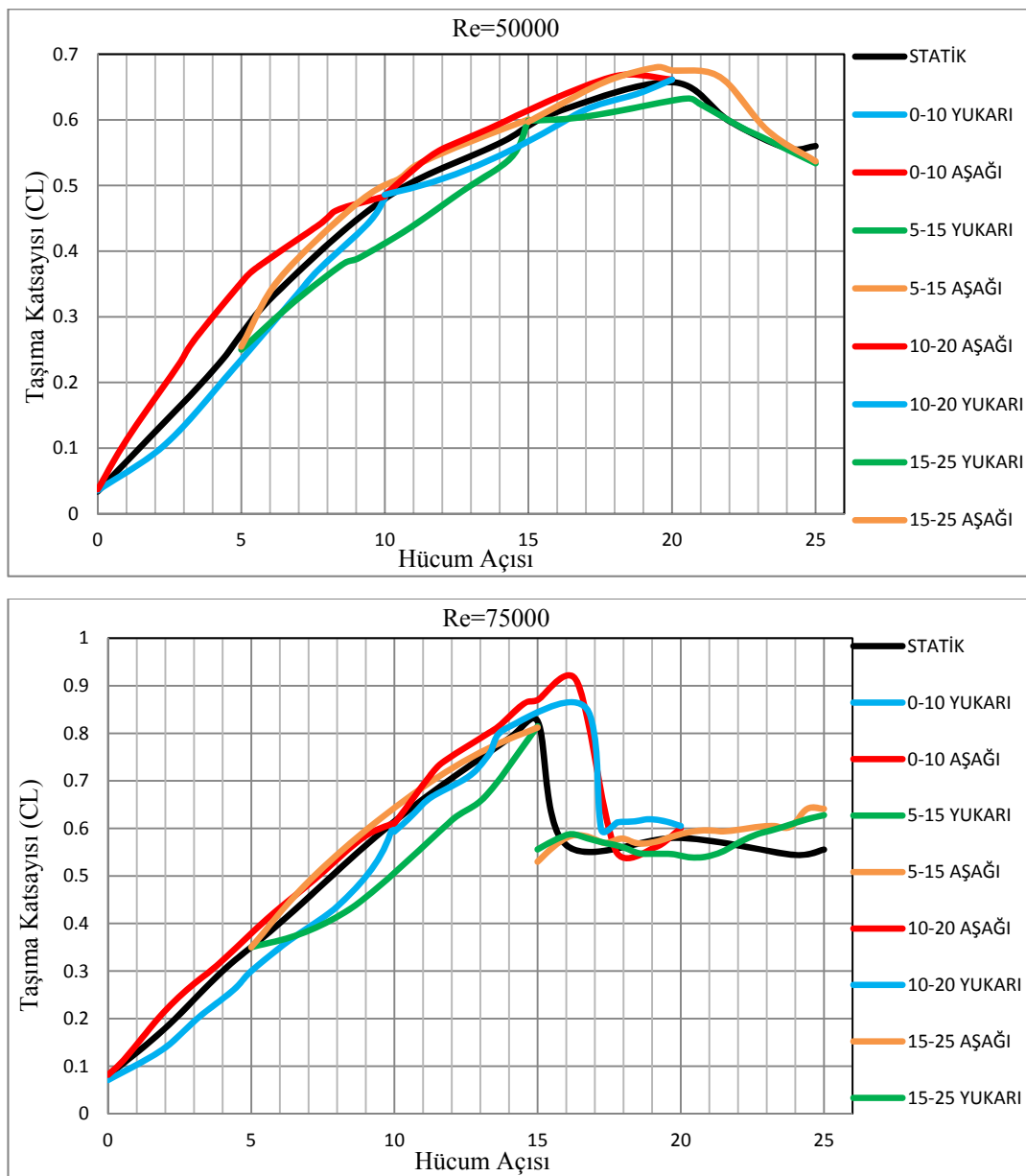


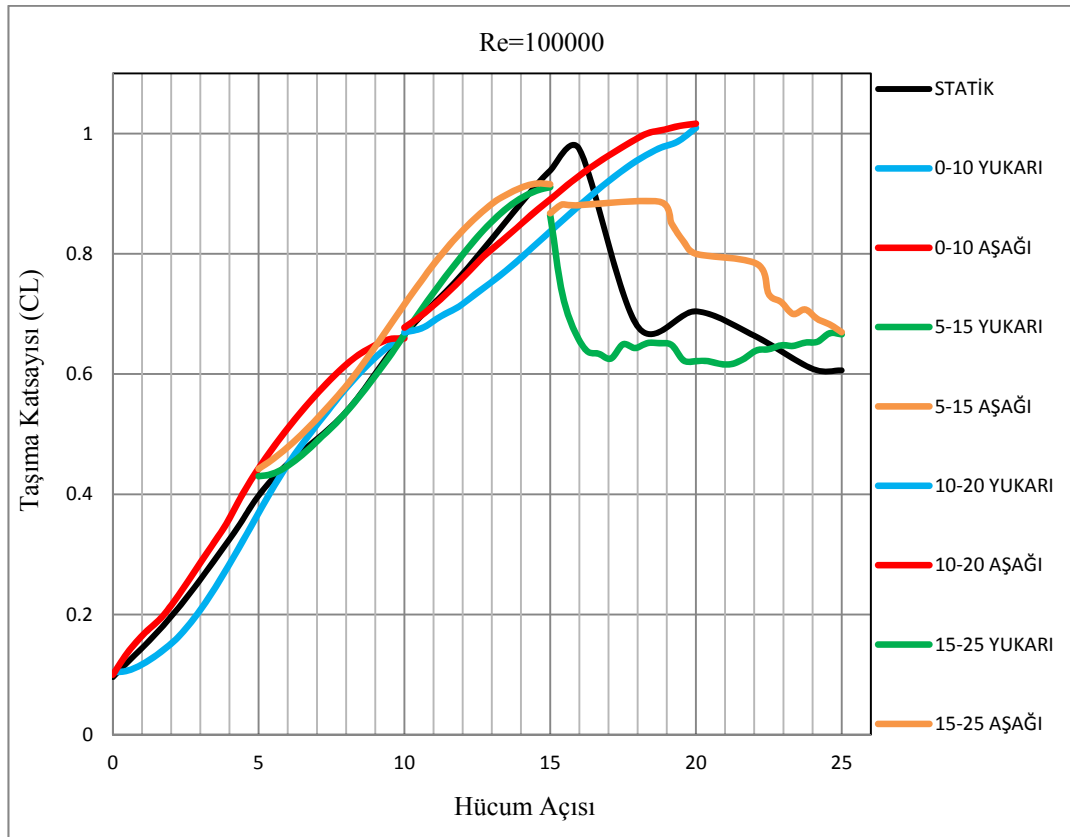
Şekil 3. 2. Robota gönderilen sinus dalgaları



Şekil 3. 3. NACA 2415 AR 1 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketinin taşıma katsayısı grafiği

Şekil 3.3 de NACA 2415 AR 1 profilinin yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile taşıma katsayısı grafiği değişimi farklı Re sayılarının da verilmiştir. Farklı Re sayılarında statik kuvvetle yunuslama hareketi sonucu oluşan taşıma kuvveti değerleri aynı değerde oluşmuştur. 0^0 - 10^0 hücum açısı aralığında her bir Re sayısı değişimi için yunuslama hareketi sonucu oluşan aşağı hareket statik kuvvetten daha yüksek olduğu, yukarı hareket ise statik kuvvetten daha düşük değerde görülmektedir. Diğer hücum açıları değişiminde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

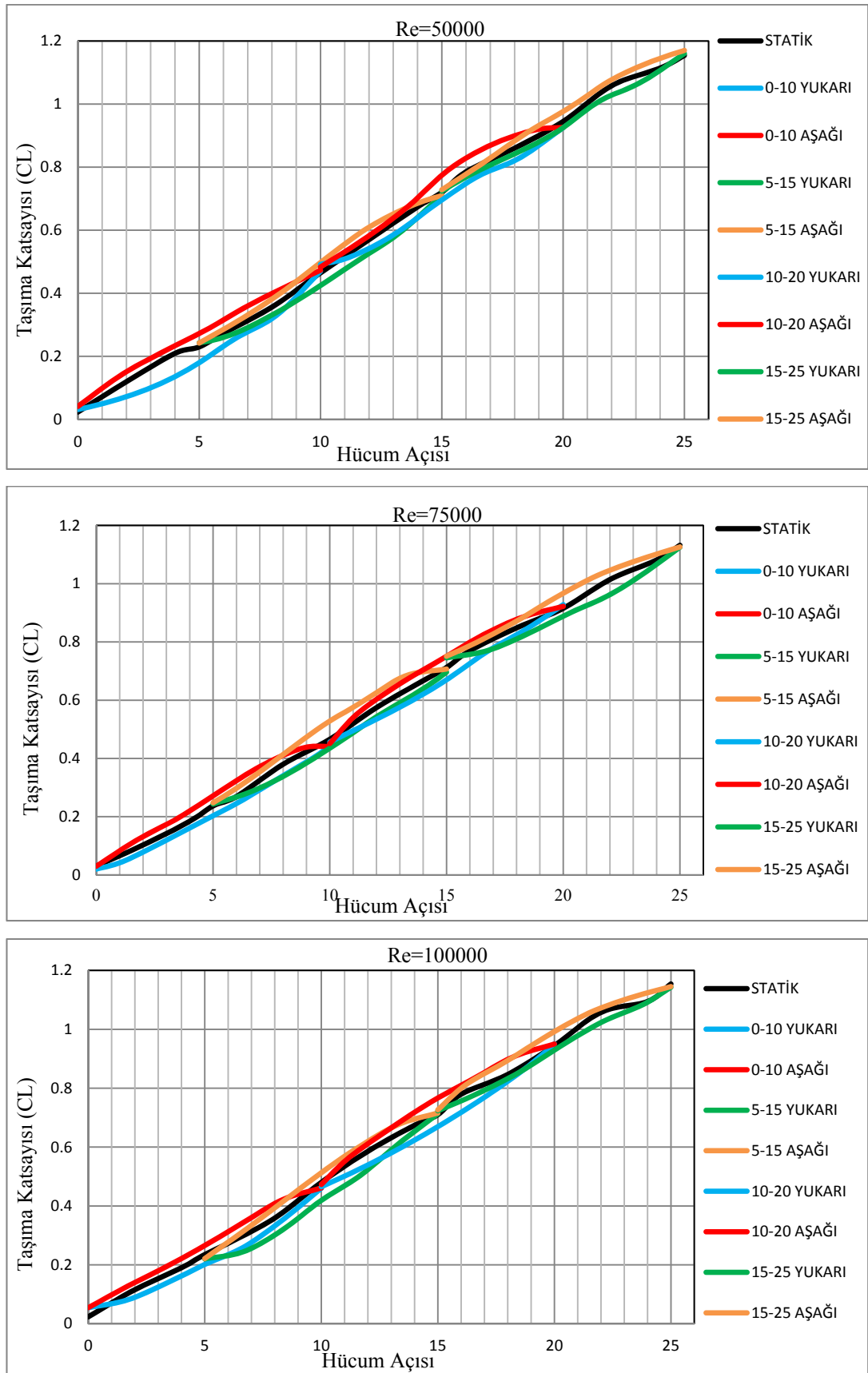




Şekil 3. 4. NACA 2415 AR 1,5 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile taşıma katsayısı grafiği

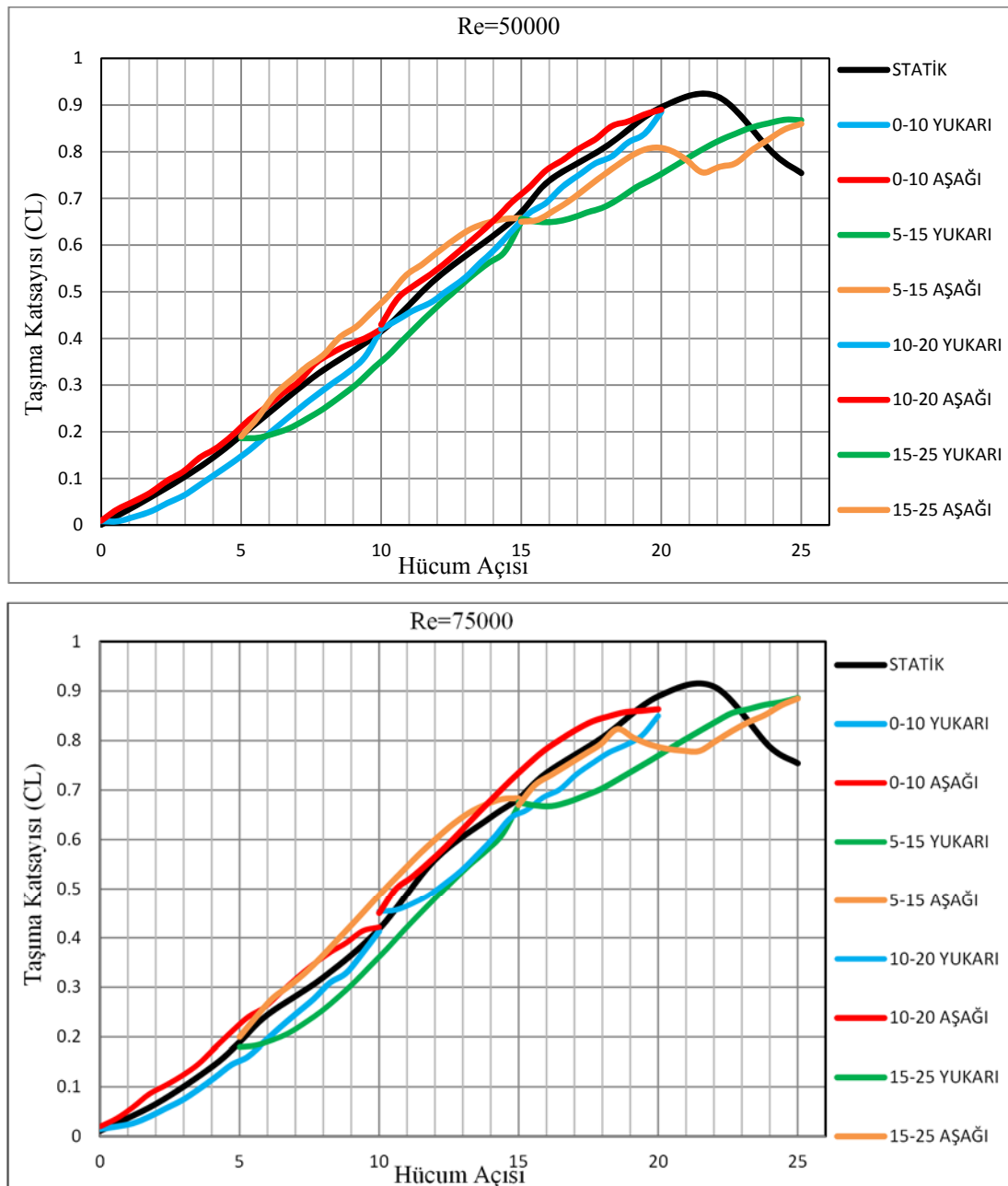
Şekil 3.4 NACA 2415 AR 1,5 profilinin taşıma katsayısı grafiği yukarıda verilmiştir. Grafikler incelendiğinde AR 1 değerinde olduğu gibi Re sayısı artışıyla aynı hücum açısı değeri için taşıma kuvveti değerleri artmıştır.

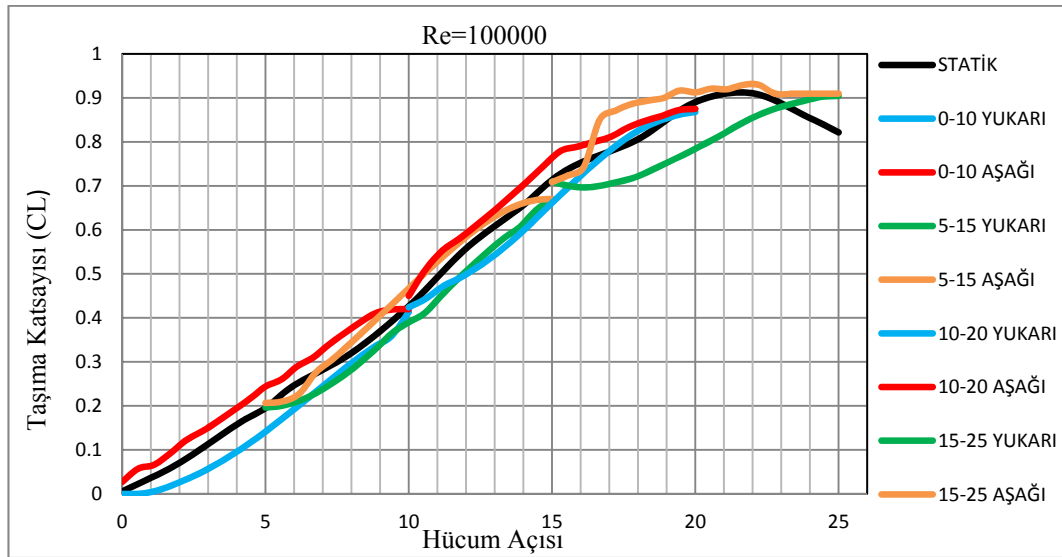
Yine aynı şekilde 0^0 - 10^0 ve 5^0 - 15^0 hücum açıları değerleri için statik kuvvet değeri yukarı değerinden yüksek, aşağı değerinden ise düşük çıkmıştır. Ancak 75×10^3 ve 10^5 Re sayılı akışları incelendiğinde 10^0 - 20^0 hücum açısı aralığında yunuslama hareketinin tutunma kaybını geciktirdiğini görmekteyiz. Tutunma kaybı sonrası 15^0 - 25^0 hücum açısı aralığında ise statik kuvvet kadar ani tutunma kaybı yunuslama hareketinde görülmemiştir.



Şekil 3. 5. Düz Plaka AR 1 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile taşıma katsayısı grafiği

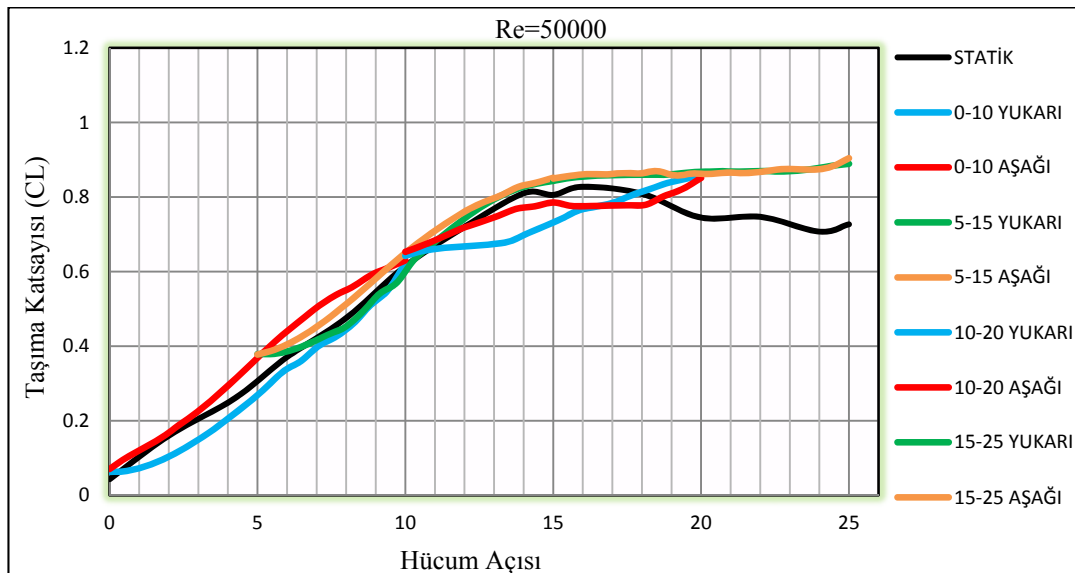
Şekil 3.5 ile Düz Plaka AR 1 profilin yunuslama hareketi sonucu oluşan taşıma katsayısı grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde Re sayısı artışıyla taşıma katsayısı artış göstermiştir. Bölüm 2 de statik kuvvet grafiklerinde AR 1 profilde tutunma kaybı görülmediğini açıklamıştık, yunuslama hareketi sonucu oluşan taşıma katsayısı değerleri de tutunma kaybına uğramdığını görmekteyiz. Her bir Re sayısı değişimim için farklı hücum açısı aralıklarında aşağı hareket sonucu oluşan taşıma katsayısı değerleri yukarı hareket sonucu oluşan taşıma katsayısı değerlerinden daha fazla olduğu görülmektedir.

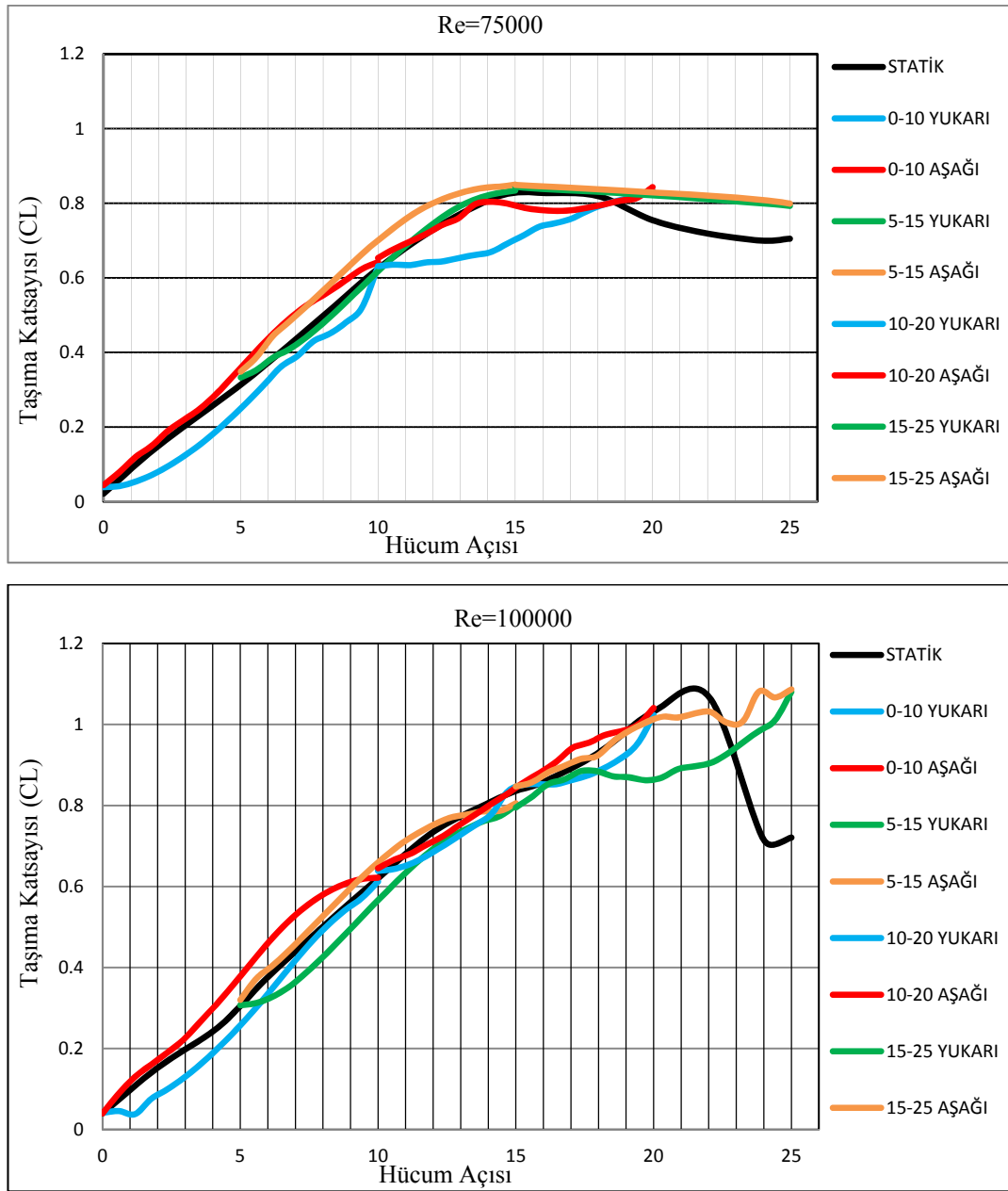




Şekil 3. 6. Düz Plaka AR 1,5 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile taşıma katsayısı grafiği

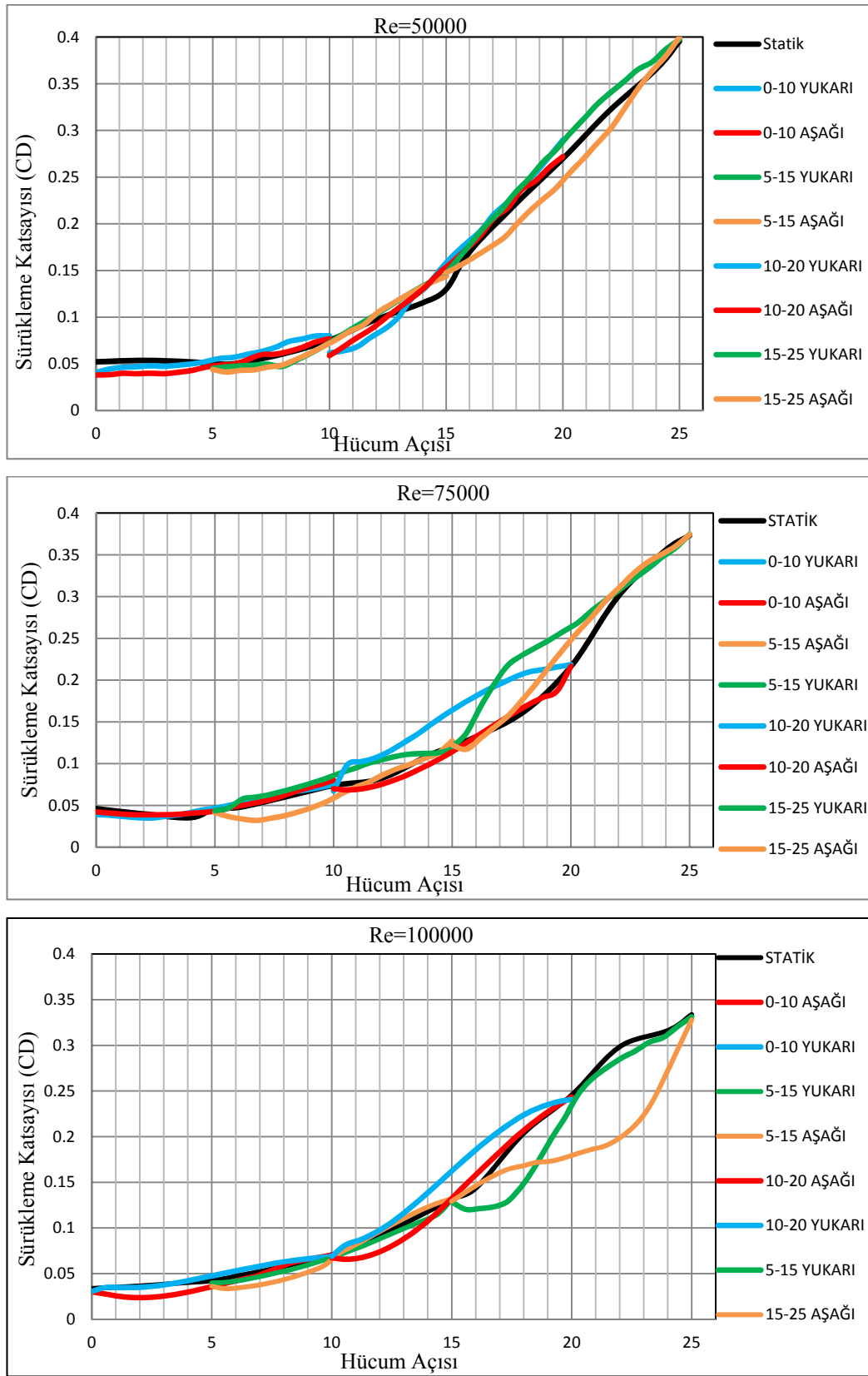
Şekil 3.6 ile Düz Plaka AR 1,5 profilin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu oluşan taşıma katsayısı grafikleri verilmiştir. 0^0 - 10^0 hücum açısı aralığı incelendiğinde başlangıç ve bitiş değerleri her Re sayısı için aynı ölçülmüştür. Bu aradaki diğer hücum açısı değerlerinde aşağı hareket değerleri yukarı hareket değerlerinden daha fazla olduğu görülmektedir. 5^0 - 15^0 ve 10^0 - 20^0 hücum açıları aralıkları içinde aynı şeyleri söylemek mümkün iken 15^0 - 25^0 hücum açısı aralığı her bir Re sayısı için incelendiğinde yunuslama hareketi tutunma kaybını geciktirmiş ve maksimum taşıma katsayıları elde edilmiştir.





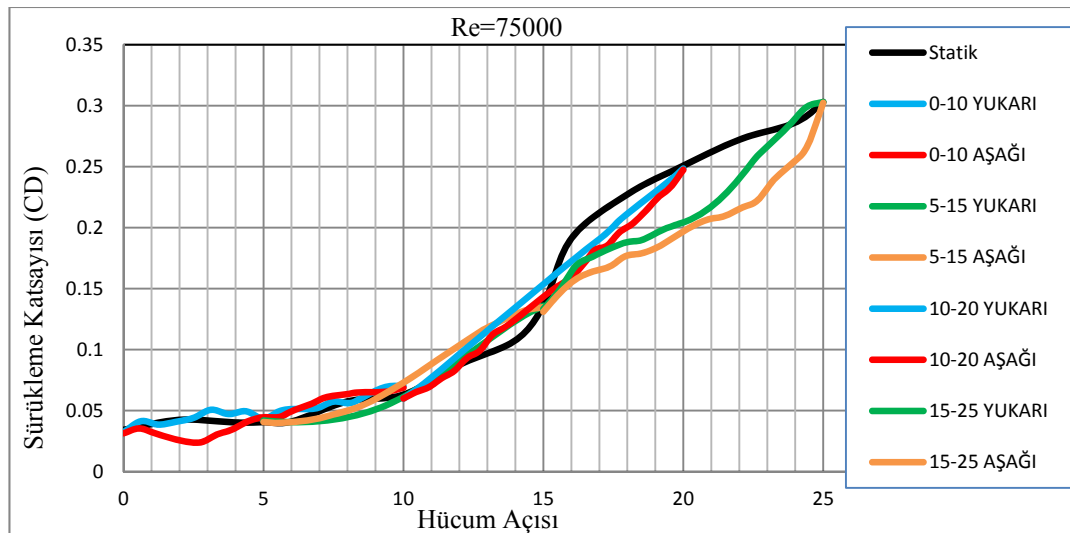
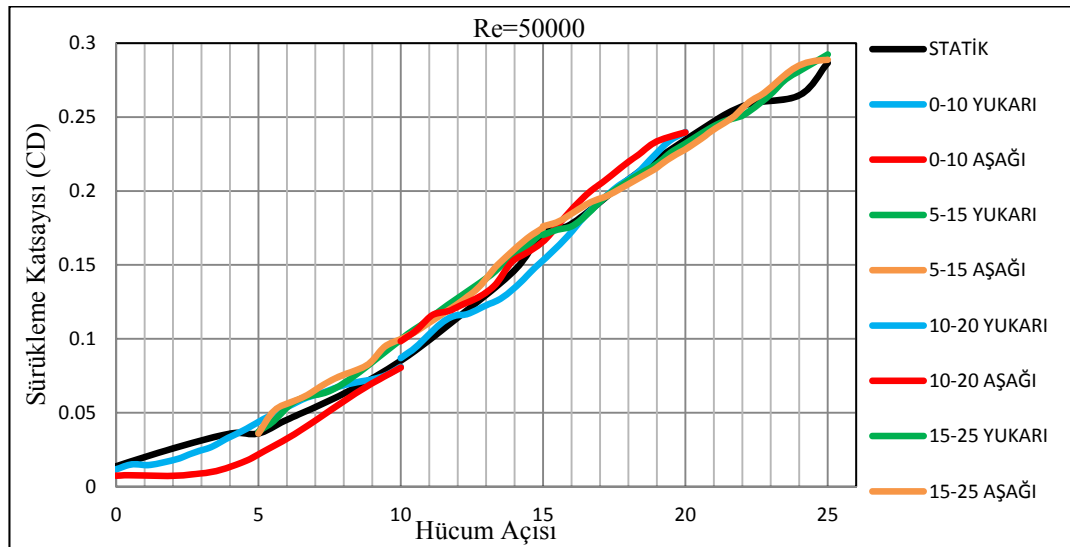
Şekil 3. 7. Düz Plaka AR 2 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile taşıma katsayısı grafiği

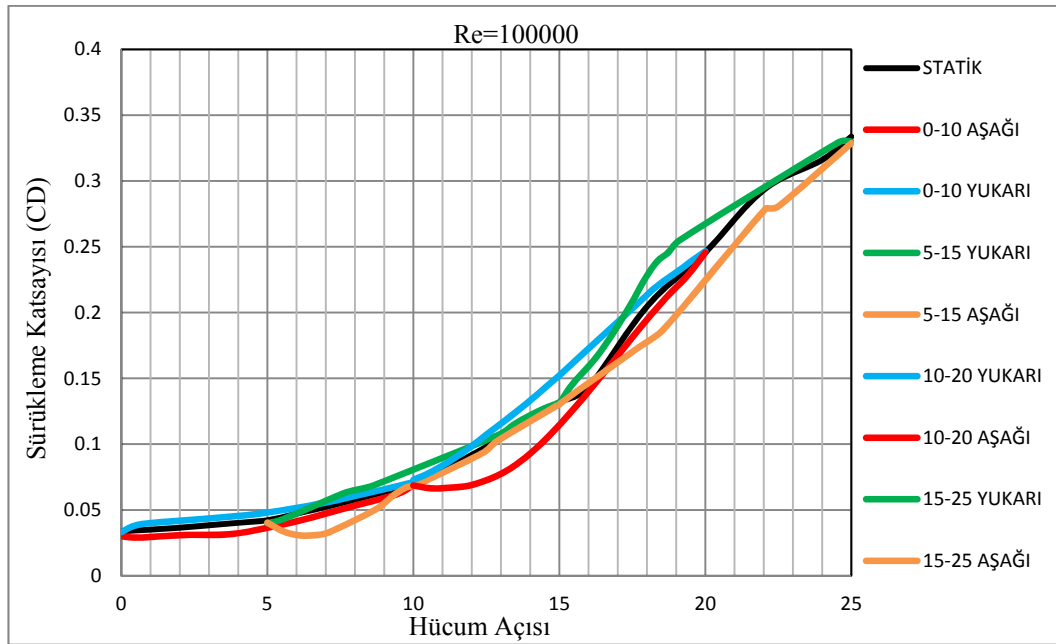
Şekil 4.7 ile Düz Plaka AR 2 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu oluşan taşıma katsayısı grafiği verilmiştir. Grafikler incelendiğinde Re sayısı artışıyla taşıma kuvveti artmıştır. Statik kuvvet için tutunma kaybı açısı incelencek olursa yunuslama hareketi tutunma kaybını engellemiştir ve maksimum taşıma kuvvetini artırmıştır. Bütün profiller için yunusla hareketi grafikleri incelendiğinde tutunma kaybını engelleme ve maksimum kuvveti elde etme konusunda AR değeri yüksek olan profiller de yunuslama hareketi daha etkilidir.



Şekil 3. 8. NACA 2415 AR 1 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile sürüklenme katsayısı grafiği

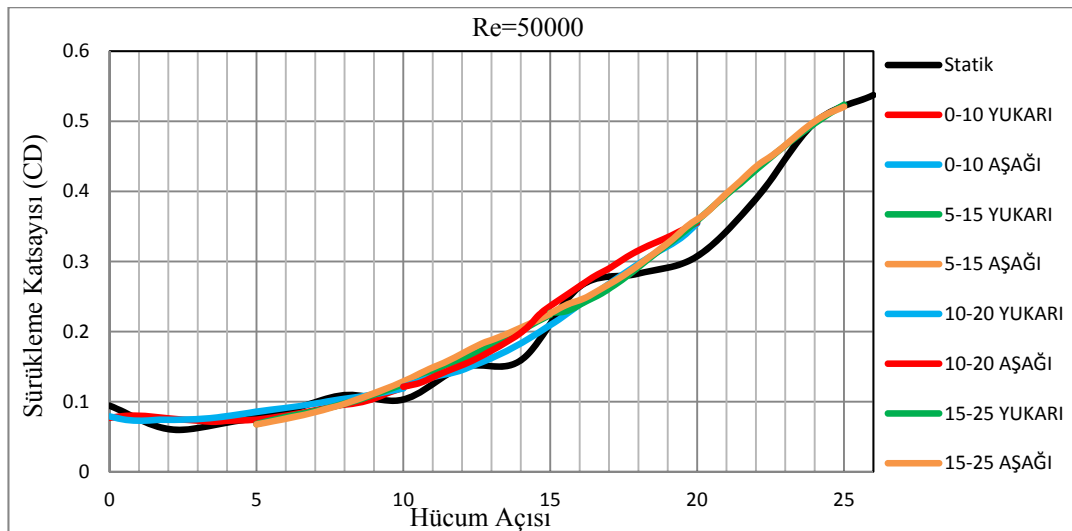
NACA 2415 AR 1 profilinin yunuslama hareketi sonucu oluşan sürüklenme katsayısı grafiği statik kuvvetle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafikte 0-10, 5-15, 10-20, 15-25 hücum açıları aralığındaki sürüklenme kuvveti değerleri ayrı ayrı verilmiştir. Grafikler incelendiğinde sürüklenme katsayısının artan Re sayısı değişimiyle AR 1 profili için azaldığı görülmektedir. Yunuslama hareketi ile oluşturulan aşağı ve yukarı hareketler incelendiğinde başlangıç ve son hücum açısındaki değerlerin statik kuvvetle aynı değerde olduğu görülmektedir. Ancak hücum açısına karşılık gelen sürüklenme kuvveti değerleri incelendiğinde yukarı hareket sonucunda aşağı harekete göre daha yüksek sürüklenme kuvveti olduğu görülmektedir. Yukarı hareket sonucu oluşan sürüklenme kuvveti değerleri statik kuvvetten daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak aşağı hareket sonucu oluşan sürüklenme kuvveti değerlerinin statik kuvvetten daha düşük olduğu görülmektedir.

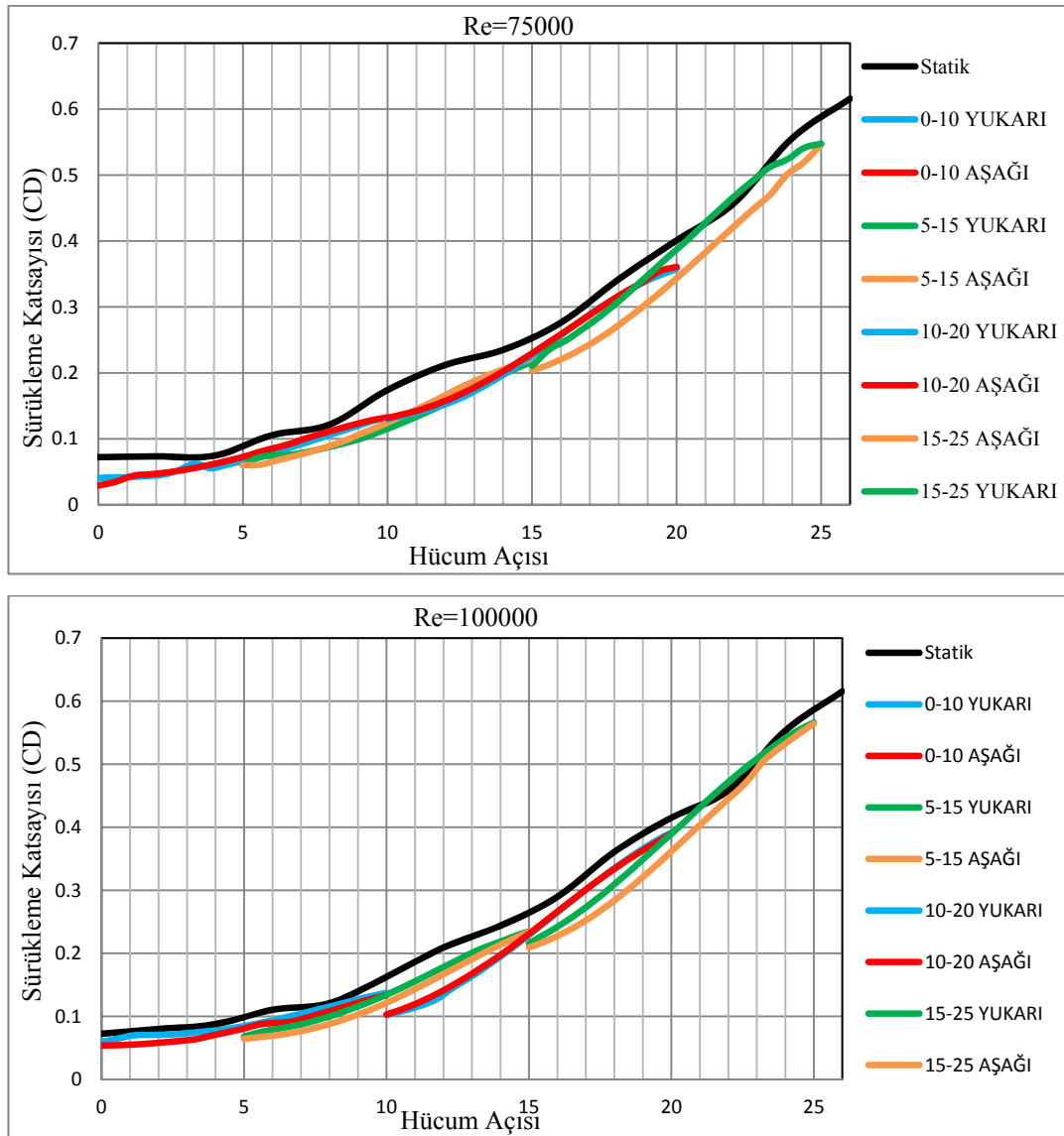




Şekil 3. 9. NACA 2415 AR 1,5 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile sürükleme katsayısı grafiği

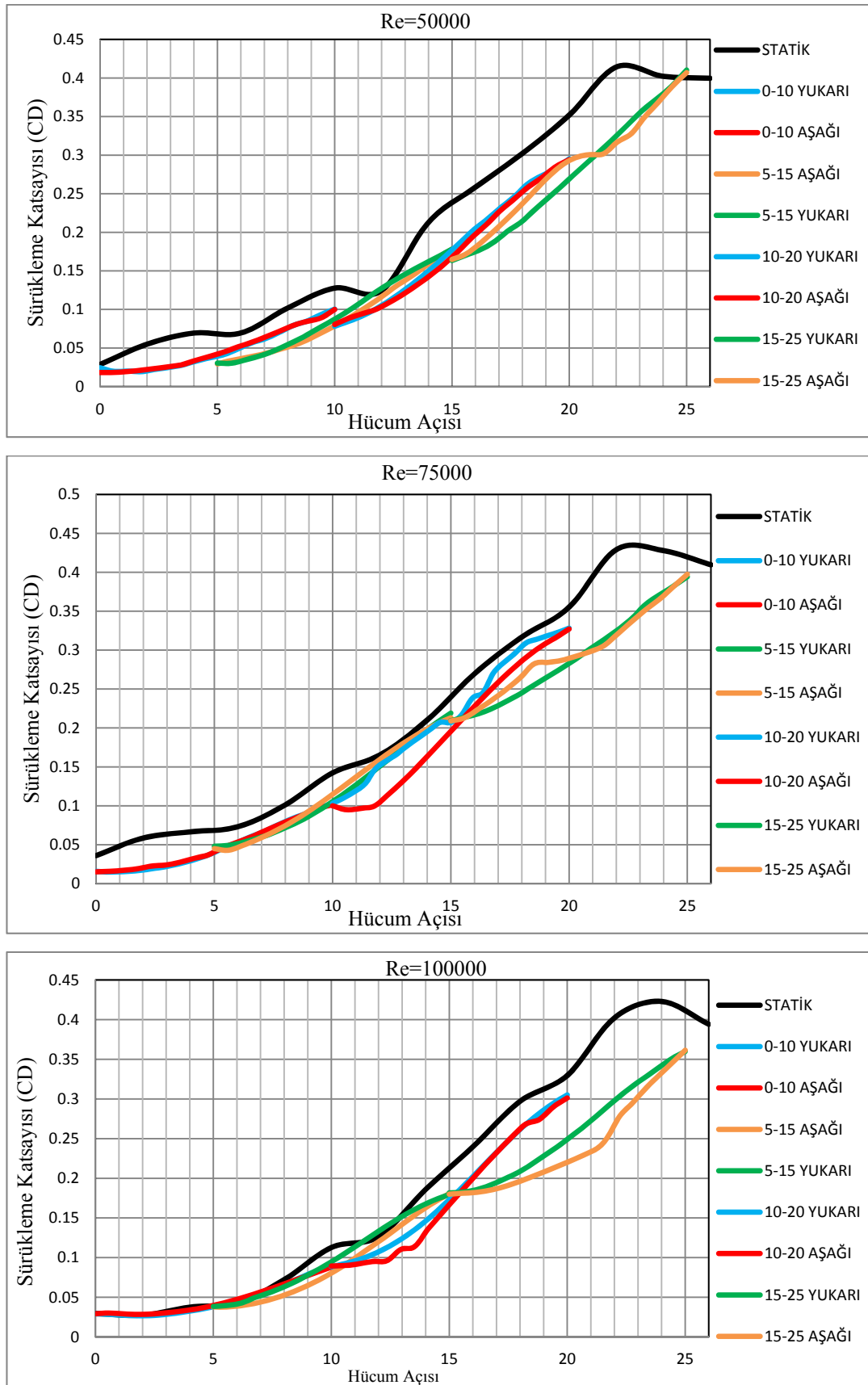
NACA 2415 AR 1,5 profilinin şekil 3.9 da sürükleme katsayısı grafiği yunuslama hareketi için verilmiştir. Re sayısı artışıyla grafikler incelendiğinde sürükleme katsayısı değerlerinin arttığı görülmektedir. Artan Re sayısı ile hız artmaktadır, bu da uç girdaplarını artırarak sürükleme kuvvetinin artışına neden olur. Yukarıda verilen grafiğe benzer olarak yine aşağı hareketin yukarı harekete göre sürükleme kuvvetin düşük olduğu görülmektedir. Aşağı hareketle yukarı hareket arasındaki sürükleme kuvveti farkı 0^0 - 10^0 ve 5^0 - 15^0 derece hücum açısı çok farklı değildir, ancak hücum açısı arttıkça (10 - 20 , 15 - 25) arasındaki farkın daha fazla olduğu grafikte görülmektedir.





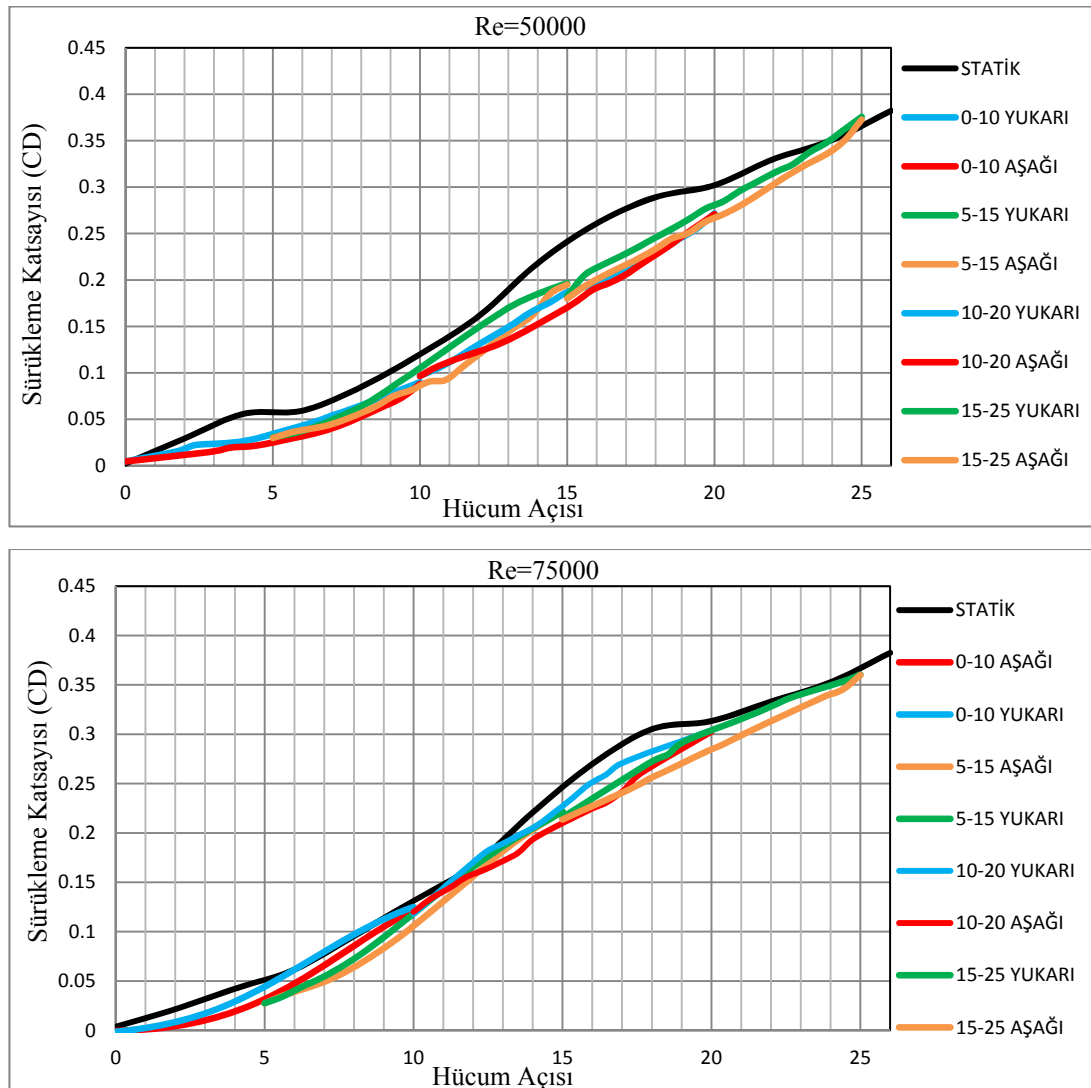
Şekil 3. 10. Düz Plaka AR 1 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile sürüklenme katsayısı grafiği

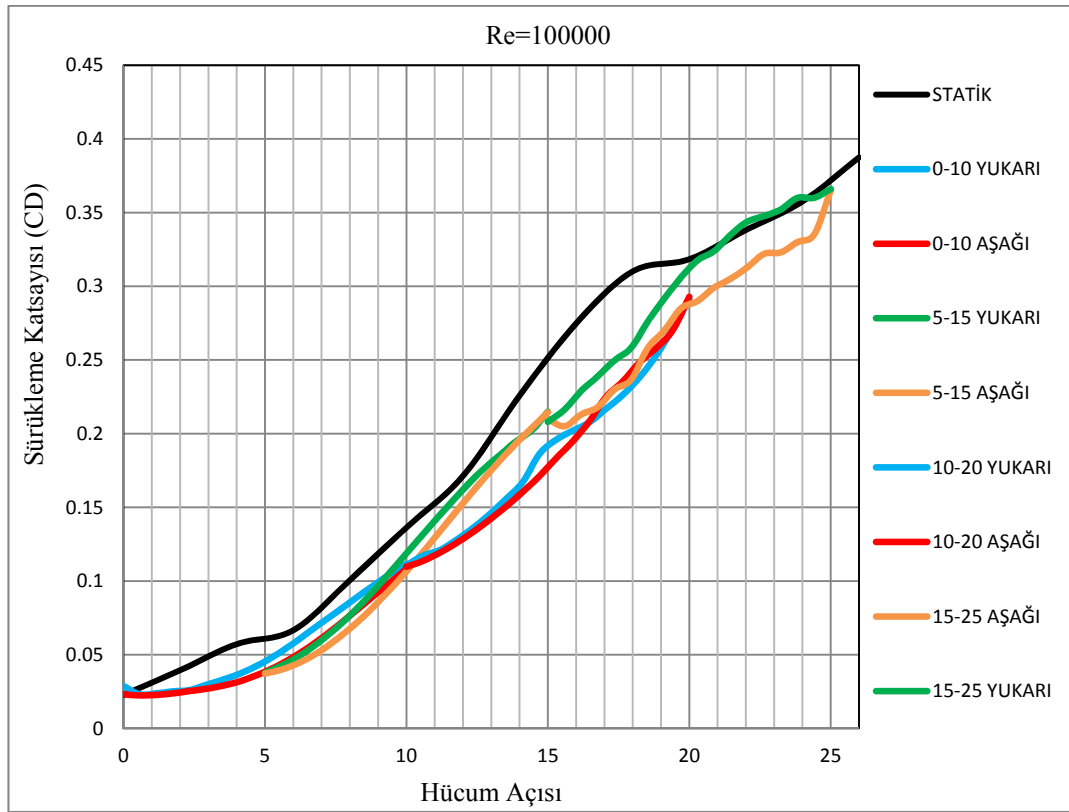
Şekil 3.10 ile Düz Plaka AR 1 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu oluşan sürüklenme katsayısı grafikleri verilmiştir. Re sayısının artışıyla artan uç girdaplar görüldüğü gibi sürüklenme kuvvetini artırmıştır. Statik kuvvetin genel itibariyle yunuslama hareketi sonucu oluşan sürüklenme kuvvetinden daha fazla olduğu açık olsada, yunuslama hareketi bu profil için çok etkin olmadığı açıktır. Yukarı-aşağı hareket arasında kuvvet farkı hissedilmeyecek kadar az oluşmuştur.



Şekil 3.11. Düz Plaka AR 1,5 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile sürüklenme katsayısı grafiği

Şekil 3.11 ile Düz Plaka AR 1,5 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu oluşan sürüklenme katsayısı grafikleri verilmiştir. Şekilde grafikler incelendiğinde statik kuvvet değeri ile yunuslama hareketi değerleri başlangıç değeri olan 0^0 hücum açısında eşit görülmektedir. 0^0 - 10^0 hücum açısı aralığında statik kuvvetin sürüklenme katsayısı değerleri farklı Re sayısında yunuslama hareketi sonucu oluşan sürüklenme katsayısından daha fazla görülmektedir. Düşük hücum açılarında (0^0 - 15^0) yunuslama hareketi sonucu oluşan sürüklenme katsayısı değerleri statik kuvvet değerlerine oldukça yakın görünürken, yüksek hücum açılarında (15^0 - 25^0) özellikle 10^5 Re sayılı akışta sürüklenme katsayısının yunuslama hareketinde oldukça düşük olduğu görülmektedir. Yunuslama hareketinde yukarı hareket sonucu oluşan sürüklenme katsayısı değeri aşağı hareket sonucu oluşan sürüklenme katsayısı değerinden genel olarak fazla olduğu görülmektedir.





Şekil 3. 12. Düz Plaka AR 2 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketi sonucu hücum açısı değişimi ile sürüklem katsayısı grafiği

Şekil 3.12 ile Düz Plaka AR 2 profilinin farklı Re sayılarında yunuslama hareketinin sürüklem katsayısı grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde artan Re sayısı ile sürüklem katsayılarının arttığı görülmüştür. Grafiklere genel olarak bakıldığında statik kuvvet değerlerinin yunuslama hareketi değerlerinden oldukça fazla olduğu görülmektedir. Yukarı hareket sonucu oluşan sürüklem katsayısı değerleri aşağı hareket sonucu oluşan sürüklem katsayısı değerlerinden fazla oluşmuştur.

Statik kuvvet değerleri verildikten sonra 5×10^5 Re sayısında farklı hücum açılarında duman görüntüleri akış incelenmesi için verilmişti. Ancak yunuslama hareketi yapan kanatlar için deney düzeneğimizin uygun olmamasından dolayı duman deneyi yapılamamıştır.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma

Mikro hava araçları ve insansız hava araçlarına olan ihtiyacın günümüzde artmasıyla bu alanlarda yapılan çalışmalarının değerini önemli derecede artırmıştır. Askeri ve sivil amaçlı yoğun şekilde kullanılan bu araçların performansının artırılması ve yakıt sarfiyatının düşürülmesi için çalışmalar hızlanarak devam etmektedir. Mikro hava araçlarının ve insansız hava araçlarının uçuş aralığı düşük Re sayılı akışlara girdiği için bu alandaki çalışmalar rüzgar türbinlerinde yapılmaktadır. Düşük Re sayılı akışların aerodinamik performansa olumsuz etkileri oldukça fazla olmasından dolayı araştırmaların çoğunluğu düşük Re sayılı akışlara doğru yoğunlaşmıştır. Düşük Re sayılı akışların en önemli sorunu olan laminar ayrılma kabarcığı kaldırma kuvvetini olumsuz etkiler bunun yanında titreşim ve gürültüye sebep olur. Bu tür olumsuz etkenler sonuç olarak yakıt tüketimini artırır. Laminar ayrılma kabarcığının olumsuz etkilerini yok etme çalışmaları, akış görüntüleme teknikleri ile yerinin ve büyüklüğünün belirlenmesi sonucunda yeni bir kanat tasarımı ile ayrılma kabarcığının hemen türbülanslı akışa geçişine sağlamaktır. Bu geçiş ne kadar hızlı olursa hava araçlarının performansıda o kadar artar.

Mikro hava araçları ve insansız hava araçlarının uçuş aralığındaki olumsuz etkilerin minimum değere indirilme çalışmalarından sonra yunuslama hareketi uygulanarak hava araçlarının performansının artırılma çalışmaları oldukça önemlidir. Bu çalışmada yunuslama hareketinin aerodinamik performansa olan etkileri araştırma konusunda yürütülen FYL-2013-4786 kodlu BAP projesi ilk adımı oluşturmuştur.

4.2. Sonuç

Bu tez çalışmasında, en/boy oranı (AR) değişiminin aerodinamik parametrelere etkisi ve yunuslama hareketi yapan kanatlar deneysel olarak incelenmiştir. İlk olarak 2B NACA 2415 profili 10^5 Re sayısında, AR 2 Düz Plaka profili 5×10^4 , 10^5 Re sayılarının da ve AR 1 Düz Plaka profili ise 10^5 Re sayısında doğrulama amaçlı literatürdeki deneysel verilere yakın hücum açısı ve Re sayısına göre deneysel çalışma yapılmış ve taşıma, sürüklenme katsayısı grafikleri elde edilmiştir.

Daha sonra en/boy oranı (AR) değişiminin aerodinamik parametrelere etkisi görebilmek için 3 farklı Düz Plaka profili ve 2 farklı NACA 2415 profili deneysel olarak incelenmiştir. NACA 2415 AR 1,5 profili sırasıyla 75×10^3 ve 10^5 Re sayılı akışlarda 14° - 16° hücum açılarında tutunma kaybına uğramıştır. Ancak 5×10^4 Re sayılı düşük hızda profilde yumuşak tutunma kaybı 20° hücum açısında tamamen oluşmuştur. NACA 2415 AR 1 profili ise sırasıyla 75×10^3 ve 10^5 Re sayılı akışlarda 20° - 22° hücum açısında tutunma kaybına uğramıştır. 5×10^4 Re sayısı düşük hız akışında ise profilde tutunma kaybı görülmemiş ve tersine 20° hücum açısından sonra taşıma katsayısında ani bir artış görülmüştür. Genel olarak NACA 2415 profili için AR arttıkça da taşıma katsayısının arttığı sürüklenme katsayısının ise düştüğü görülmüştür. Düz Plaka profilleri incelendiğinde AR 1 profili hiçbir Re sayısında tutunma kaybına uğramamıştır ve maksimum taşıma katsayısı diğer 2 profile göre daha yüksek görülmüştür. AR 2 ve AR 1,5 profillerinde 5×10^4 , 75×10^3 gibi düşük Re sayılı akışlarda sırasıyla 16° - 18° hücum açılarında yumuşak tutunma kaybı (mild stall) görülmüştür. 10^5 Re sayılı akışta ise AR 2 ve AR 1,5 profillerinde 22° hücum açısında ani tutunma kaybı (abrupt stall) görülmüştür. Genel olarak Düz Plaka profilleri için AR değeri arttıkça taşıma katsayısı değerinin arttığı sürüklenme katsayısı değerinin ise düştüğü görülmüştür. En yüksek taşıma katsayısı AR 2 profilinde 10^5 Re sayısında 1.2 olarak ölçülmüştür. Aerodinamik parametrelerin sonuçlarının neden bu şekilde oluştuğunu daha ayrıntılı incelemek için 5×10^4 Re sayısında her bir profil için kritik hücum açılarında 4 farklı noktadan duman görüntüleri alınmıştır. Bu şekilde profiller için ayrılma kabarcıkları, ayrılmış akışlar ve uç girdapları görüntüleri incelenmiştir. Duman görüntüleri incelendiğinde hücum açısının artmasıyla uç girdaplarının basınç farkının artması ile büyüyerek hücum kenarına yaklaştığı bunun da sürüklenme katsayısını artırdığı, akış ayrılması da aynı

şekilde büyüyerek hücum kenarına yaklaşmış ilerleyen hücum açılarında ise tamamen ayrılmış akışlar görülmüştür. Daha sonra incelenen profiller yunuslama hareketi uygulanarak statik kuvvetlerle farkları araştırılmıştır. Her bir kanat profili 3 farklı Re (5×10^4 , 75×10^3 , 105) sayısında ve 4 farklı hücum (0-10, 5-15, 10-20, 15-25) açısı aralığında yunuslama hareketi incelenmiştir. Genel olarak yunuslama hareketinde hücum açısının artmasına yukarı hareket, hücum açısının azalmasını aşağı hareket olarak tanımladığımız da aşağı hareketin taşıma katsayı yukarı harekete göre yüksek sürüklenme katsayısı ise daha düşük ölçülmüştür. Uygulanan herhangi bir hücum açısı aralığında yunuslama hareketinin ve statik kuvvetlerinin başlangıç ve bitiş noktalarındaki aerodinamik parametrelerinin aynı fakat, aradaki diğer değerlerde farklılıklar olduğu görülmüştür. Örneğin 5×10^4 Re sayısında NACA 2415 AR 1,5 profilinin düşünürsek 0^0 - 10^0 hücum açısı aralığında 0^0 ve 10^0 hücum açılarında statik kuvvetle yunuslama hareketi sonucu oluşan değerlerinin aynı olduğu, ancak diğer aradaki değerlerde farklılıkların olduğu görülmüştür. Yunuslama hareketi düşük Re sayılı akışlarda daha az farklılık oluştururken yük Re sayılı akışlar da daha yüksek fark oluşturduğu görülmüştür.

Sonuç olarak AR değerinin artması taşıma katsayısını artırırken sürüklenme katsayısını düşürmüştür. Aerodinamik performansı artırma konusunda yunuslama hareketi özellikle yüksek Re sayılı akışlarda iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

4.3. Öneriler

Sunulan tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ışığında düşük Re sayılı akışlar da yunuslama hareketi ile ilgili olarak gelecekte yapılacak çalışmalara yönelik aşağıdaki öneriler getirilebilir.

- Uygun deney düzeneğinin kurulması ile kullanılan bu ve bunlara benzer profiller kullanılarak dalma ve sapma hareketlerinin deneysel ve sayısal incelemesi yapılarak aerodinamik parametrelerin değişimi incelenebilir.
- Deneysel imkanların olması ile yunuslama hareketi yapma sırasında profil üzerindeki ani hız ve basınç değişimleri incelenebilir.
- Uygun deney düzeneği ile yunuslama hareketi sayısal veya deneysel akış görüntüleme teknikleri ile akışı incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Chklovski, T., 2008. Pointed-tip wings at low reynolds numbers. (Web sayfası: <http://www.wfis.uni.lodz.pl/edu/Proposal.htm>), (Erişim tarihi: Ağustos 2014).
2. U.S. Centennial of Flight Commission, 2008, (Web Sayfası: <http://www.centennialofflight.gov>), (Erişim Tarihi: Haziran 2014).
3. Sturm, Hannes., Dumstorff, Gerrit., Busche, Peter., Lang, Walter., Westermann, Dieter., 2012. Boundary layer separation and reattachment detection on airfoils by thermal flow sensors, **Sensors**, **12** (11): 14292-14306
4. Frei, Walter., 2013. Which turbulence model should i choose for my cfd application?(Web page:<http://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>), (Erişim tarihi: Haziran 2014).
5. Karasu, İlyas., 2011. Düşük Reynolds Sayılı Akışlarda Kanat Profili Üzerinde Türbülansa Geçişin ve Laminer Ayrılma Kabarcığının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 106 s.
6. Shyy, Wei., Lian, Yongsheng., Tang, Jian., Vıneru, Dragos., Liu, Hao., Aerodynamics of Low Reynolds Number Fleyers, Cambridge Universty Press, Cambridge, 175 pp.
7. Knowles, K., Zbikowski,R., Ansari,SA., 2006. Aerodynamic modelling of insect-like flapping flight for micro air vehicles. **Progress in Aerospace Sciences**, **42** (2006) : 129–172.
8. Mueller, T. J., and DeLaurier, J. D., 2003. Aerodynamics of small vehicles. **Annual Review of Fluid Mechanics**, **35** (1) : 89–111.
9. Shyy, W., Berg, M., and Ljungqvist, D., 1999. Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles. **Progress in Aerospace Sciences**, **35** (5) : 455-505.

10. Ho, S., Nassef, H., Pornsinsirak, N., Tai, Y.C., and Ho, C.M., 2003 .Unsteady aerodynamics and flow control for flapping wing flyers. **Progress in Aerospace Sciences**, **39** (8) : 635-681.
11. Woods, M.I., Henderson, J.F., and Lock, G.D., 2001. Energy requirements for the flight of micro air vehicles. *The Aeronautical Journal*, 105 (1045) : 135-149.
12. Platzer, M.F., and Jones, K.D., 2006. Flapping wing aerodynamics – progress and challenges. **Aiaa Journal**, **46** (9): 2136-2149
13. Gursul, I., 2004. Vortex Flows on UAVs: Issues and Challenges. **The Aeronautical Journal**, **108** (1090) : 597-610.
14. Whitehead, J., and Gursul, I., 2006. Interaction of synthetic jet propulsion with aerofoil aerodynamics at low reynolds numbers. **Aiaa Journal**, **44** (8) : 1753-1766.
15. Heathcote, S., Martin, D., and Gursul, I., 2004. Flexible flapping aerofoil propulsion at zero freestream velocity. **Aiaa Journal**, **42** (11) : 2196-2204.
16. Heathcote, S. and Gursul, I., 2007. Flexible flapping aerofoil propulsion at low reynolds numbers, **Aiaa Journal**. **45** (5) : 1066-1079.
17. Heathcote, S., Wang, Z., and Gursul, I., 2008. Effect of spanwise flexibility on flapping wing propulsion, **Journal of Fluids and Structures**. **24** (2) : 183–199
18. Heathcote, S. and Gursul, I., 2007. Jet switching phenomenon for a periodically plunging aerofoil, **Physics of Fluids**. **19** (2) : 27-104
19. Alam, M., and Sandham, N.D., 2000. Direct numerical simulation of short laminar separation bubbles with turbulent reattachment, **Journal of Fluid Mechanics**. **403** : 223-250

20. Kang, Chang-kwon., Aono, Hikaru., Baik, Yeon Sik., Bernal, Luis P., Shyy, Wei., 2013. Fluid dynamics of pitching and plunging flat plate at intermediate reynolds numbers, **Aiaa Journal**. **51** (2) : 315-329.
21. Shkarayev, Sergey., Silin, Dmitro., 2009. Aerodynamics of flapping-wing micro air vehicles, pp. 10077-10098 47th Aiaa Aerospace Sciences Meeting and The New Horizons Forum and Aerospace Exhibit, January 5 - 8, 2009, Florida.
22. Lin, San-Yih., Hu, Jeu-Jiun., 2003. Numerical study of flapping wing, pp. 2514-2525 33rd Aiaa Fluid Dynamics Conference and Exhibit, June 23-26, 2003, Florida.
23. Wang, Dou., Wu, Jianghao., Zhang, Yanlai., 2013. Aerodynamics on Flapping rotary wing in low reynolds number, pp. 4382-4396. 2013 International Powered Lift Conference, August 12-14, 2013, Los Angeles.
24. Kurtuluş, Dilek Funda., 2005. Havada asılı konumdaki çırpın kanat profilinin sayısal ve deneysel analizi - mikro hava araçlarına uygulaması, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 188 s.
25. Kaya, Mustafa., 2003. Çırpın Kanat Kesitleri Üzerinde Viskoz Akışların Hesaplanması ve Çırpma Parametrelerinin Paralel Olarak En iyileştirilmesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 109 s.
26. Çekinmez, Aybüge., 2013. Havada Asılı Konumdaki Çırpın Kanat Hareketinin Girdap Oluşum Mekanizmasının Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm Tekniği İle İncelenmesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 109 s.
27. Günaydinoğlu, Erkan., 2010. Havada Asılı Konumda ve İleri Uçuşta Çırpın Kanat Kesitlerinin Düşük Reynolds Sayısı Aerodinamiği, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 88 s

28. Kıran, Evren., 2010. Çırpan kanatlı insansız hava aracının aerodinamik karakteristiklerinin analitik olarak incelenmesi ve prototipin test edilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 99 s.
29. Başkan, Özge., M2009. ÖHavada asılı konumda sekiz şekli çizerek çırpan kanat profillerinin etrafındaki akış alanının sayısal ve deneysel incelenmesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 108s.
30. Mohammad, Mashud., Mausumi, Ferdous., and Shahriar, Hossain Omee., 2012. Effect of spoiler position on aerodynamic characteristics of an airfoil, **International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering**, **12** (006): 1-6
31. Genç, M. Serdar., Kaynak, Ünver., 2009. Control of laminar separation bubble over a NACA2415 aerofoil at low re transitional flow using blowing/suction, pp. ASAT-13-AE-11. 13th International Conference on Aerospace Science & Aviation Technology, May 26 – 28, 2009, Egypt.
32. Araque, L.Velazquez., Nožička, J., 2012. **Design of an aerodynamic measurement system for unmanned aerial vehicle airfoils**, **10** (5): 39-44
33. Açikel, Halil Hakan., 2013. Düşük Reynolds sayılı akışlarda kanat profili üzerindeki akışa ses dalgalarının etkisinin deneysel incelenmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 188s.
34. Torres, Gabriel.E., Mueller, Thomas. J., 2004. Low-aspect-ratio wing aerodynamic at low reynolds numbers, **Aiaa Journal**, **42** (5): 825-832
35. Rojratsirkul, P., Genç, M.S., Wang, Z., Gursul, I., 211. Flow-induced vibrations of low aspect ratio rectangular membrane wings, **Journal of Fluids and Structures**, **27** (8): 1296–1309.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Metin UZUN

Uyruğu: Türkiye (TC)

Doğum Tarihi ve Yeri: 27 Mart 1988. POSOF

Medeni Durumu: Evli

Tel: 05077523062

E-posta : metinuzun@erciyes.edu.tr

Yazışma Adresi: Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu. Kayseri

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erc. Ün. FBE Sivil Havacılık. ABD	-
Lisans	Erc. Ün. Sivil Hav. Y.O. UGM Bölümü	2011
Lise	Posof Lisesi	2005

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
08/2011- Halen	Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık YO	Arş. Gör.
05/11-07/11	EMAİR	Uçak Teknisyeni

YABANCI DİL

İngilizce