

**SLATLI KANAT PROFİLİNİN ETRAFINDAKİ DÜŞÜK
REYNOLDS SAYILI HAVA VE SU AKIŞLARININ İNCELENMESİ
VE AERODİNAMİK PERFORMANS ANALİZLERİ**

**INVESTIGATION OF LOW REYNOLDS NUMBER AIR AND
WATER FLOW OVER BLADE PROFILE WITH SLAT AND
AERODYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS**

Çağrı CENGİZ

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ENERJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2010

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma, jürimiz tarafından **ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :
Prof. Dr. Cevdet TEZCAN

Üye (Danışman) :
Prof. Dr. Tahir Yavuz

Üye :
Yrd. Doç. Dr. Levent ÇOLAK

ONAY

Bu tez 30/07/2010 tarihinde, yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

/08/2010

Prof.Dr. Emin AKATA
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

TEŐEKKÜR

Tez çalıőmam sũresince değerli fikir ve eleőtirileri ile araőtırmama katkıda bulunan, ilgi ve hoőtörũsũnũ benden esirgemeyen sevgili danışman hocam, **Sn. Prof. Dr. Tahir Yavuz**'a, e-mail yoluyla teknik bilgi gönderen **Sn. Dr. Mustafa Serdar GENÇ**' e ve ayrıca yardımlarından dolayı; Fen Bilimleri Enstitũsũ çalıőanlarına, tüm hocalarıma ve okul personeline, tez çalıőmalarım sırasında bana yardımcı olan ve her türlü desteği gösteren **aileme**, arkadaşım **Sn. Mak. Müh. Tağma DERYA**' ya ve diğer tüm arkadaşlarıma katkılarından dolayı teőtökkür ederim.

ÖZ

SLATLI KANAT PROFİLİNİN ETRAFINDAKİ DÜŞÜK REYNOLDS SAYILI HAVA VE SU AKIŞLARININ İNCELENMESİ VE AERODİNAMİK PERFORMANS ANALİZLERİ

Çağrı Cengiz

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Rüzgar türbinlerindeki gelişmeler ve karşılaşılan zorluklardan dolayı son yıllardaki aerodinamik araştırmalar, düşük Re sayılı akımların kontrolü ve yüksek taşıma elde edilmesi gibi konular üzerinde yoğunlaşmaktadır. dünyada geleneksel olarak enerji üreten türbinlerde standart kanat profilleri kullanılmaktadır. Bu kanatların verdiği maksimum kaldırma kuvvet katsayısı 1.6 civarındadır. Bu tip kanatlı türbinlerde enerji üretebilmek için gerekli olan minimum rüzgar hızı 7 m/s' dir. Bu tez çalışmasında, bu güncel konularda sayısal incelemeler yapılmıştır ve yüksek performans verebilecek rüzgar türbini kanat profili ortaya koymak ve ortaya konulan bu profil kullanılarak rüzgar ve hidrokinetik enerjiden elektrik enerjisi üretebilmektir. Sayısal olarak çalışmalara başlamadan önce, kanat profili olarak kullanılacak olan NACA 2415 ve buna bağlanması planlanan slat olarak NACA 22 profili belirlendi. İlk önce boyutsal analiz yapılarak zaman ve bütçe açısından işimize yarayacak olan boyutsal analiz yapıldı ve boyutsal parametreler belirlendi. Daha sonra, yapılacak olan sayısal çalışmalarda hücre sayısından bağımsız olarak hesaplamalarımızı yapma imkanı sağlamak için optimum ağ sayısı hesaplandı. Doğru sonucu elde edebilmek için GAMBIT™ programında 55000 hücreye sahip ağ yapısı kullanıldı. Hava ve su ortamında, slat ve kanat arası farklı, farklı hücum ve slat açıları ve farklı Re sayılarında FLUENT™ programıyla nümerik sonuçlar elde edilmiştir. Bu sayısal sonuçlar, aynı koşullar altında incelenen NACA2415 slatsız kanat profili sonuçları karşılaştırıldı. Daha sonra Slatlı ve slatsız Naca 2415 kanat profilini belirlenmiş olan akış koşullarında, hava akışkanında 1.5×10^5 Re ve su akışkanında 4.5×10^5 Re sayılarında ve değişik hücum açılarına bağlı olarak C_L ve C_D katsayı değişimleri irdelendi ve

literatürdeki yapılan deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak değerlerin yakın oluşunu görerek doğruluğunu saptandı. Daha sonra maksimum C_L ' nin ve C_L/C_D oranının olduğu hücum açılarında slatlı ve slatsız kanat profillerinin basınç dağılımları, hız dağılımları, akım çizgileri, türbülans şiddetleri ve vorteks kopma frekansları belirlendi. Elde edilen optimum kanadın, kanat elemanı momentum teorisi kullanılarak, uç hız oranıyla değişen burulma açıları elde edildi. Hava ortamında, kanatlar arası $h/c_1=0.165$ konumundayken 1×10^5 Re sayısında maksimum C_L 27° hücum açısında 2.46 olarak elde edildi. Fakat kanattan alınacak maksimum güç katsayısı için önemli olan C_L/C_D oranıdır ve kanat yapısı da buna göre dizayn edilir. Bu kanat yapısında maksimum C_L/C_D oranı, $h/c_1=0.165$ konumundayken 1×10^5 Re sayısında ve 12° hücum açısında elde edildiği için optimum hücum açısı 12° olarak seçildi. Slatsız NACA2415 kanat profilinde maksimum kaldırma kuvveti 6° hücum açısında 1.02 olarak elde edilmiştir. Su ortamında, kanatlar arası $h/c_1=165$ konumundayken $2,53 \times 10^5$ Re sayısında maksimum C_L 33° hücum açısında 2.49 olarak elde edildi, fakat maksimum C_L/C_D oranı, $h/c_1=0.165$ konumundayken $2,53 \times 10^5$ Re sayısında ve 18° hücum açısında elde edildiği için optimum hücum açısı olarak 18° seçildi. Slatsız NACA2415 kanat profilinde maksimum kaldırma kuvveti 18° hücum açısında 1.35 olarak elde edildi. Hesaplamalar sonucunda, hem hava hem de suda kullanılan slatlı kanat profilinin, NACA2415 kanat profiline göre aerodinamik performansının daha yüksek olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler: Akış kontrolü, hidrokinetik türbinler, aerodinamik kuvvet katsayıları, slat etkisi, hücum açısı, düşük Re sayısı aerodinamiği

Danışman: Prof. Dr. Tahir YAVUZ, Başkent Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF LOW REYNOLDS NUMBER AIR AND WATER FLOW OVER BLADE PROFILE WITH SLAT AND AERODYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS

Çağrı Cengiz

Başkent University, Institute Of Science

Energy Engineering Section

As a result of the developments and the difficulties that has been faced on wind turbines, the aerodynamic researches in recent years concentrates on low Re number flow control and high lift production. As traditionally, in the world, standart turbine airfoils are used for generating energy. Provided that the maximum lift coefficient is around 1.6. By using these turbines airfoil, minimum required wind speed is 7 m/s for generating energy. In this thesis, numerical investigations related with these subjects are presented and reveal that a wind turbine blade profile which can provide high performance and produce electric energy from hydrokinetic energy with use this profile. Before starting numerical studies, NACA 2415 that is going to be used as airfoil profile and the NACA 22 that is planned to be connected to this as a slat profile are determined. Firstly, in terms of time and budget, dimensional analysis was made that benefits our task and determined our dimensional parameters. Later, optimum number of network is calculated in the numerical studies which are going to be studied to make calculations regardless of the number of cells. Fine mesh is used with 55000 cells in GAMBIT™ program to get the most correct result. In numerical solutions derived with FLUENT™ program at different distances between slat and airfoil, different angles of attack and angle of slats and different Re numbers In air an water conditions. NACA2415 without slat blade profile's without slat, numerical solutions were compared with this numerical solutions which examined under the same conditions. Later on, with and without slat Naca 2415 wing profile that is set in flow circumstances, the changes in 1.5×10^5 Re number in water flow and 4.5×10^5 Re number in water flow and Cl-Cd factor in different attack angels are

investigated. They are compared with the experimental studies in the literature to be sure about the accuracy of proximity of the rates. , with and without slat wing profile's pressure contours, pressure coefficient, distribution, velocity contours, stream lines, turbulence intensity and frequency of vortex break are identified in attack angles that includes max. C_L and C_L/C_D rates. In a result of all numerical evaluations, wing's attack and slate angels that had to be done in water and air conditions are determined. Obtained the optimum blade's twist angle, which is changing with tip speed ratio, with used blade element momentum theory. In air flow, while the distance between the blades $h/c_1=0.165$ and 1×10^5 Re number, the maximum lift coefficient as obtained 2.46 at 27° attack angle. But, C_L/C_D ratio is more important to provide maximum power coefficient and blade form is designed according to this ratio. The optimum attack angle was chosen 12° . Because, the maximum C_L/C_D ratio was obtained at this attack angle while the distance between the blades $h/c_1=0.165$ and 1×10^5 Re number. For NACA2415 without slat blade profile, the maximum lift coefficient as obtained 1.02 at 12° attack angle. In water flow, while the distance between the blades $h/c_1=0.165$ and 2.53×10^5 Re number, the maximum lift coefficient as obtained 2.49 at 33° attack angle. But, the optimum attack angle was chosen 10° . Because, the maximum C_L/C_D ratio was obtained at this attack angle while the distance between the blades $h/c_1=0.165$ and $2,53 \times 10^5$ Re number. For NACA2415 without blade profile, the maximum lift coefficient as obtained 1.35 at 18° attack angle. As a result of calculations, blade profile's with slat aerodynamic performance was found to be higher, which is used in air and water flows, according to NACA2415 without blade profile.

Keywords: Flow control, hydrokinetic turbines, aerodynamic force coefficients , effect of slat, attack angle, low Re number aerodynamics

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Tahir YAVUZ, Başkent University, Department of Machine Engineering.

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ.....	i
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Rüzgar ve Rüzgar Türbinleri.....	1
1.1.1. Rüzgar türbinlerinin tarihçesi.....	2
1.1.2. Rüzgar türbini çeşitleri.....	3
1.1.2.1. <u>Dikey eksenli rüzgar türbinleri</u>	3
1.1.2.2. <u>Yatay eksenli rüzgar türbinleri</u>	5
1.1.2.3. <u>DERT'lerin avantajları ve dezavantajları</u>	5
1.1.2.4. <u>YERT'lerin avantajları ve dezavantajları</u>	6
1.1.3. Rüzgar elektrik santralının avantajları ve dezavantajları.....	6
1.1.4. Güç kontrolü sistemi.....	7
1.1.5. Rotor Hızı.....	10
1.1.6. Bir Rüzgar Türbininde Sistem Bileşenleri.....	11
1.2. Rüzgar Enerjisinin Türkiye Ve Dünyada Kullanımı.....	15
1.3. Literatür Araştırması.....	22
1.3.1. Rüzgar türbin kanatları konusunda yapılan çalışmalar.....	23
1.3.2. Hidrokinetik enerji konusunda yapılan çalışmalar.....	25
1.4. Tezin Amaç ve Kapsamı.....	26
2. RÜZGAR TÜRBİN TEORİLERİ.....	28
2.1. Momentum Teorisi.....	28
2.2. Kanat Eleman Teorisi.....	37
3. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	45
3.1. Aerodinamik Kuvvetler ve Kavramlar.....	47
3.1.1. Aerodinamik kuvvetler.....	47
3.1.2. Aerodinamik performansı artırma yöntemleri.....	52
3.2. Rüzgar Türbinlerinde Boyutsal Analiz ve Kanat Benzeşimi	57

3.2.1.	Boyutsal Çözümleme.....	57
3.2.2.	Akım, geometrik ve dinamik benzerlik	61
3.3.	Sayısal Analiz ve Hesaplamalar.....	63
4.	SAYISAL SONUÇLAR.....	66
4.1.	Sayısal Sonuçlar.....	66
4.1.1.	Rüzgar ortamındaki sayısal sonuçlar.....	67
4.1.1.1.	<u>Uygun ağ yapısı belirlenmesi</u>	67
4.1.1.2.	<u>Slatlı kanat profilinin basınç değişkenleri</u>	68
4.1.1.3.	<u>Slatlı kanat profilinin aerodinamik kuvvet analizi</u>	75
4.1.1.4.	<u>Hava ortamında elde edilen güç hesabı</u>	84
4.1.1.5.	<u>Hava ortamında kanat profilinin akış karakteristikleri</u>	85
4.1.2.	Su ortamındaki sayısal sonuçlar.....	101
4.1.2.1.	<u>Slatlı kanat profilinin basınç değişkenleri</u>	101
4.1.2.2.	<u>Slatlı kanat profilinin aerodinamik kuvvet analizi</u>	108
4.1.2.3.	<u>Su ortamında elde edilen güç</u>	117
4.1.2.4.	<u>Kanat profilinin akış karakteristikleri</u>	118
4.1.3.	Hava ve su ortamındaki sonuçların irdelenmesi.....	132
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	135
5.1.	Sonuçlar.....	135
5.2.	Öneriler	139
	KAYNAKLAR LİSTESİ.....	141

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1	Darrieus tipi rüzgar türbinleri..... 4
Şekil 1.2	Savonius tipi rüzgar türbini..... 4
Şekil 1.3	Upwind Türbin ve Downwind Türbinleri..... 5
Şekil 1.4	Aktif stall ve aktif pitch kontrolü için pala dönüş yönleri..... 9
Şekil 1.5	Bir rüzgar türbinini oluşturan elemanlar ve konumları..... 12
Şekil 1.6	Tipik bir türbin pervanesinin görünümü..... 13
Şekil 1.7	Yaw mekanizması 14
Şekil 1.8	Türkiye geneli farklı yükseklikteki ortalama Yıllık Rüzgar Hızları Dağılımı..... 15
Şekil 1.9	Türkiye için önerilen rüzgar kurulu gücü ve enerji üretimi..... 18
Şekil 1.10	Dünyanın teknik rüzgar potansiyel dağılımı..... 21
Şekil 1.11	Dünya rüzgar enerjisi kurulu güç hedefi..... 22
Şekil 2.1	Taşıyıcı disk..... 29
Şekil 2.2	Rotor arkasındaki hız ve aksenal indüksiyon faktörüne göre değişen güç ve itki katsayıları..... 32
Şekil 2.3	Rotor akım tüpü..... 32
Şekil 2.4	Uç hız oranına göre güç katsayısı..... 36
Şekil 2.5	Kanat boyunca değişen aksenal ve teğetsel indüksiyon faktörleri..... 37
Şekil 2.6	n adet bölüme ayrılmış kanat yarıçapı..... 38
Şekil 2.7	Yatay aksenli bir türbinin analizi için pala geometrisi..... 38
Şekil 2.8	Veter uzunluğunun r/R oranına göre değişimi..... 42
Şekil 2.9	Burulma açısının r/R oranına göre değişimi..... 42
Şekil 3.1	Bazı modern kanat profilleri 45
Şekil 3.2	NACA22 hücum kenarı slatlı NACA2415 kanat profili 47
Şekil 3.3	Küçük hücum açısına sahip bir kanat profili etrafındaki basınç dağılımı..... 48
Şekil 3.4	Basınç katsayısının veter uzunluğu boyunca değişimi..... 49
Şekil 3.5	Kanat profili karakteristikleri..... 49
Şekil 3.6	Kanat kesiti üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler..... 50

Şekil 3.7	Hücum açısı.....	52
Şekil 3.8	Hücum açısının değişimi ile kanat profili etrafındaki akış.....	53
Şekil 3.9	Aerodinamik katsayıların hücum açısı ile değişimi.....	53
Şekil 3.10	Kamburluklu ve simetrik kanat profillerinden elde edilen kaldırman katsayısı.....	54
Şekil 3.11	Flap çeşitleri; a- Düz flap, b- Yarıkli flap, c- Kayan flap, d- Kayan yarıkli flap.....	55
Şekil 3.12	Slat kullanımı ile kanat profili etrafındaki akışın kontrolü.....	56
Şekil 3.13	Değişik kanat profilleri için kaldırma katsayısının hücum açısı ile değişimi.....	57
Şekil 3.14	Rüzgar türbin tiplerine göre uç hız oranı- C_p grafiği.....	59
Şekil 3.15	NACA22 hücum kenarı slatlı NACA2415 kanat profili.....	60
Şekil 3.16	Kanatlardaki yüksek hücum açısında Re sayısının etkisi.....	61
Şekil 3.17	Akımların benzerliği.....	62
Şekil 3.18	Kanat profili için oluşturulan ağ yapısı.....	62
Şekil 4.1	0^0 hücum açısında ki slatlı kanat profilinin eleman sayısına göre değişen C_L değerleri.....	67
Şekil 4.2	$\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 21^0$ 'daki basınç konturu (Pa) ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$).....	68
Şekil 4.3	$\alpha = 12^0$ 'de ve $\delta = 25^0$ 'daki basınç konturu (Pa) ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$).....	69
Şekil 4.4	$\alpha = 27^0$ 'de ve $\delta = 33^0$ 'daki basınç konturu (Pa) ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$).....	69
Şekil 4.5	$\alpha = 30^0$ 'da ve $\delta = 35^0$ 'daki basınç konturu (Pa) ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$).....	70
Şekil 4.6	$\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 21^0$ 'daki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$).....	71
Şekil 4.7	$\alpha = 12^0$ 'da ve $\delta = 21^0$ 'deki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$).....	71
Şekil 4.8	$\alpha = 27^0$ 'da ve $\delta = 33^0$ 'deki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$).....	72

Şekil 4.9	$\alpha = 30^0$ 'da ve $\delta = 35^0$ 'deki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	72
Şekil 4.10	$\alpha = 0^0$ 'daki basınç dağılımı ($Re=1 \times 10^5$).....	73
Şekil 4.11	$\alpha = 6^0$ 'daki basınç dağılımı ($Re=1 \times 10^5$).....	74
Şekil 4.12	$\alpha = 12^0$ 'daki basınç dağılımı ($Re=1 \times 10^5$).....	74
Şekil 4.13	Farklı hücum açılarında hava akışında $\delta_{sbt}=25^0$ 'deki farklı $h/c_1 - C_L$ ve C_D değerleri grafiği ($Re=1 \times 10^5$)	77
Şekil 4.14	Farklı hücum açılarında hava akışında $\delta_{sbt}=25^0$ 'deki farklı $h/c_1 - C_L/C_D$ değerleri grafiği ($Re=1 \times 10^5$)	78
Şekil 4.15	NACA22 hücum kenarı slatlı NACA2415 kanat profili deneysel taşıma katsayısının hücum açısı ile değişimi.....	79
Şekil 4.16	Farklı hücum açılarında ve optimum slat açısındaki C_L ve C_D değerleri grafiği ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	81
Şekil 4.17	Farklı hücum açılarında ve optimum slat açısındaki C_L ve C_D değerleri grafiği ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	81
Şekil 4.18	Farklı hücum açılarında optimum slat açıları grafiği ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	82
Şekil 4.19	Slatlı ve slatsız NACA2415'in hava akışında farklı hücum açılarında C_L ve C_D değerleri grafiği ($Re=1 \times 10^5$)	82
Şekil 4.20	Slatlı ve slatsız NACA2415'in hava akışında farklı hücum açılarında C_L/C_D değerleri grafiği ($Re=1 \times 10^5$)	83
Şekil 4.21	$\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 21^0$ 'deki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)....	86
Şekil 4.22	$\alpha = 12^0$ 'de ve $\delta = 25^0$ 'daki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)..	87
Şekil 4.23	$\alpha = 27^0$ 'de ve $\delta = 33^0$ 'deki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)..	87
Şekil 4.24	$\alpha = 30^0$ 'da ve $\delta = 35^0$ 'deki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)..	87
Şekil 4.25	$\alpha = 0^0$ 'daki hız konturu ($Re=1 \times 10^5$)	88
Şekil 4.26	$\alpha = 6^0$ 'daki hız konturu ($Re=1 \times 10^5$)	88
Şekil 4.27	$\alpha = 12$ 'daki hız konturu ($Re=1 \times 10^5$)	89
Şekil 4.28	$\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 21^0$ 'daki akış çizgileri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)...	90
Şekil 4.29	$\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 21^0$ 'deki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	91
Şekil 4.30	$\alpha = 12^0$ 'da ve $\delta = 25^0$ 'deki akış çizgileri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)..	91

Şekil 4.31	$\alpha = 12^0$ 'da ve $\delta = 25^0$ 'deki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	91
Şekil 4.32	$\alpha = 27^0$ 'da ve $\delta = 33^0$ 'daki akış çizgileri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	92
Şekil 4.33	$\alpha = 27^0$ 'da ve $\delta = 33^0$ 'daki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	92
Şekil 4.34	$\alpha = 30^0$ 'da ve $\delta = 35^0$ 'daki akış çizgileri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$).	93
Şekil 4.35	$\alpha = 30^0$ 'da ve $\delta = 35^0$ 'daki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	93
Şekil 4.36	$\alpha = 0^0$ 'daki akış çizgileri ($Re=1 \times 10^5$).....	94
Şekil 4.37	$\alpha = 6^0$ 'daki akış çizgileri ($Re=1 \times 10^5$).....	94
Şekil 4.38	$\alpha = 12^0$ 'daki akış çizgileri ($Re=1 \times 10^5$).....	95
Şekil 4.39	$\alpha = 15^0$ 'daki akış çizgileri ($Re=1 \times 10^5$).....	95
Şekil 4.40	$\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 21^0$ 'daki türbülans şiddetleri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	96
Şekil 4.41	$\alpha = 12^0$ 'da ve $\delta = 25^0$ 'daki türbülans şiddetleri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	97
Şekil 4.42	$\alpha = 27^0$ 'da ve $\delta = 33^0$ 'daki türbülans şiddetleri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	97
Şekil 4.43	$\alpha = 30^0$ 'da ve $\delta = 35^0$ 'daki türbülans şiddetleri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	98
Şekil 4.44	$\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 21^0$ 'daki vorteks kopma frekansı (Hz) ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	99
Şekil 4.45	$\alpha = 12^0$ 'da ve $\delta = 25^0$ 'daki vorteks kopma frekansı (Hz) ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	99
Şekil 4.46	$\alpha = 27^0$ 'da ve $\delta = 33^0$ 'daki vorteks kopma frekansı (Hz) ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)	100
Şekil 4.47	$\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki basınç konturu (Pa) ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	101
Şekil 4.48	$\alpha = 10^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki basınç konturu (Pa) ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	102
Şekil 4.49	$\alpha = 33^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'daki basınç konturu (Pa) ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	102

Şekil 4.50	$\alpha = 35^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'daki basınç konturu (Pa)($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	102
Şekil 4.51	$\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	103
Şekil 4.52	$\alpha = 10^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	104
Şekil 4.53	$\alpha = 33^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'daki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	104
Şekil 4.54	$\alpha = 35^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'daki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	105
Şekil 4.55	$\alpha = 0^0$ 'da su ortamındaki basınç dağılımı ($Re=2.53 \times 10^5$).....	106
Şekil 4.56	$\alpha = 6^0$ 'da su ortamındaki basınç dağılımı ($Re=2.53 \times 10^5$).....	106
Şekil 4.57	$\alpha = 10^0$ 'da su ortamındaki basınç dağılımı ($Re=2.53 \times 10^5$).....	107
Şekil 4.58	Farklı hücum açılarında hava akışında $\delta_{sbt}=19^0$ 'daki farklı $h/c_1 - C_L$ ve C_D değerleri grafiği ($Re=2.53 \times 10^5$).....	110
Şekil 4.59	Farklı hücum açılarında hava akışında $\delta_{sbt}=19^0$ 'daki farklı $h/c_1 - C_L/C_D$ değerleri grafiği ($Re=2.53 \times 10^5$).....	110
Şekil 4.60	Farklı hücum açılarında ve optimum slat açısındaki C_L ve C_D değerleri grafiği ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$).....	112
Şekil 4.61	Farklı hücum açılarında ve optimum slat açısındaki C_L / C_D değerleri grafiği ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$).....	112
Şekil 4.62	Farklı hücum açılarında ve optimum slat açısındaki, Re sayısı ile C_L ve C_D değerleri grafiği ($h/c_1=0.165$).....	113
Şekil 4.63	Farklı hücum açılarında ve optimum slat açısındaki, Re sayısı ile C_L/C_D değerleri grafiği ($h/c_1=0.165$).....	114
Şekil 4.64	Slatlı ve slatsız NACA2415'in hava akışında farklı hücum açılarında C_L ve C_D değerleri grafiği ($Re=1 \times 10^5$).....	115
Şekil 4.65	Slatlı ve slatsız NACA2415'in hava akışında farklı hücum açılarında C_L/C_D değerleri grafiği ($Re=1 \times 10^5$).....	115
Şekil 4.66	$\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	118
Şekil 4.67	$\alpha = 10^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	119

Şekil 4.68	$\alpha = 33^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'deki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	119
Şekil 4.69	$\alpha = 35^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'deki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	120
Şekil 4.70	$\alpha = 0^0$ 'daki hız konturu ($Re=2.53 \times 10^5$)	120
Şekil 4.71	$\alpha = 6^0$ 'daki hız konturu ($Re=2.53 \times 10^5$)	121
Şekil 4.72	$\alpha = 18^0$ 'daki hız konturu ($Re=2.53 \times 10^5$)	121
Şekil 4.73	$\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki akış çizgileri ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	122
Şekil 4.74	$\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	123
Şekil 4.75	$\alpha = 10^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki akış çizgileri ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	123
Şekil 4.76	$\alpha = 10^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	123
Şekil 4.77	$\alpha = 33^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'daki akış çizgileri ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	124
Şekil 4.78	$\alpha = 33^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'daki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	124
Şekil 4.79	$\alpha = 35^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'daki akış çizgileri ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	125
Şekil 4.80	$\alpha = 35^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'daki cidar kaya gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	125
Şekil 4.81	$\alpha = 0^0$ 'daki akış çizgileri ($Re=2.53 \times 10^5$)	126
Şekil 4.82	$\alpha = 6^0$ 'daki akış çizgileri ($Re=2.53 \times 10^5$)	126
Şekil 4.83	$\alpha = 18^0$ 'daki akış çizgileri ($Re=2.53 \times 10^5$)	127
Şekil 4.84	$\alpha = 21^0$ 'daki akış çizgileri ($Re=2.53 \times 10^5$)	127
Şekil 4.85	$\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki türbülans şiddeti ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	128
Şekil 4.86	$\alpha = 10^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki türbülans şiddeti ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	128
Şekil 4.87	$\alpha = 33^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'deki türbülans şiddeti ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	129

Şekil 4.88	$\alpha = 35^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'daki türbülans şiddeti ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	129
Şekil 4.89	$\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki vorteks kopma frekansı (Hz) ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	130
Şekil 4.90	$\alpha = 10^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki vorteks kopma frekansı (Hz) ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	130
Şekil 4.91	$\alpha = 33^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'deki vorteks kopma frekansı (Hz) ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	131
Şekil 4.92	Farklı hücum açılarında optimum slat açıları grafiği ($h/c_1=0.165$)	133

ÇİZELGELER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1	İşletmedeki lisanslı rüzgar santralleri..... 16
Çizelge 1.2	Türkiye'de oluşturulması önerilen rüzgar kurulu gücü ve rüzgar enerjisi üretimi..... 18
Çizelge 1.3	AB Ülkelerindeki 2009 sonu itibarı ile olan kurulu güçleri..... 20
Çizelge 2.1	Uç hız oranına göre $C_{P,max}$ ve uç noktadaki a_2 değerleri..... 36
Çizelge 2.2	Kanat kökünden uca doğru veter ve burulma açısı dağılımları.. 42
Çizelge 4.1	Farklı hücum açıları ve $\delta_{sbt}=25^0$ 'deki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.125$, $Re=1 \times 10^5$) 75
Çizelge 4.2	Farklı hücum açıları ve $\delta_{sbt}=25^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.145$, $Re=1 \times 10^5$) 76
Çizelge 4.3	Farklı hücum açıları ve $\delta_{sbt}=25^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$) 76
Çizelge 4.4	Farklı hücum açıları ve $\delta_{sbt}=25^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.185$, $Re=1 \times 10^5$) 77
Çizelge 4.5	Farklı hücum açıları ve optimum slat açısındaki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$) 80
Çizelge 4.6	$\alpha=12^0$ ve $\delta=25^0$ 'deki kanat kesit açıları ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$) 84
Çizelge 4.7	Slatlı ve slatsız NACA2415'in hava akışında elde edilen aerodinamik sonuçlar ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$) 84
Çizelge 4.8	Slatsız NACA2415 kanat profilinin hava ortamında Güç, İtki ve Tork değerleri ($Re=1 \times 10^5$) 85
Çizelge 4.9	Slatlı NACA2415 kanat profilinin hava ortamında Güç, İtki ve Tork değerleri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$) 85
Çizelge 4.10	Farklı hücum açıları ve $\delta_{sbt}=19^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.125$, $Re=2.53 \times 10^5$) 108
Çizelge 4.11	Farklı hücum açıları ve $\delta_{sbt}=19^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.145$, $Re=2.53 \times 10^5$) 108
Çizelge 4.12	Farklı hücum açıları ve $\delta_{sbt}=19^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$) 109

Çizelge 4.13	Farklı hücum açıları ve $\delta_{sbt}=19^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.185$, $Re=2.53 \times 10^5$)	109
Çizelge 4.14	Farklı hücum açıları ve optimum slat açısındaki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$).....	111
Çizelge 4.15	Farklı Re sayılarında, su ortamında elde edilen aerodinamik katsayı değerleri ($h/c_1=0.165$)	114
Çizelge 4.16	$\alpha=10^0$ ve $\delta=19^0$ 'daki kanat kesit açıları ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	116
Çizelge 4.17	Slatlı ve slatsız NACA2415'in hava akışında elde edilen aerodinamik sonuçlar ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	117
Çizelge 4.18	Slatsız NACA2415 kanat profilinin hava ortamında Güç,İtki ve Tork değerleri ($Re=2.53 \times 10^5$)	117
Çizelge 4.19	Slatlı NACA2415 kanat profilinin hava ortamında Güç,İtki ve Tork değerleri ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)	117
Çizelge 4.20	Farklı h/c_1 oranlarında ve $\delta_{sbt}=25^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($Re=1 \times 10^5$)	132
Çizelge 4.21	Farklı h/c_1 oranlarında ve $\delta_{sbt}=19^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($Re=2.53 \times 10^5$)	132
Çizelge 4.22	Hava ve su ortamındaki maksimum aerodinamik katsayı değerlerinde ve açıları.....	133

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

C_p	: Rüzgar türbin rotorunun güç katsayısı
$C_{P,max}$: Maksimum rotor güç katsayısı
C'_p	: Basınç katsayısı
C_T	: Rüzgar türbin rotorunun tork katsayısı
P'	: Türbin rotorunun güç çıkışı (W)
P	: Statik basınç (Pa)
\dot{m}	: Rotor düzleminde geçen hava debisi (kg/s)
U_1	: Rüzgarın giriş hızı (m/s)
U_{rel}	: Bağlı rüzgar hızı (m/s)
$U_{2=3}$: Rotordaki düzenli rüzgar hızı (m/s)
U_4	: Rüzgarın çıkış hızı (m/s)
U_2	: Rotor düzlemindeki rüzgarın aksel hızı
V_2	: Rotor düzlemindeki rüzgarın dönme hızı
u_4	: Çıkıştaki rüzgarın aksel hızı
v_4	: Çıkıştaki rüzgarın dönme hızı
w_4	: Çıkıştaki rüzgarın açısal hızı
A	: Rüzgar türbin rotorunun alanı (m ²)
r	: Rüzgar türbin rotorunun yarıçapı (m)
R	: Rotor düzlemindeki radyal koordinat (m)
r_w	: Çıkıştaki radyal koordinat (m)
dr	: Radyal genişlik
p_1	: Girişteki hava basıncı (Pa)
p_2	: Rotor girişindeki hava basıncı (Pa)
p_3	: Rotor çıkışındaki hava basıncı (Pa)
P'	: Rotor kanadı etrafındaki basınç kaybı (Pa)
P_4	: Çıkıştaki hava basıncı (Pa)
P_{ref}	: Referans basıncı (Pa)
V_{ref}	: Referans hız (m/s)
T	: Rotor itme kuvveti (N)
Q	: Tork (N.m)
M	: Moment (N.m)

C_M	: Moment katsayısı
F_D	: Kanat elemanı üzerindeki sürüklenme kuvveti (N)
F_L	: Kanat elemanı üzerindeki kaldırma kuvveti (N)
C_D	: Sürüklenme kuvveti katsayısı
C_L	: Kaldırma kuvveti katsayısı
F_T	: Rotorun süpürdüğü daireye etkiyen teğetsel kuvvet (N)
F_N	: Dönme düzlemine etkiyen normal kuvvet (N)
B	: Rotorun sahip olduğu kanat sayısı
a	: Aksenal indüksiyon faktörü
a'	: Açısal indüksiyon faktörü
λ	: Rotorun kanat ucu – hız faktörü
λ_r	: Bölgesel kanat ucu – hız faktörü
c	: Kanat genişliği (m)
L	: Kanat boyu (m)
t	: Kanat kalınlığı (m)
N	: Devir sayısı
f	: Vorteks kopma frekansı
S_t	: Strouhal sayısı
ρ	: hava yoğunluğu
Ω	: Rüzgar türbini rotorunun açısal hızı (rad/s)
α	: Hücüm açısı
δ	: Slat açısı
θ_p	: Pala açısı
$\theta_{p,0}$: Kanat ucundaki hatve açısı
θ_T	: Kesit burulma açısı
φ	: Bağlı rüzgar hızının gelme açısı
σ'	: Kanat dayanıklılık oranı
ν	: Havanın kinematik viskozitesi
γ	: Özgül ısılar oranı
Z_w	: Cidar kayma gerilmesi
M_a	: Mach sayısı

<i>R</i>	: Gaz sabiti
<i>T</i>	: Sıcaklık (°C)
Re	: Reynolds sayısı
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
RNG	: Renormalization group
RANS	: Reynolds ortalamalı navier-stokes
DERT	: Dikey eksenli rüzgar türbinleri
YERT	: Yatay eksenli rüzgar türbinleri
NACA	: National advisory committee for aeronautics

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların kullanımının artması sonucu yakın gelecekte tükeneceği bilinmektedir. Bir yandan sonsuz olmayan kısıtlı bir enerji kaynağı diğer yandan bu enerji kaynağının küresel boyutlardaki zararının dikkat çekici hale gelmesiyle, çevresel zararlı etkileri daha az olan alternatif enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmaktadır. Rüzgar enerjisi üretimi, çevreye vermiş olduğu zararın çok az olması nedeniyle, alternatif enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutar. Yeni kontrol metodolojilerinin geliştirilmesi, türbin aerodinamiğinin iyileştirilmesi ile rüzgar enerjisinin rekabet gücü artmıştır.

Rüzgar türbinleri aerodinamik olarak dizayn edilen kanatlardan oluşmaktadır. Bu kanatların kesiti aerodinamik bir profil olup hava akışını karşılayan kanat profili, aerodinamik kaldırma ve sürtünmeyi oluşturur.

Yapılan araştırmalar ve deneyler sürekli olarak rüzgar türbinlerin performanslarını arttırmak için yeni kanat tiplerinin geliştirilmesi üzerine yapılmaktadır. Bunun amacı, kanattan ayrılmayı daha geç sağlamayarak daha iyi bir akış sağlamak ve akışın kısmi veya tamamen yüzeye bağlanması ile daha yüksek kaldırma kuvveti ve daha az sürüklenme kuvveti sağlamaktır.

Bu projenin amacı, düşük su ve hava hızlarda, slatların kanat profilinin aerodinamik karakteristiği üzerindeki etkilerini ortaya koymak, slatlı bir türbin kanadının maksimum performans için optimum geometrik değerler ve hücum açısı belirlemektir. Böylece slatlı bir türbin kanadının türbin performansına etkilerini sayısal olarak belirlenebilecektir.

1.1. Rüzgar ve Rüzgar Türbinleri

Gece oluşan soğuk hava tabakasının yere yakın bölümleri, güneşin ışınlarıyla hemen ısınmaya başlar, ısınan hava genişler ve yükselir. Bu anda atmosferdeki soğuk hava tabakası yere doğru iner. Sıcak ve soğuk havanın yer değiştirmesiyle rüzgar oluşur [1].

1.1.1. Rüzgar türbinlerinin tarihçesi

Rüzgar enerjisinin kullanımı çok eskilere dayanmaktadır. İlk olarak, Asya Medeniyetlerinden Çin, Tibet, Afganistan ve İran'da kullanıldığı bilinmektedir. Bu rüzgar türbinleri merkezi düşey bir safta bağlı, ağaç ve kamış dallarından yapılan düşey yelkenlerden oluşmuş bir yapıya sahiptir.

Endüstri devrimi ile birlikte, 18.yüzyılda buhar makinelerinin ortaya çıkması sonucunda dünya, enerji ihtiyacı temini için termodinamik işlemlere dayanan makinelerden yararlanmaya başlamıştır. Özellikle kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların kullanımı ile beraber , bu makineler daha avantajlı bir duruma gelmiştir. Fakat istenildiği anda enerji üretimi olanağı sağlamasından dolayı, rüzgar enerjisinden daha popüler hale gelmişlerdir. Bu nedenle 19.yüzyılda ve 20.yüzyılın ortalarına doğru rüzgar enerjisinin önemi azalmıştır. Sadece, Amerika, Rusya ve Avustralya gibi nüfusu geniş bir alana yayılmış olan ülkelerde rüzgar enerjisi çiftçiler tarafından su çekmek için kullanılmıştır [2].

1960' lı yıllardan sonra rüzgar enerjisinden elektrik üretiminde ekonomik nedenlerden dolayı azalma meydana gelmiştir. Daha ucuz olan fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz vb.) kullanılarak yapılan termik santraller popüler olmaya başlamıştır.

1973 Dünya petrol krizi, alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına gösterilen ilginin artmasına sebep olmuştur. Dünya enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılayan fosil yakıtların kısıtlı kullanım sürelerinin olması, enerjinin elde edilmesi sırasında çevreye yapılan tahribat ve gelecek nesillerin de enerji ihtiyacı dikkate alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha iyi anlaşılmaktadır.

1981 yılında Paul la Cour ve Danimarka Askov Folk High School bilim adamlarının oluşturduğu bir grup rüzgardan elektrik enerjisi üreten ilk türbini yaptılar. Danimarka hükümetinin desteğiyle de test amaçlı bir rüzgar santrali kurdular [2]. 1918 yılına gelindiğinde Danimarka'da rüzgardan elektrik enerjisi üretmek amacıyla kurulan 120 adet RT bulunmaktaydı. Güçleri 20-30 KW arasında değişen bu RT 'lerin toplu güçleri 3 MW civarındaydı.

Rüzgar Enerjisi; özellikle 1990' lı yıllardan itibaren önemli bir gelişme göstermiş, Amerika ve Avrupa'da yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Yapılan araştırmalara göre; su an yürütölmekte olan politikaların devam etmesi durumunda dünya üzerindeki elektrik enerjisi üretimindeki payının hızla artacağı tahmin edilmektedir.

1.1.2. Rüzgar türbini çeşitleri

Tarih boyunca çeşitli evrimler geçiren rüzgar makinelerinde kullanılan türbinler farklı tiplerdedir. RT'ler dönme eksenine göre gruplara ayrılırlar:

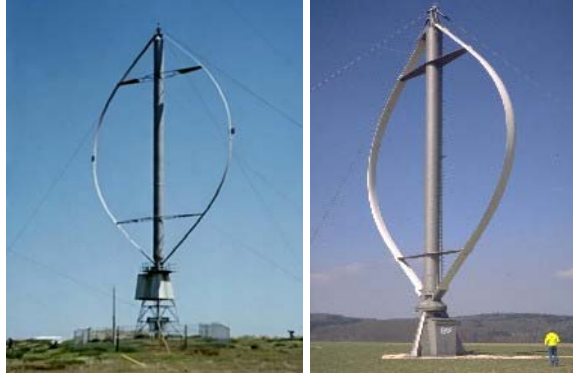
- Dikey eksenli rüzgar türbinleri
- Yatay eksenli rüzgar türbinleri

1.1.2.1. Dikey eksenli rüzgar türbinleri

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin (DERT) temel özelliği kanatlardan jeneratöre iletilen gücün rüzgar akış yönüne göre dikey olmasıdır. Dikey eksenli birçok tip jeneratör tasarımı bulunmakta fakat; iki ana türbin öne çıkmaktadır. Darrieus ve Savonius rüzgar jeneratörleri;

a. Darrieus

1931 yılında Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından icat edilmiştir. 1970 ve 1980'lerde Amerika ve Kanada da Darrieus türbinlerinin kanat dizaynları üzerine geniş çalışmalar yapılmıştır. Darrieus jeneratörü, dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin en çok kullanılan tipidir. Bu tip jeneratörlerin verimliliği yüksektir. Yüksek hızlarda çalışabilir ve türbin; 2 veya 3 kanatlı olur (Bkz. Şekil 1.1). Rotorun kalkınma torku yüksek olduğundan dışarıdan bir güç kaynağı veya fazladan bir savonius rotoru kullanılmasını gerektirir. Ayrıca kulenin stabil olması için destekleyici kablolarla desteklenmesi gerekir.



Şekil 1.1: Darrieus tipi rüzgar türbinleri

b. Savonius

Savonius RT, 1925 yılında Finlandiya 'lı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından keşfedilmiştir. İki yatay disk arasına yerleştirilmiş ve merkezleri birbirine göre simetrik olarak kaydırılmış, “kanat” adı verilen iki yarım silindirden oluşmaktadır. Belirli bir hızla gelen rüzgarın etkisiyle, çarkı oluşturan silindirin iç kısmında pozitif ve dış kısmında negatif bir momentin olmaktadır. Pozitif moment, negatif momentten daha büyük olduğundan, dönme hareketi pozitif moment yönünde sağlanır [3].



Şekil 1.2 : Savonius tipi rüzgar türbini

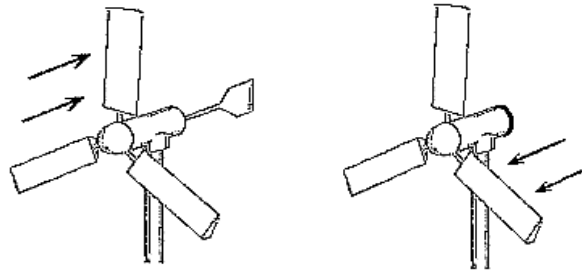
Diğer DERT'lere göre; düşük rüzgar hızlarında iyi başlangıç karakteristiklerine sahip olması, yapımının kolay ve ucuz olması, rüzgarın yönünden bağımsız olması ve kendi kendine ilk harekete başlaması gibi birçok üstünlüklere sahip olan Savonius RT'lerinin (Bkz. Şekil 1.2), aerodinamik performansı düşük olduğu için ilk uygulama alanları; havalandırma, su pompalama gibi kısıtlı alanlar olmuştur [4;5].

1.1.2.2. Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Yatay eksenli rüzgar türbinleri (YERT), ana rotor ile elektrik üreten bir jeneratöre sahiptir. Bu jeneratör ve rotor genellikle kulenin üzerinde bulunur ve rüzgarı karşıdan alırlar. Kuleler arkalarında türbülans yarattıkları için türbinler genellikle kulenin üst taraflarına yerleştirilirler. Bu durum türbinin kanatlarının kuleye çarpma tehlikesini yaratır. Bu nedenle kanat malzemesi seçilirken esnek; fakat güçlü rüzgârlarda bile kanatların kuleye çarpmasını engelleyecek kadar sert bir malzemedan seçilir. Ayrıca kanatlar kuleden belli bir mesafe uzak yerleştirilir.

Rüzgar türbinlerinde rotorun yeri önemlidir. Eğer rüzgarı karşıdan alıyorsa Şekil 1.6'de görüldüğü gibi buna "upwind", eğer kulenin ekseninin arkasında, yani rüzgarın doğrultusu üzerinde bulunuyorsa buna "downwind" türbin denilir .

Downwind türbinler, türbülans problemine rağmen kullanılmaktadır. Bunun nedeni rotorun rüzgarı karşılaması için ek bir sisteme ihtiyaç duyulmaması ve güçlü rüzgarlarda kanatların eğilerek yüzey alanını düşürmesine olanak tanınmasıdır. Genellikle upwind türbinler kullanılır.



Upwind Türbin

Downwind Türbin

Şekil 1. 3 : Upwind Türbin ve Downwind Türbinleri

1.1.2.3. DERT'lerin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar incelenecek olursa, hareketli parçalar yere takın olduğu için bakım onarım kolay ve yatay eksenli rotorlarda olduğu gibi rüzgara karşı dönmesi gerek bu sebeple yön bulma mekanizması kullanılmazlar.

Dezavantajları ise; Geleneksel yatay eksenli türbinlerin %50 si kadar enerji üretebilirler. Bunun sebebi kanatların rüzgârla birlikte dönmelerinden kaynaklanan

enerji kayıplarıdır. Yükseklik arttıkça rüzgâr hızı da artar. Dikey eksenli türbinlerin kanatları yere yakın olduğundan rüzgar hızından yeterince faydalanılamaz. Sistemin düz yerlere kurulması gerekir. Sistemin kurulamadığı birçok yere yatay eksenli jeneratörler kurulabilir.

1.1.2.4. YERT' lerin avantajları ve dezavantajları

Avantajları; kanatların rüzgarı karşılama açısının değiştirilmesine olanak tanır. Böylece türbin, mevcut rüzgar yönü ve şiddetine en uygun şekli alarak maksimum gücü şafta aktarır. Bazı bölgelerde, yüksekliğin her on metrelik artışında rüzgar hızı % 20 oranında artmaktadır. Yatay eksenli rüzgar türbinleri, yerleştirildikleri kulelerin uzunluğunda serbestlik tanır. Böylece yüksek noktalardaki rüzgar gücünden yararlanılabilir. Yüksek kuleler sayesinde ormanlar gibi bölgelerde kullanıma olanak sağlar ve üretimi daha yaygın ve ekonomiktir.

Dezavantajları, Yere yakın noktalarda kullanılamamaktadır. Bunun nedeni yere yakın noktalarda türbülans olmasıdır. Yatay eksenli rüzgar türbinleri laminar akışta verimli çalışır. Yüksek kuleleri ve uzun kanatları türbinlerin taşınmasını zorlaştırmaktadır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin talebi, arzdan yüksektir. 2004 ve 2006 yılları arasında türbin fiyatları % 60 artmıştır. 2006 sonunda, isim yapmış bütün üreticiler teslimler için 2008'e gün vermektedir.

1.1.3. Rüzgar elektrik santralının avantajları ve dezavantajları

a. Avantajları;

Rüzgar enerjisi kirlilik yaratmayan ve çevreye çok az zarar veren yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Yeryüzünde %95 gibi bir alanda rüzgar enerjisi elde edilebilir ve bu alanlarda aynı zamanda ziraat, ormancılık gibi faaliyetler de sürdürülebilir. Rüzgar Enerji Santralleri diğer enerji santralleri gibi çevreyi kirletecek kimyasal ve benzeri atıklar yaymaz. Dolayısıyla santralin bulunduğu çevre her zaman temiz ve doğal kalır. (600 KW lık bir rüzgar türbini gücünde olan bir kömür santrali yılda yaklaşık 1200 ton CO₂ üretir. Buna karşın Rüzgar Enerji Santrali ise CO₂ emisyonuna neden olmaz. Bu maddeler atmosferi kirlettiği gibi sera etkisi sebebiyle küresel ısınmalara yol açmaktadır. Şimdiden buzulların erimeye başladığı ve hızlı çölleşme süreci bilinen bir gerçektir.) Gelişen teknoloji ile birlikte

enerji birim maliyetleri düşmektedir. Dünya enerji rezervlerinin ömürlerine bakarsak rüzgar enerjisinin sonsuz olan kaynağı ile en önemli avantajını görebiliriz [6].

Nükleer enerji→ 200 yıl, Kömür→ 200 yıl, Gaz→ 65 yıl, Petrol→ 40 yıl,
Rüzgar→ sonsuz

b. Dezavantajları;

Türbinlerin sesli çalışmaları, yakın çevrelerinde yaşayan insanlar için rahatsız edicidir. Bu nedenle yerleşim merkezlerinden ve hassas vahşi yaşam alanlarından uzakta kurulmaları gerekmektedir.(Gelişen teknoloji ile birlikte bu dezavantaj giderek azalmıştır.) Rüzgar Türbinleri yalnızca rüzgar estiği zaman enerji üretir. Enerji üretimi rüzgara göre değişir. Rüzgar türbinleri endüstriyel standartlara göre dikilirse modern bir rüzgar türbini yılın %98 inde çalışır halde bulunur. Buda demektir ki iyi rüzgar alan bir bölgede modern bir türbin 6 aylık kontroller dahilinde güvenilir bir şekilde sürekli enerji üretir. Kuş ölümlerine neden olur,radyo ve TV alıcılarında parazitleşme yaparlar Bu nedenle İngiltere başta olmak üzere bir çok Avrupa ülkesinde büyük rüzgar türbinlerinin yarattığı çevre sorunları nedeniyle milli park alanlarının sınırları içine ve çok yakınlarına kurulması yasaklanmıştır [6]. (Türbinlerin haberleşmede parazit oluşturması ise 2-3 km alanda sınırlı kalmaktadır.)

1.1.4. Güç kontrolü sistemi

Rüzgar türbinleri, nominal gücü vermek üzere tasarlandıkları hızların (nominal hız) üzerinde, türbinin zarar görmesini önlemek amacıyla kontrol sistemlerine sahiptirler. Bu sistemler, türbin nominal hızı aştıktan sonra palaların aerodinamik performansını düşürerek jeneratörde oluşabilecek aşırı yüklemeyi önlerler. Bu amaçla kullanılabilir 5 temel tasarımdan söz edilebilir. Bunlar kullanım yaygınlıklarına göre:

- Pasif Stall Kontrolü
- Aktif Pitch Kontrolü
- Aktif Stall Kontrolü
- Sapma Kontrolü

- Pasif Pitch Kontrolü

Bu beş tasarımdan ilk üçü yaygınlık kazanırken son ikisi geniş uygulama alanı bulamadılar.

Sapma kontrollü türbinler, türbinlerin çoğunda, türbini rüzgar yönüne çevirmek için mevcut bulunan sapma kontrolü sistemini güç kontrolü için de kullanma düşüncesine dayanıyor. Bu sistemler, rüzgar tasarım hızının üzerine çıktığında türbini rüzgar akımının doğrultusundan çıkartmak böylece türbinin güç katsayısını düşürmek prensibine dayanırlar. Fakat bu sistem yeterli sapma hızlarına ulaşmanın içerdiği zorluklar ve pala ile makine dairesinin dönüş esnasında yarattığı momentten dolayı yaygın bir sistem değildir. Bu tür sistemlerde, sapma özellikle ilk 10° civarında önemli bir güç katsayısı düşüşü sağlayamamaktadır, bu sebeple bu değer üzerine çıkmak için geçen sürede aşırı yüklenme ihtimali artmaktadır [7].

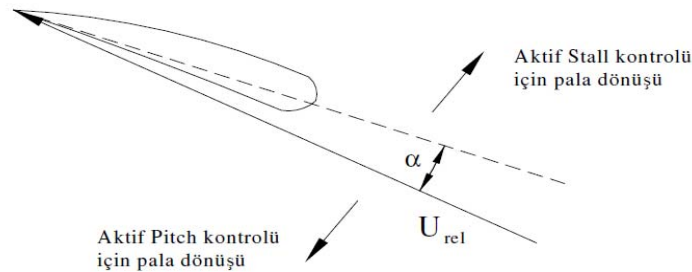
Pasif pitch kontrolünde ise temel düşünce, palayı yüksek hızlarda burularak istenen pitch açısına ulaşacak şekilde tasarlamak, bu şekilde güç kontrolü sağlamaktır. Prensip mantıklı ve basit gözükse de uygulamada bunu başarmak zor, çünkü güç kontrolü için gerekli burulma ile pala üzerine gelen yüklerin oluşturduğu burulma birbiriyle uyumlu olmayabilir.

Stall kontrollü türbinler, göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmiş palalara sahip sistemlerdir. Bu sistemler, rüzgar hızındaki artış ile birlikte hücum açısının da artması ve palanın stall etkisine girmeye başlaması sayesinde güç kontrolü sağlarlar. Pala geometrisi, rüzgar nominal hızın üzerindeki hızlarda arttıkça, performansı düşürecek şekilde tasarlanmıştır. Pala kök bölgesinden başlayarak stall etkisine girer, bu şekilde tasarım hızı üzerindeki hızlarda, aşırı yüklenme sebebiyle türbin sistemlerinde oluşacak hasarlar önlenmiş olur. Stall kontrollü sistemler nominal hızın üzerindeki hızlarda, pitch kontrollü türbinler gibi sabit bir güç seviyesini koruyamamaktadırlar, bu sebeple nominal hız üzerinde enerji üretimi pitch kontrollü türbinlerden düşüktür. Stall kontrollü türbinlerin temel avantajı, rotorda hareketli parçalara sahip olmamaları ve karmaşık bir kontrol sistemine ihtiyaç duymamalarıdır. Bu türbinler sadece türbinlerin çalıştırılması ve durdurulması için kontrole ihtiyaç duyarlar.

Pitch kontrollü türbinlerde ise, palalar stall kontrollü olanların aksine göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmiş değildirler. Pala, pitch kontrol mekanizması sayesinde rüzgar hızına göre eksenini etrafında döndürülebilmektedir. Bu türbinler, nominal hız üzerinde sabit güç üretimi sayesinde daha kaliteli bir güç çıkışı sağlamaktadırlar, fakat stall etkisine göre tasarlanmadıkları için ani rüzgarlara karşı hassastırlar.

Pitch kontrol mekanizmasının kullanımı farklılıklar gösterebilir. Sistem, bütün hızlarda kullanılarak elde edilen enerjinin artırılması sağlanabilir ya da sistemde aşınmayı azaltmak için sadece nominal hızın üzerinde güç kontrolü için kullanılabilir. Bu sistemler MW sınıfı türbinlerde daha yaygın olarak kullanılmakla birlikte, 600 kW sınıfı türbinlerde de kullanılmaktadır. Pitch kontrollü türbinlerden elde edilecek performans artışı temel olarak kullanılan pitch mekanizmalarının hızına ve hassasiyetine bağlıdır. Bu makineler sahip oldukları pitch sistemleri sebebiyle yüksek hızlarda yapısal sorunlar yaşamaya, sabit palaya sahip stall kontrollü türbinlere oranla daha eğilimlidirler.

Aktif stall kontrolünde, bundan önce söz edilen iki kontrol sistemine göre daha yeni bir tasarımdır. Bu sistemde de pitch kontrollü türbine benzer şekilde güç kontrolü için pala, eksenini etrafında döndürülerek nominal hız üzerinde sabit güç üretimi sağlanır, fakat dönüş yönü pitch kontrolündekinin tersidir. Pitch kontrollü türbin, nominal hızın üzerine çıktığında palayı hücum açısını düşürecek şekilde döndürülürken, aktif stall kontrollü bir türbin palayı ters yönde çevirip, türbini stall etkisine sokar. Bu dönüş hareketleri Şekil 1.4'te görülebilir.



Şekil 1.4. Aktif stall ve aktif pitch kontrolü için pala dönüş yönleri [7]

1.1.5. Rotor Hızı

Türbinler, rotorun dönüş hızına göre temel olarak iki sınıfa ayrılırlar:

- Sabit hızlı türbinler
- Değişken hızlı türbinler

a. Sabit hızlı türbinler

Sabit hızlı türbinler, nominal rüzgar hızında, nominal güce ulaşmalarını sağlayacak sabit bir devirde dönen türbinlerdir. Bu sistem, şebeke bağlantılı pek çok rüzgar türbininde kullanılmış ve tasarım kolaylığı sağlamış olmakla birlikte sadece tek hızda döndükleri ve buna bağlı olarak sadece belirli bir rüzgar hızında ve civarında en verimli şekilde çalışmak üzere tasarlandıkları için bu nominal hızdan uzaklaştıkça verimleri düşer. Bu sorunu çözmek için kullanılan ve tasarımda çok büyük değişiklikler gerektirmeyen diğer bir konfigürasyon da iki hızlı türbinlerdir.

İki hızlı türbinlerin, sabit hızlı veya değişken hızlı olarak sınıflandırılması konusunda bazı görüş ayrılıkları olsa da, tam anlamıyla değişken hızlı sayılmazlar. Bu türbinler iki farklı hızda çalışabilmektedir. İki hızlı türbinlerin eski tasarımlarında iki

farklı jeneratör kullanılmakta iken artık tek jeneratör kullanılıp, bu jeneratörün kutup sayısı (4/6) değiştirilerek, jeneratörün senkron hızı (genellikle 1000/1500 dev/dak) ayarlanabiliyor. İki hızlı tasarım, düşük hızlarda da tasarım uç hız oranına yakın uç hızlar sağlayarak verimi yükseltmektedir. Fakat bu sistemler jeneratörler veya jeneratör kutupları arasındaki geçiş sırasında oluşabilecek sorunlara karşı almayı gerektirmektedir.

İki hızlı türbinler, dünya genelinde en yaygın kullanılan sistemlerdir, çünkü sabit hızlı türbinler gibi daha basit mekanizmalardır ve onlara oranla enerji üretiminde artış sağlarlar.

b. Değişken hızlı türbinler

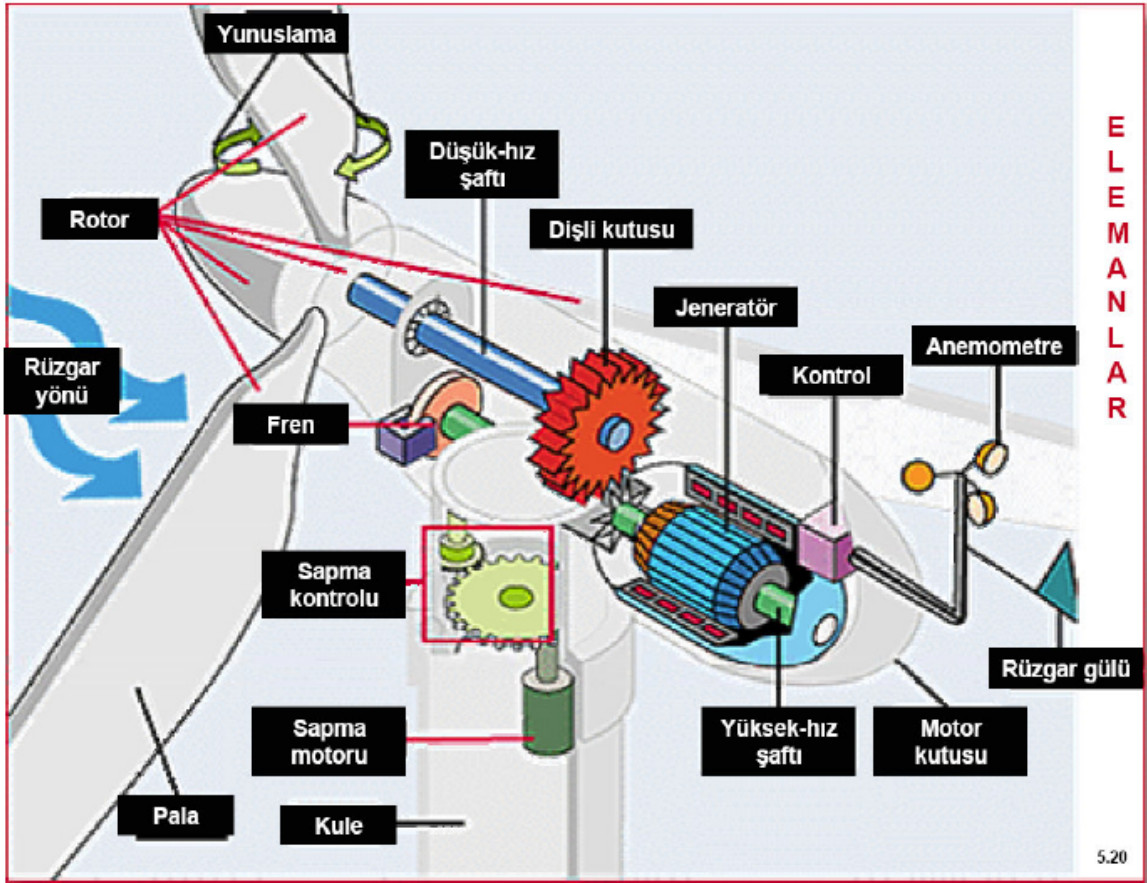
Değişken hızlı rüzgar türbinlerinin temel avantajı, geniş bir rüzgar hızı aralığında optimum uç hız oranında çalışabilmeleri, böylece rotor verimliliğini yükseltip daha fazla enerji elde edilmesini sağlamalarıdır. Bu türbinler genel olarak birlikte kullanıldıkları pitch sistemi ile birlikte nominal hızdan çok düşük hızlarda dahi yüksek verimlilikle çalışabilirler. Ayrıca bu türbinler, düşük rüzgar hızlarında, düşük devirlerde çalıştıkları için gürültü konusunda da avantaj sağlarlar. Değişken hızlı tasarım, dişli kutusuna gelen yükün düşmesini sağlamakla birlikte bu türbinlerde, sabit hızlılarda kullanılanlardan farklı özelliklere sahip jeneratörlerin kullanılması gerekmektedir.

Değişken hızlı tasarımın sağladığı faydalara rağmen çok yaygın olarak kullanılmamasının ana sebebi güç elektroniği maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Bu sebeple bu tür sistemlerin büyük ölçekli sistemlerde kullanılması maliyet açısından daha uygun görülmektedir [8].

Yukarıda açıklanan sistemler arasındaki seçimde ana kriter, sağlayacağı faydanın maliyetini karşılayıp karşılamayacağıdır. Türbin elektrik üretimi amacıyla imal edilenler arasında en yaygın görülen tasarım olan 3 palalı, önden rüzgarlı (upwind) bir türbin olarak tasarlanacaktır. Dünya'da elektrik üretimi amaçlı tasarlanan türbinlerin yaklaşık % 75'ini önden rüzgarlı (upwind) türbinler oluşturmaktadır. Bu türbinler, arkadan rüzgarlı (downwind) türbinlerde görülen kule etkisine maruz kalmadıklarından daha düzgün bir akım elde edebilmektedirler. Türbinde kullanılacak daha gelişmiş bir sistem maliyetteki artışı karşılayacak bir enerji üretimi artışı sağlayacaksa kullanılabilir. Bu sebeple aktif pitch kontrolü, aktif stall kontrolü ve değişken hız gibi gelişmiş türbin tasarımlarının kullanımı, türbin boyutundaki artış ile birlikte artmaktadır.

1.1.6. Bir Rüzgar Türbininde Sistem Bileşenleri

Bir rüzgar türbini baslıca; dişli kutusu, rotor, anemometre, otomatik yöneltme düzeni, frenleme düzeni, yaw mekanizması ve kuleden meydana gelmektedir. Şekil 1.5'de tipik bir rüzgar türbinine ait elemanlar ve konumları görülmektedir. Bu ekipmanları bazılarında aşağıda kısaca açıklanmıştır.



Şekil 1.5 : Bir rüzgar türbinini oluşturan elemanlar ve konumları [9]

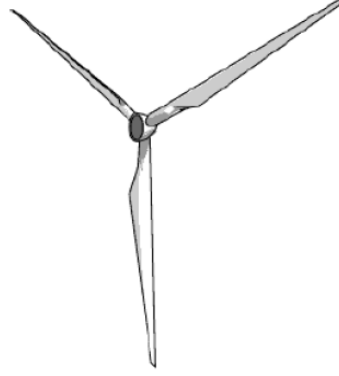
a. Dişli kutusu

Rüzgar türbini rotorunun (pervanesinin) dönmesiyle elde edilen güç, ana shaft, dişli kutusu ve yüksek hız şaftından oluşan güç ünitesiyle jeneratöre aktarılır. Rüzgar türbini rotorundan elde edilen yavaş dönme hızı ve yüksek tork, dişli kutusuyla jeneratör için kullanılan yüksek hız, düşük tork gücüne dönüştürülür. Genellikle rotorun dönüşüyle jeneratör arasında, tek bir dişli oranı vardır. 600 ya da 750 kW'lık bir makine için, iletim oranı yaklaşık olarak 1/50'dir[10].

b. Rotor

Rotor (pervane); gelen rüzgar hareketini, shaft vasıtasıyla dişli kutusuna, oradan da jeneratöre gönderen en dış birimdir. Rotor kanadından etkiyen rüzgar, kanadın gövdesine ve rotorun merkezine doğru hareketlendikçe, daha dik bir açıdan gelir. Eğer rotor kanadı çok dik bir rüzgar geliş açısı etkisinde kalırsa, rüzgarın kanadı kaldırma kuvveti azalır ve sıfırlanır. Bu nedenle, rotor kanadı burulmak zorundadır ve kanadın arka ucu esen rüzgarla aynı yöne doğru itilir. Şekil 1.6'da görülen

modern rüzgar türbin rotor kanatlarının çoğu GRP (glass fibre reinforced plastics) yani cam elyaf plastikten yapılır. Diğer kullanılan malzeme ise karbon fiber veya aramid olabilir. Ancak bunlar, büyük türbinler için ekonomik değildir [10].



Şekil 1.6 : Tipik bir türbin pervanesinin görünümü [10]

Çelik veya alüminyum karışımlarının ağırlık ve yorulmadan kaynaklanan problemleri olmakla beraber küçük türbinler için günümüzde kullanılmaktadır.

c. Yaw mekanizması

Rotorun rüzgara dik olmadığı durumlarda rüzgar türbinin bir yaw (rotadan çıkma) hatasına sahip olduğu söylenir. Bir yaw hatası, rüzgardaki enerjinin düşük bir kısmının rotor alanına doğru akmasını ifade eder. Yaw kontrolü, rüzgar türbin rotorunun güç giriş kontrolünün en iyi yoludur. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin çoğunda yaw döndürme mekanizması kullanılır. 750 kW'lık tipik bir türbinin yaw mekanizması Şekil 1.7 'de verilmiştir. Şekil 1.7 incelendiğinde şeklin en dışında yaw taşıyıcısı görülüyor. Daha içte yaw motoru tekerlekleri ve en içte yaw frenleri bulunur. Genellikle tüm üreticiler frenli yaw sistemlerini tercih eder.

Yaw mekanizması, rüzgar vanasını kullanarak rüzgar yönünü belirleyen elektronik kontrolcü tarafından işletilir. Rüzgar yönü değiştiği zaman, normal olarak o anda yaw sadece bir kaç derece kadar olacaktır. Yaw mekanizmasında rüzgara karşı nacelle ile rotoru döndürmek için elektrik motorları kullanır. Bu sistem yaw konumunu saniyede birkaç kez kontrol eder. Konum verileri rüzgar gülünden elde edilen yön bilgileri ile karşılaştırılıp yaw mekanizmasına gerekli komut verilir.



Şekil 1.7 : Yaw mekanizması [10]

d. Jeneratör

Rüzgar türbininin ürettiği mekanik enerjiyi minimum kayıpla elektrik enerjisine dönüştürmek için, farklı hız ve çıkış kombinasyonları kullanılmaktadır. Rüzgar türbinlerinde üç çeşit jeneratör kullanılmaktadır.

- Doğru akım jeneratörü,
- Senkron jeneratör,
- Asenkron jeneratör.

Küçük güçlü sistemlerde eskiden çok kullanılan doğru akım (d.a.) jeneratörü, günümüzde yerini genellikle senkron veya asenkron jeneratörlere bırakmıştır. Bu jeneratörler, konverterler yardımıyla kolayca doğru akımı alternatif akıma dönüştürebilen güç elektroniği elemanları ile birlikte çalışmaktadırlar. Senkron ve asenkron jeneratörler daha çok orta ve büyük güçlü sistemlerde yaygın olarak kullanılırlar [11].

e. Platform ve kule

Sistemin mekanize bölümlerinin tümünü üzerinde bulunduran platform, çelik konstrüksiyondan ve gürültü kirliliğini azaltmak amacıyla ses izolasyonlu olarak imal edilmektedir. Platformun kütlesi üzerindeki aksamlarla birlikte 12-82 ton arasında değişebilmektedir. Platform bir mil vasıtası ile konik veya bilyeli radyal rulmanlarla kuleye, çevresinde dönebilecek şekilde yaltaklandırılır. Kule yüksekliği rüzgar hızına etkili bir faktör olduğundan tasarımının hem çevrim sisteminin gücüne hem de mukavemetine göre yapılması gerekmektedir. Kule, sistem büyüklüğüne göre çelik koni boru, çelik kafes, çelik silindir, beton konik boru ya da silindir biçiminde imal edilebilmektedir. Kule yükseklikleri 70 m'ye dek

ulaşabildiğinden, kafes kulelerin dışındaki konstrüksiyonlar iki ya da üç parçalı olabilmektedir. Kafes kuleler görüntü kirliliği nedeni ile pek tercih edilmezler. Rotor 3-26 ton, gövde 10-56 ton ve kule ağırlığı 12-88 ton arasında değişmektedir. Türbin gücü, rüzgar hızının, süpürme alanının ve güç faktörünün fonksiyonudur. Rüzgar hızı yükseklikle arttığından, aynı çaplı bir rüzgar rotorunun daha yüksek kuleye yerleştirilmesi ile elde edilebilecek güç artmakta ise de, kule ağırlığının ve maliyetin artması bir sınır koymaktadır [10].

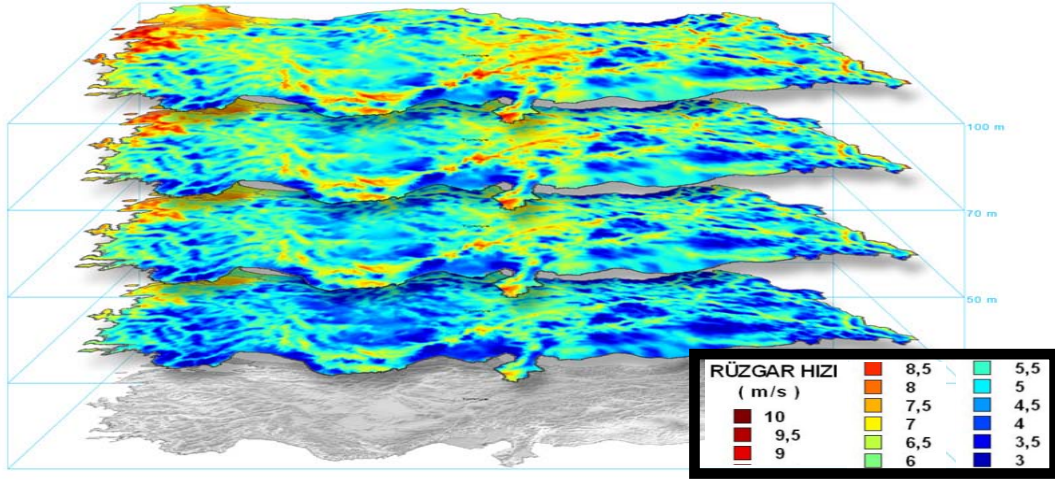
1.2. Rüzgar Enerjisinin Türkiye Ve Dünyada Kullanımı

Ülkemizde bugünkü teknik koşullarda ortalama 7 m/s hızda, yolda 2.500 saat kullanma süresi ile kurulabilecek ekonomik rüzgar potansiyeli EIE tarafından hazırlanan *Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA)* da 48.000 MW yani 120 milyar KWh düzeyinde olarak hesaplanmıştır [12].

REPA, Türkiye rüzgâr kaynaklarının karakteristiklerini ve dağılımını belirlemek amacıyla EIE tarafından 2006 yılında üretilmiştir. Bu atlasta verilen detaylı rüzgâr kaynağı haritaları ve diğer bilgiler rüzgâr enerjisinden elektrik üretimine aday bölgelerin belirlenmesinde kullanılabilecek bir alt yapı sağlamaktadır.

Ülkemizde rüzgar enerjisinden elektrik elde etme amacına yönelik çalışmalar 1990'lı yılların hemen başında başlanmışsa da, daha çok teorik çalışmalar seviyesinde kalmıştır. Bununla beraber, esas gelişme 1996 yılından itibaren başlamıştır. Birçok özel sektör firması konu ile ilgili yatırımlara başlamıştır ve hemen hemen ülkemizin tamamında ölçümler yapılmıştır. İlk rüzgar elektrik santrali, 1997 yılında devreye girmiştir. Ülkemizde 4628 Sayılı Kanun ile beraber serbest elektrik piyasası modeline geçilmiştir.

Enerji üretimi için minimum rüzgar hızı 6-7 m/s olarak belirlenmiştir. Yıllık ortalama değerler esas alındığında, Türkiye'nin en iyi rüzgâr kaynağı alanları kıyı şeritleri, yüksek bayırlar ve dağların tepesinde ya da açık alanların yakınında bulunmaktadır. Açık alan yakınındaki en şiddetli yıllık ortalama rüzgâr hızları Türkiye'nin batı kıyıları boyunca, Marmara Denizi çevresinde ve Antakya yakınında küçük bir bölgede meydana gelmektedir. Türkiye geneli farklı yükseklikteki ortalama yıllık rüzgar hızları dağılımı Şekil 1.8'de verilmiştir.



Şekil 1.8: Türkiye geneli farklı yükseklikteki ortalama Yıllık Rüzgar Hızları Dağılımı

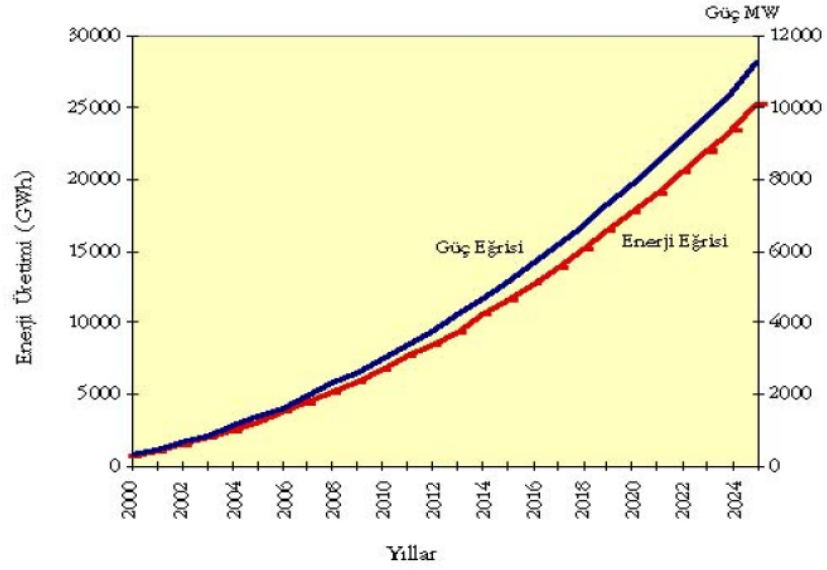
Türkiye, Avrupa'ya oranla muazzam rüzgar enerjisi potansiyeline sahiptir. Öyle ki; teorik olarak Türkiye'nin elektrik ihtiyacının tamamı rüzgar enerjisiyle karşılanabilir. Türkiye'nin elektrik enerjisi üretimi için yaklaşık olarak ihtiyacı olan 83000 MW rüzgar enerjisinin tamamı Marmara, Ege, Bozcaada, Gökçeada ve Sinop ve İskenderun çevrelerindeki rüzgar enerjisi potansiyeliyle karşılanabilir. Şuan da Türkiye'de toplam kurulu güç Çizelge 1.1'de de görüleceği gibi 884 MW' dır [13;14].

Çizelge 1.1: İşletmedeki Lisanslı Rüzgar Santralleri

İşletmedeki Lisanslı Rüzgar Santralleri		
Mevkii	Şirket	Kurulu Güç (MW)
İzmir-Çeşme	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	1,50
Çanakkale-İntepe	Anemon Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	30,40
Manisa-Akhisar	Deniz Elektrik Üretim Ltd. Şti.	10,80
Çanakkale-Gelibolu	Doğal Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	14,90
Manisa-Sayalar	Doğal Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	34,20
İstanbul-Çatalca	Ertürk Elektrik Üretim A.Ş.	60,00
İzmir-Aliağa	İnnores Elektrik Üretim A.Ş.	42,50

İstanbul-Gaziosmanpaşa	Lodos Elektrik Üretim A.Ş.	24,00
İzmir-Çeşme	Mare Manastır Rüzgar Enerjisi Santralı San. ve Tic. A.Ş.	39,20
İstanbul-Hadımköy	Sunjüt Sun'i Jüt San. ve Tic. A.Ş	1,20
Balıkesir-Bandırma	Yapısan Elektrik Üretim A.Ş.	30,00
Balıkesir-Şamlı	Baki Elektrik Üretim Ltd. Şti.	90,00
Muğla-Datça	Dares Datça Rüzgar Enerji Santralı Sanayi ve Ticaret A.Ş.	29,60
Hatay-Samandağ	Deniz Elektrik Üretim Ltd. Şti.	30,00
Aydın-Didim	Ayen Enerji A.Ş.	31,50
Çanakkale-Ezine	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	20,80
Balıkesir-Susurluk	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	18,90
Osmaniye-Bahçe	Rotor Elektrik Üretim A.Ş.	95,00
İzmir-Bergama	Ütopya Elektrik Üretim Sanayi ve Ticaret A.Ş.	15,00
İzmir-Çeşme	Mazi-3 Rüzgar Enerjisi Santrali Elektrik Üretim A.Ş.	22,50
Balıkesir-Bandırma	Akenerji Elektrik Üretim A.Ş.	15,00
Balıkesir-Bandırma	Borasco Enerji ve Kimya Sanayi ve Ticaret A.Ş.	45,00
Manisa-Soma	Soma Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	49,50
Hatay-Belen	Belen Elektrik Üretim A.Ş.	30,00
Tekirdağ-Şarköy	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	28,80
İzmir-Urla	Kores Kocadağ Rüzgar Enerji Santralı Üretim A.Ş.	15,00
Balıkesir-Bandırma	As Makinsan Temiz Enerji Elektrik Üretim San. ve Tic. A.Ş.	24,00
Mersin-Mut	Akdeniz Elektrik Üretim A.Ş.	33,00
KAPASİTE TOPLAMI		883,15

Rüzgar enerjisi için saptanan hedefler, Avrupa Birliği dahil olmak üzere, tüm dünyada dinamik değişim göstermektedir. Başlangıçta Avrupa Birliğinin rüzgardan, 2005 yılı elektrik üretimi için hedeflediği %2'lik pay, ülkemizde Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığınca benimsenmiş, ancak ETKB APK Kurulu ve TEAŞ APK Dairesi tarafından rüzgar enerjisinin bir kaynak olarak değerlendirilmesi, 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı (BYKP) ile olmuştur. Bu planlama çerçevesinde Şekil 1.9'da Türkiye için önerilen rüzgar kurulu gücü ve enerji üretiminin yıllara göre projeksiyonları oluşturuldu.



Şekil 1.9 : Türkiye için önerilen rüzgar kurulu gücü ve enerji üretimi

Çizelge 1.2 : Türkiye'de oluşturulması önerilen rüzgar kurulu gücü ve rüzgar enerjisi üretimi.

Yıl	Güç Kurulu (MW)	Ortalama Üretim (GWh)	Arzdaki payı (%)
2000	300	675	0.5
2005	1 359	3 058	1.53
2010	2 979	6 703	2.31
2015	5 142	11 570	2.91
2020	7 849	17 660	3.23
2023	9 733	21 900	3.43

Avrupa' da ;

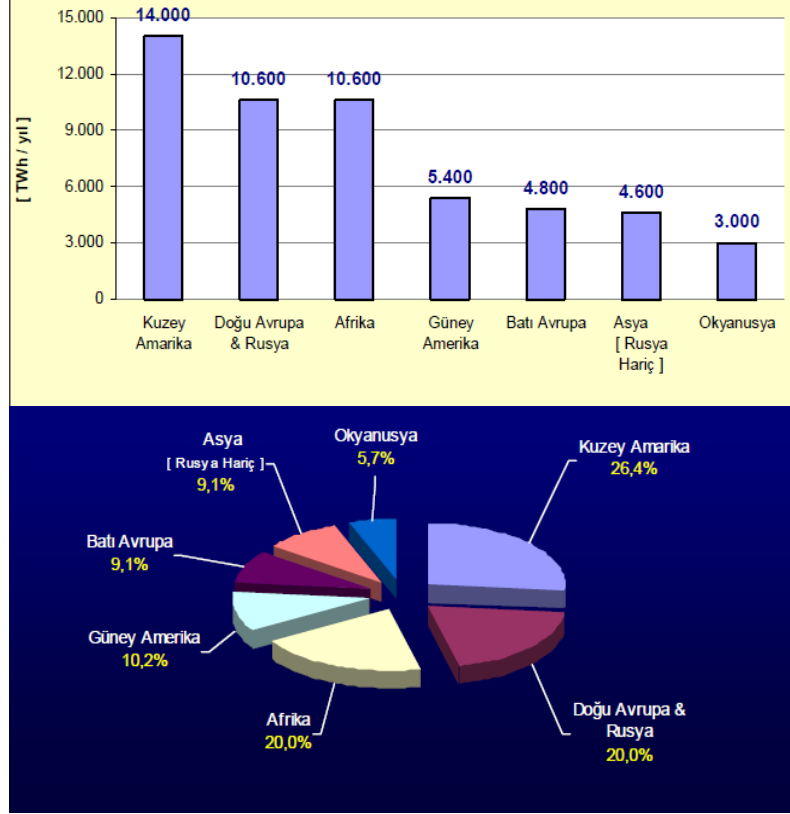
Avrupa Birliği Ülkeleri, rüzgar enerjisi başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranlarının artırılmasına yönelik hedeflere odaklanmıştır. Avrupa'daki ve diğer bölgelerdeki ülkeler bu hedefleri tutturabilmek için çeşitli piyasa destek yöntemlerini benimsemişlerdir. Bu ülkeler, üretilen birim enerji başına prim ödenmesinden, özel tarifeler uygulanmasına, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan elektrik santrallerine vergi teşviki ve sübvansiyondan enerji üreticilerinin enerji arzlarının gittikçe artan bir yüzdesini yenilenebilir kaynaklardan elde etmeye zorunlu olmasına kadar dayanan bir takım yöntemlerden faydalanmışlardır. 2009 yılı içerisinde de Avrupa'da rüzgar enerjisi kullanımı artarak devam etmiştir. Almanya liderliğini korumuştur ve İspanya hemen onu takip etmektedir. İtalya ve Fransa'da kullanımı ise gittikçe artmaktadır. AB'ye yeni üye olan ülkeler RES kullanımında henüz istenilen seviyede değildir. Orta ve Batı Avrupa Ülkeleri, Doğu Avrupa Ülkelerine doğru yönelmektedir. Avrupa'daki 4 ana ülke ise, Almanya ve İspanya başta olmak üzere Fransa ve İtalya'dır. Ayrıca deniz üstü (offshore) RES kurulu gücü de 2061 MW olup Avrupa'daki toplam kurulu güç olan 76,152 MW içerisinde %2.7 orana sahip olmakla beraber, deniz üstü RES projelerinin önümüzdeki yıllarda artacağı tahmin edilmektedir. Çizelge 1.3 ile AB Ülkelerindeki 2009 sonu itibarı ile olan kurulu güçler görülmektedir. AB Ülkelerinde 2008 yılı sonu 65,741 MW kurulu gücün üzerine, 2009 yılında 10,526 MW kurulu güç eklenerek toplam kurulu güç 76,152 MW olmuş ve sektör %16 yıllık büyüme gerçekleştirmiştir [14].

Çizelge 1.3 : AB Ülkelerindeki 2009 sonu itibarı ile olan kurulu güçleri

ÜLKELER	2008 Sonu Kurulu Güç (MW)	2009 Yılı Eklenen Güç (MW)	2009 Sonu Kurulu Güç (MW)
Almanya	23,903	1917	25,777
İspanya	16,689	2459	19,149
Danimarka	3163	334	3465
Hollanda	2225	4	2229
İtalya	3736	1114	4850
İngiltere	2974	1077	4051
Avusturya	995	0	995
İsveç	1048	512	1560
Yunanistan	985	102	1087
Portekiz	2862	673	3535
Fransa	3404	1088	4492
İrlanda	1027	233	1260
Belçika	415	149	563
Polonya	544	181	725
Finlandiya	143	3	146
Litvanya	54	37	91
Letonya	27	1	28
Luxembourg	35	0	35
Çek Cumhuriyeti	150	44	192
Slovakya	3	0	3
Estonya	78	64	142
Macaristan	127	74	201
Bulgaristan	120	57	177
Romanya	11	3	14
Avrupa Toplam	65,741	10,526	76,152
Denizüstü Kısmı	1479	582	2061

Dünya'da ;

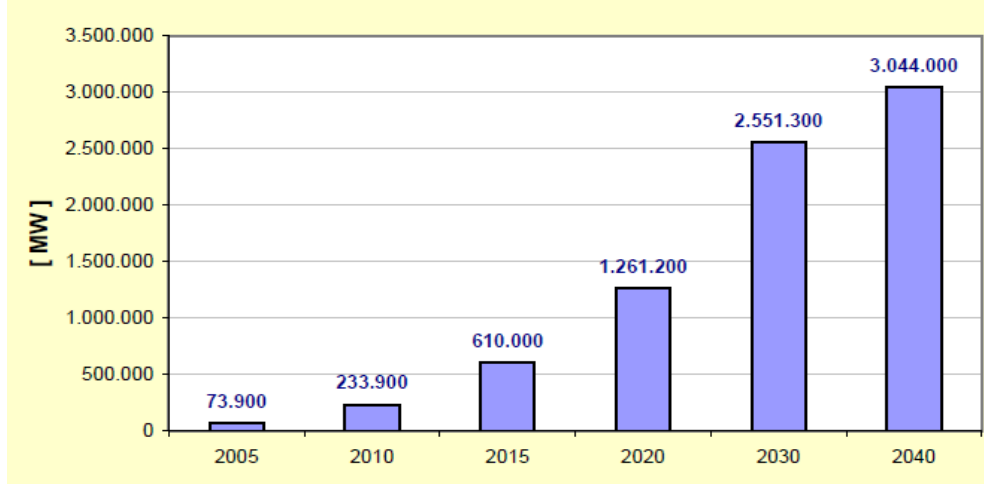
Grubb ve Meyer tarafından yapılan ve “ IEA – Word Energy “ tarafından yayınlanmış çalışmada, 5.1 m /s üzerinde Rüzgar kapasitesine sahip bölgelerin, uygulamaya dönük ve toplumsal kısıtlar nedeni ile % 4 'ün kullanılacağı esasına dayalı çalışmada, Dünya potansiyeli 53.000 TWh / yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değerın Dünyadaki dağılımı , Şekil 1.10'da verilmektedir.



Şekil 1.10 : Dünyanın teknik rüzgar potansiyel dağılımı

Yukarıda belirtilen , Teknik Potansiyel [53.000 TWh / yıl] ' in , 2020 yılı için tahmin edilen Dünya tüketiminin 25.900 TWh / yıl civarında olacağı düşünülünce, ne denli ciddi olduğu görülmektedir.

Şekil 1.11'i incelediğimizde 2001 yılında 24.700 MW olan Rüzgar Kurulu Gücünün 2007 yılında 120.600 MW 'ye yıllık % 25 'lik bir artışla yükseleceği, daha sonra bu artış oranının düşerek , kurulu gücün 2020 yılında 1.261.158 MW 'ye çıkacağı , bu tarihten sonra sıfır artış hızı ile [yılda sabit 150.000 MW Kurulu Güç ilavesi ile] 2030 yılında 2.551 GW , 2040 yılında 3.044 GW Kurulu Güce ulaşılacağı hedeflenmiştir. Bu tarihte , Rüzgar Enerjisi kullanımında doyum noktasına gelineceği varsayılmaktadır. Ayrıca , 20 yıl olarak tahmin edilen türbin ömürlerinin sonunda % 5 'inin yeni teknolojiye dayalı türbinler ile değiştirileceği düşünülmektedir.



Şekil 1.11 : Dünya rüzgar enerjisi kurulu güç hedefi

Dünyada rüzgar enerjisi konusunda asıl büyüme oranın, Kuzey Avrupa, ABD ve Japonya'da denizsel kapasitelerde olacağı tahmin edilmektedir. Bu potansiyelin, özellikle ABD ve Japonya'da oluşmakta olan elektrik enerjisi talebinin, iki katına yakın [% 180] potansiyel içerdiği hesap edilmektedir [15].

1.3. Literatür Araştırması

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar türbini teknolojileri her gün daha da gelişmektedir. Türbinlerin aerodinamik performansında ki gelişmeler, farklı rüzgar hızları, kanatta ki ayrılmaların geciktirilmesi, kaldırma kuvvetinin artırılması ve C_L/C_D oranının artırılması üzerine çalışmalar daha da önem taşımaktadır. Fakat bu çalışmalar belirli zorluklara sahiptir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin sağladığı en büyük avantaj, bu rüzgar türbinlerin imal etmeden testlerin sanal ortamda hızlı bir şekilde yapılmasıdır. Bu da hem maliyet hem de süre açısından büyük tasarruf sağlamaktadır. Bu yöntemin sağladığı diğer bir avantaj ise, elde edilen sonuçların görsel olarak bilgisayar ortamında sunulmasıdır. Pratikte deneysel yöntemler ile izlenemeyen akışlar, HAD yöntemi kullanılarak rahatlıkla görülebilir. Bu yüzden kendi çözümlerimi yaparken HAD programı Fluent ve Gambit kullanıldı. Bunun için daha önce yapılan çalışmalar incelendi ve referans alınarak çalışma planlandı.

1.3.1. Rüzgar türbin kanatları konusunda yapılan çalışmalar

Shan ve arkadaşları [16] yaptıkları çalışmada 4^0 hücum açısında ve 100.000 Re sayısında NACA0012 profili etrafındaki akış ayrılması, girdaplar, türbülans ve sınır tabaka için sayısal benzeşim yapmışlardır. Girdaplardaki serbest kayma tabakası ile Kelvin-Helmholtz değişkenine katkıda bulunmuşlardır.

Hamdani ve Sun [17], NACA0012 kanat profilinin kararsız hareketi ve düşük Reynolds sayılarında aerodinamik kuvvetleri ve akış yapısını Navier-Stokes denklemleriyle çözmüşler ve profilin kararsız hareketi sonucu kanat profilinin serbest akım bölgesindeki hızının artması ve azalmasını incelemiştir. Sonuçta bu çalışma, düşük Re sayılarında kanat profilinin bir hızdan diğer bir hıza aniden hızlanmasının büyük aerodinamik kuvvetleri doğurduğunu göstermiştir.

Genç ve arkadaşları [18;19] , düşük Re sayılı türbülansa geçiş akışında kanat profili etrafındaki akış ve bu akışın hücum kenarı slatı kullanılarak kontrolü konusunu deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır ve deneysel verilere yakın sonuçlar elde etmişlerdir.

Wright ve arkadaşları [20], mümkün olan maksimum güç elde etmek amacıyla dikkat etmeniz gereken şey, küçük rüzgar türbini kanatları mümkün olan en düşük rüzgar hızında dönmesi ile başlamaktır. Üç kanatlı, 2 m çapında yatay eksen türbini ile başlangıç performansı saha testleri ölçüldü. Yapılan türbin hesapları bir kanat element analizi ile karşılaştırılmıştır. Türbin döndürmek için rüzgar hızı 10-dk ortalamaları esas alınarak performans başlayan açıklayan geleneksel yöntemde sınırlamaları gösteren önemli ölçüde ki farklı değerler hız ve türbin güç rotor başlar ve sona erer belirlendi. Ürün yelpazesini için, yüksek açılarla interpolasyonlar yapılarak kanat veri ve kaldırma ve sürüklenme için genel denklemleri bir arada kullanılarak yapıldı.

Yıllardır flap ve slatların değişik konfigürasyonları yüksek taşıma elde etmek için tasarlanmıştır ve yüksek taşıma aygıtları düşük hızlarda kanattan elde edilen azami kaldırmayı arttırmak için aktif olarak kullanılmaktadır. Fakat bu araçların hava araçlarının ve kullanıldığı alanlarda ki diğer sistemleri üzerinde olumsuz etkileri mevcuttur. Düşük hızlarda tutunma kaybı olmadan daha yüksek azami

taşıma elde etmek için kanat şeklini düzeltmek ve sınır tabaka ayrılmasından kaçınmak gereklidir. Bu nedenle araştırmalar sınır tabaka ayrılmasını tahmin etme metotları geliştirme üzerine yoğunlaşmıştır.

Yüksek hücum açılarında tutunma kaybı oluşumu kanat seklinin iyileştirilmesi veya hücum kenarı slatları ve firar kenarı flapları gibi yüksek taşıma araçları ile geciktirilebilir. Bu alanda modern deneysel ve sayısal yaklaşımlar kullanılarak gelişmeler elde edilmektedir.

Tang ve Dowell [21] sayısal olarak NACA0012 profil için küçük firar kenarı şeritlerinin ve Gurney flaplarının 1×10^5 ve 2×10^5 Re sayılarında zamandan bağımsız ve zamana bağlı akışa etkisini araştırdı. Deneysel verilere uygun sonuçlar elde ettiler ve azami taşıma katsayısı ve tutunma kaybı açısını hem statik hem de dinamik akış için geliştirdiler.

Jang ve arkadaşları de [22], NACA 4412 kanat profiline eklenen Gurney flapın etkisini hem deneysel hem de sayısal olarak araştırdılar. Sonuçta bazı Gurney flapların kanat profili kaldırma katsayısını ve az miktarda sürüklenme katsayısını arttırdığı görüldü.

Reckzeh [23] ise *Megaliner* isimli yüksek kaldırma kanadı için yeni aerodinamik tasarım sunmuştur. Bu çalışmada, burun kısmında hücum kenarı slatları ve tek slotlu kayan firar kenarı flaplarından oluşan bu yüksek kaldırma kanadı en az karmaşık sistemle gerekli performansı sağlamıştır.

Genç ve arkadaşları [24], simetrik flaplı NACA0012 kanat profili üzerindeki aerodinamik kuvvet ve basınç dağılımları hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı FLUENT™ ile analiz edilmiştir. Hesaplamalar, farklı uzunluk (δf) ve farklı açılara sahip (β) flaplar için gerçekleştirildi. Hesaplamalar sonucunda, flaplı kanatların kullanımı ile aerodinamik performansın arttığı, fakat bu artışın $\beta=15^\circ$ 'ye kadar daha verimli olduğu 15° 'den büyük açılarda sürüklenme katsayısının artması ile L/D oranının düştüğü görüldü.

Düşük Re sayılarında hava araçları için yüksek hücum açılarında kritik hava hızlarında kanat profili üzerinde laminer ayrılma kabarcığı oluşturan türbülansa geçiş akışları mevcuttur. Bu ayrılma kabarcıklarını geciktirme, yok etme veya

kontrol etme hava aracı tasarımının önemli bir konusu olup ölçme, benzeşim yapma ve ön tahminde bulunma zor bir araştırma konusudur. Akış kontrolünün amacı bir akış durumunda küçük enerji girişi ile taşımayı arttırmak, sürüklemeyi azaltmak, akım gürültülerini azaltmak, türbülansa geçişi geciktirmek, ayrılmayı önlemek ve türbülansı kontrol altına almaktır. Günümüzde aerodinamik performansı arttırmak için flap ve slatların kullanımının yanında yeni teknikler de geliştirilmektedir. Özellikle bu denemeler HAD yardımıyla yapılan iyileştirme çalışmalarıdır.

Shan ve arkadaşları [25], 6° hücum açısında NACA0012 kanat profili üzerindeki ses altı akım ayrılmasını ve girdap üretici kullanarak bu ayrılmanın kontrolünü araştırmışlardır. Onlar kontrolsüz tek kanadı, pasif girdap üreticili akış kontrolü ve aktif girdap üreticili akış kontrolü olmak üzere üç çalışmayı incelediler ve ortalama ayrılma bölgesinin büyüklüğünün % 80'den daha fazla azaldığını gördüler. Ayrıca aktif girdap üretici ile akış kontrolünün daha efektif olduğu ve ayrılma bölgesini yaklaşık olarak yok ettiği sonucuna vardılar.

Huang ve arkadaşları [26;27], 5×10^5 Re sayısında 18° hücum açısında NACA0012 kanat profili üzerindeki akışın emme ve üfleme sistemi ile kontrolünü çalıştırdılar ve taşımanın arttığı ve sürüklemenin azaldığını gösterdiler.

Munday ve arkadaşları [28] kavisli salınım yapan kanadın ayrılmasının aktif kontrolü isimli çalışmalarında NACA4415 profilini 2.5×10^4 ve 5×10^5 Re sayılarında 9° yukarı ve 9° aşağı salınım hareketi verdirilerek ayrılmanın oluşumunu incelemişlerdir. İnceleme sonucunda ayrılma bölgesinde küçülme ve taşıma/sürükleme (L/D) oranında artış elde etmişlerdir.

1.3.2. Hidrokinetik enerji konusunda yapılan çalışmalar

Baraj ve arkadaşları [29]; bir türbin çeşidinin, kavitasyon tüneline ve test tankı içinde değişik hidrodinamik koşulları altında güç ve itki testini yaptılar. Bu test, türbinin gücü ve itki karakteristiği için rpm aralığı, akış hızını bulmayı sağlar. İkincil etken olan rotor derinliği ve rotadan sapma da ele alınacaktır. Bu ikincil etkenler, denizsel akıntı türbin dizaynı için ve kurulacak bölgedeki derinliği ve rotadan sapma akışını belirlemede etkili olacaktır.

Radespiel ve arkadaşları [30] deneysel ve sayısal olarak 60.000 Re sayısında SD7003 kanat profiline dalma (*plunge*) hareketinin etkisini araştırdılar. Bu Re sayısında PIV ile su ve hava tüneline yapılan deneyler sonucunda laminardan türbülansa geçiş esnasında laminar ayrılma kabarcığı meydana geldiğini gördüler ve sayısal benzeşimlerde bu ayrılma kabarcığını dalma hareketi varken ve yokken deneysel verilere yakın elde ettiler.

B. Kirke [31] su yoluna alınan su türbininden maksimum alınabilecek güç irdelenmiş ve bu yolla türbinden iyi sonuçlar alındığı, hatta normal türbinlere göre 4 kat daha fazla güç çıkışı elde edilebileceğini belirtmiştir. Bu gücün fazla olması, yol boyunca basınç farklılıklarına ve hacimsel akışa bağlı olduğunu belirtmiştir.

Myers ve arkadaşları [32] 1:30 kere küçültülmüş 0.4 m. çapındaki nehir akıntı türbini, nehre batırılma derinliğine bağlı olarak türbin performansı ve türbin arkası karakteristikleri, farklı su hızı ve itki katsayısında, dolaşımli bir su kanalında incelenmiştir. Su hızının artmasıyla, yüzey türbülansının arttığı ve rotor yanlarındaki hızın, akış hızından fazla olduğu gözlemlendi.

1.4. Tezin Amaç ve Kapsamı

Bu yüksek lisans tez çalışmada geleneksel olarak kullanılan rüzgar türbin kanat profillerinden farklı olarak slatlı bir rüzgar türbin kanadının sayısal olarak aerodinamik performans analiz yapılacaktır. Çalışma hem rüzgar(hava) hem de su ortamında gerçekleştirilecektir. Analizin su ortamında yapılmasındaki amaç üretilen slatlı kanatların hidrokinetik enerji alanında rüzgar türbini tipinde su türbini kanat profili olarak kullanması hedeflenmekte olduğundandır. Çalışmada rüzgar ve su ortamında maksimum kaldırma kuvveti ve C_L/C_D oranı elde etmek için gerekli optimum geometrik boyutlar, optimum hücum açısı ve optimum slat açılarını sayısal olarak ortaya koymaktır. Böylece elde edilen optimum değerler referans alınarak slatlı türbin kanat profilleri ortaya konulacak ve elde edilen sayısal sonuçlara uygun model üretilerek deneysel olarak da başka bir çalışma ile deneylere tabii tutularak elde edilen sayısal sonuçlar teyit edilecektir.

İkinci bölümde, rüzgar türbinlerinde kullanılan teoriler irdelendi. Üçüncü bölümde ise yapılan çalışmalardan bahsedildi. Burada, kullanılan kanat profili, aerodinamik

kuvvetler ve kanat benzeşimi ve boyutsal çözümlene yapıldı ve parametrelerimiz belirlendi. Son bölümde ise belirlenen parametreler ile kanattaki aerodinamik kuvvetler bulundu ve hem hava hem de su ortamındaki belirli hücum ve slat açılarındaki, kanatta oluşan basınç dağılımları ve konturları, hız konturları, akım çizgileri, türbülans şiddetleri belirlenerek sistemden ayrılmaları hesaplayarak vorteks kopma frekanslarının belirlendi.

2. RÜZGAR TÜRBİN TEORİLERİ

Türbin dizaynında kullanılan türbin teorileri,

- Momentum teorisi
- Kanat elemanı teorisi

olarak sıralanabilir. Her teori türbinlerde farklı bir etkiyi veya etkileri ihtiva etmektedir.

2.1. Momentum Teorisi

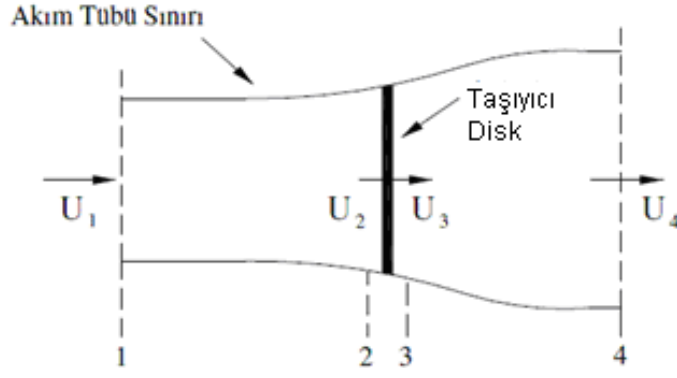
Bu teoride rüzgar türbini rotoru yada palası teorik olarak bir disk geometrisi olarak modellenerek, bir boyutlu momentum teorisi göz önüne alınana kontrol bölgesine uygulanır. Göz önüne alınan kontrol bölgesi Şekil 2.1. de verilmiştir.

Bu analizde

- Homojen, sıkıştırılmaz, daimi akım
- Sonsuz sayıda pala
- Sürtünme kaybı yok
- Dönme hareketi olmayan bölge
- Diskte veya rotor alanında üniform itme
- Diskten geçen akımın hızı sabit. ($U_2 = U_3$)
- Rotorun önünde ve arkasında, rotordan yeterince uzaktaki statik basınçlar, bozulmamış akımın basıncına eşittir.

kabulleri yapılmıştır.

Rüzgar türbini olarak, içinden geçen akımda basınç süreksizliğine sebep olan üniform bir taşıyıcı disk ile temsil edilmiştir.



Şekil 2.1 : Taşıyıcı disk [33]

Kontrol hacminde bir boyutlu momentumun korunumu prensibini uygulayarak, kontrol hacminde akım yönüne etkiyen net kuvvet ,

$$T = U_1(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4 \quad (2.1)$$

denklemlerle ifade edilir. Bu denklemde akımın kütle debisi, daimi akım için,

$$\dot{m} = (\rho \cdot AU)_1 = (\rho AU)_4 \quad (2.2)$$

tanımını kullanılarak, denklem

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (2.3)$$

halini alır.

Kontrol bölgesinde diske etki eden kuvvet basınç farkı kullanılarak:

$$T = A_2(p_2 - p_3) \quad (2.4)$$

Denklemlerle ifade edilir. Denklemdeki basınç farkı ($P_2 - P_3$) , 1-2 ve 3-4 noktaları arasında ayrı ayrı uygulanarak:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho U_2^2 \quad (2.5)$$

$$P_3 + \frac{1}{2} \rho U_3^2 = P_4 + \frac{1}{2} \rho U_4^2 \quad (2.6)$$

ve Rotorun önünde ve arkasında yeterince uzakta basınçlar eşitliği ($p_1 = p_4$) ve diskten geçen akım hızı sabit ($U_2 = U_3$) kabul edilerek, hesaplanıp denkleme taşınırsa:

$$T = \frac{1}{2} \rho A (U_1^2 - U_4^2) \quad (2.7)$$

elde edilir.(2.7) ve (2.3) denklemleri eşitlenecek olursa :

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (2.8)$$

bulunur.

Tanım: İndüksiyon faktörü, a : Serbest akım hızı ile rotor düzlemindeki hız arasındaki hız farkının serbest akım hızına oranına.:

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (2.9)$$

İndüksiyon faktörü denir.

Böylece, indüksiyon faktörü cinsinden

$$U_2 = U_1(1 - a) \quad (2.10)$$

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \quad (2.11)$$

yazılır.

İtke kuvveti indüksiyon faktörü cinsinden,

$$T = \frac{1}{2} \rho A U_1^2 4a(1 - a) \quad (2.12)$$

yazılabilir.

Eksenel indüksiyon faktörü sıfırdan büyük olduğunda, rotor arkasındaki rüzgar hızı daha küçüktür. Rotorun ürettiği güç P , itkinin diskteki hız ile çarpımına eşit olacaktır,

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A_2 (U_1^2 - U_4^2) U_4 = \frac{1}{2} \rho A_2 U_2 (U_1 + U_4) (U_1 - U_4) \quad (2.13)$$

(2.10) ve (2.11) eşitliklerindeki U_2 ve U_4 ifadeleri (2.13) eşitliğinde yerine koyulursa ;

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A_2 U_1^3 4a(1 - a)^2 \quad (2.14)$$

Tanım: Rotor Güç Katsayısı veya verim:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A_2 U_1^3} \quad (2.15)$$

denklemlerle tanımlanır. (2.14) denklemi kullanılarak güç katsayısı indüksiyon faktörü cinsinden

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A_2 U_1^3} = 4a(1-a)^2 \quad (2.16)$$

elde edilir.

Güç katsayısını maksimum yapan a değeri,

$$\frac{dC_p}{da} = 0 \rightarrow a = \frac{1}{3} \quad (2.17)$$

olarak elde edilir. Bu değer güç katsayısı denklemine taşınarak;

$$(C_p)_{\max} = 16/27 = 0.59 \quad (2.18)$$

elde edilir. Bu değer türbinin ulaşabileceği maksimum verimdir ve buna literatürde BETZ LİMİTİ denir.

Ayrıca türbine etki eden itki faktörü;

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A U_1^2} \quad (2.19)$$

tanımını kullanılarak

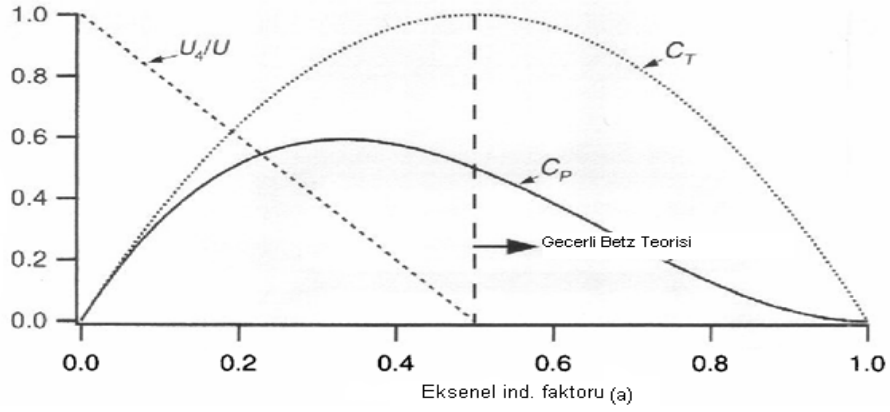
$$C_T = 4a(1-a) \quad (2.20)$$

elde edilir.

İtki katsayısını maksimum yapan a değeri,

$$\frac{dC_T}{da} = 0 \rightarrow a = \frac{1}{2} \quad (2.21)$$

olarak bulunur. Görüldüğü gibi güç katsayısını ya da verimi maksimum yapan a değeri ile itki katsayısını maksimum yapan a değeri birbirinden farklıdır. Güç faktörü ve itki faktörünün a ile değişimi aşağıda şekilde gösterilmiştir.



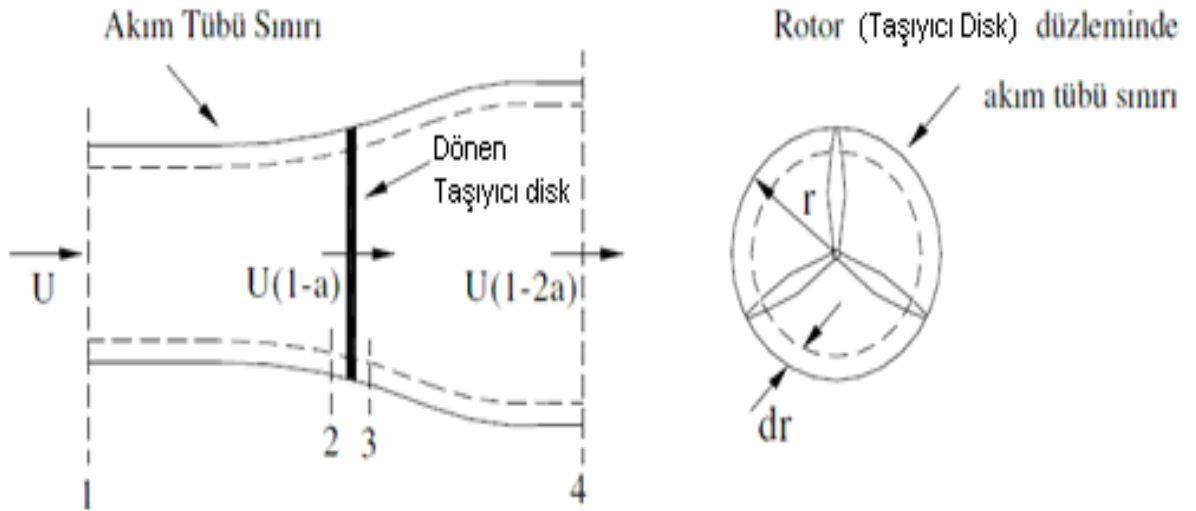
Şekil 2.2: Rotor arkasındaki hız ve aksel indüksiyon faktörüne göre değişen güç ve itki katsayıları

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi $a > 1/2$ için ; rotor arkasındaki rüzgar hızı sıfıra doğru gitmekte ve güç katsayısı bu değerden sonra düşüşe geçmektedir.

Dönme Hareketi Olan İdeal Türbin

Yukarıda verilen bir boyutlu momentum teorisi uygulamasında türbin rotorunun dönmediği varsayılmıştır. Ancak, gerçekte türbin rotoru sabit bir açısal hız ile dönmektedir. Bu dönme etkisini de ihtiva ederek aşağıdaki analiz yapılabilir.

Rotorun açısal hızıyla dönen r yarıçaplı dr kalınlığında bir akım tüpünü kontrol hacmi olarak alırsak, palanın ön ve arka iz bölgesindeki basınç farkı [33],



Şekil 2.3. Rotor akım tüpü [33]

$$(p_2 - p_3) = \rho(\Omega + \frac{1}{2}\omega)\omega r^2 \quad (2.22)$$

denkleminde bulunur. Burada türbinden geçen havanın aksel hızı sabit kalırken, palaya nazaran akışkanın açısal hızı ω rotorun açısal hızı Ω değerinden $\Omega + \omega$ değerine yükselecektir. Burada ω akışkanın rotordan geçerken kazandığı ilave açısal hızdır. Böylece halka elemanına etki eden itki;

$$dT = (p_2 - p_3)dA = [\rho(\Omega + \frac{1}{2}\omega)\omega r^2]2\pi r dr \quad (2.23)$$

olarak yazılabilir.

Tanım: Açısal indüksiyon Faktörü:

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (2.24)$$

tanımını kullanarak (2.23) denklemini:

$$dT = 4a'(1 + a')\frac{1}{2}\rho\Omega^2 r^2 2\pi r dr \quad (2.25)$$

halini alır.

İtki denklemi aksel indüksiyon faktörü a cinsinden (2.12) denkleminde

$$dT = 4a(1 - a)\rho U_1^2 \pi r dr \quad (2.26)$$

(2.25) ve (2.26) denklemlerini eşitleyecek olursak :

$$\left[\frac{a(1 - a)}{a'(1 - a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{U_\infty^2} = \lambda r^2 \right] \quad (2.27a)$$

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{U_1} \quad (2.27b)$$

uç hız oranı olarak tanımlanır. Rüzgar türbinlerinde uç hız oranı türbin performansını etkileyen önemli bir dizayn parametresidir. Rotora etki eden tork, açısal momentum korunumu prensibini kontrol bölgesine uygulayarak,

Rotora etkileyen tork, izdeki açısal momentum değişimine eşit olmalı. Halka şeklinde bir eleman için,

$$dQ = d\dot{m}(\omega r)r = (\rho U_2 2\pi r dr)(\omega r)r \quad (2.28)$$

yazılabilir. $U_2=U(1-a)$ ve $a'=\omega/2\Omega$ tanımları kullanılarak,

$$dQ = 4a'(1-a)\frac{1}{2}\rho U_1 \Omega r^2 2\pi r dr \quad (2.29)$$

Her bir elemanda üretilen güç dP şu ifade ile bulunabilir :

$$dP = \Omega d\tau \quad (2.30)$$

Bu denklemde $d\tau$ yerine koyulur ve yerel hız oranı ifadesi (2.27b) kullanılırsa:

$$dP = \frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot U_\infty^3 \left[\frac{8}{\lambda^2} a'(1-a)\lambda_r^3 d\lambda_r \right] \quad (2.31)$$

ve

$$dC_P = \frac{dP}{\frac{1}{2}\rho A U^3} = \left[\frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a)\lambda_r^3 d\lambda_r \right] \quad (2.32)$$

elde edilir.

Bu ifadenin integralinin alınabilmesi için a , a' , ve λ_r arasındaki ilişkilerin bilinmesi gerekir. (2.27a) denklemini çözüp a' ifadesini a cinsinden yazacak olursak :

$$a' = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{4}{\lambda_r^2} a(1-a)} \quad (2.33)$$

bulunur.

Maksimum güç üretimi, güç katsayısı ifadesindeki $a'(1-a)$ maksimum yapılırsa gerçekleştirilebilir. Elde ettiğimiz a' değerinin (2.32) denklemine taşıyıp $dC_P/da=0$ 'dan

$$\lambda_r^2 = \frac{(1-a)(4a-1)^2}{(1-3a)} \quad (2.34)$$

bulunur. Bu değer her açısız halkada maksimum güç için lokal uç hız oranını ifade etmektedir. (2.34) denklemini

$$\left[\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{U_\infty^2} = \lambda r^2 \right] \quad (2.35)$$

denkleminde taşıyarak elde edilen denklemden, her açısal halkada maksimum güç için ,

$$a' = \frac{1-3a}{4a-1} \quad (2.36)$$

denklemini elde edilir.

(2.34) denklemini türetilerek:

$$2\lambda_r d\lambda_r = [6(4a-1)(1-2a)^2 / (1-3a)^2] da \quad (2.37)$$

elde edilir. Yukarıda elde edilen denklemler güç katsayısı denkleminde taşınarak;

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^{\lambda} a' (1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (2.38)$$

$$C_{p,max} = \frac{24}{\lambda^2} \int_{a_1}^{a_2} \left[\frac{(1-a)(1-2a)(a-4a)}{(1-3a)} \right] da \quad (2.39)$$

denklemini elde edilir. Bu denkleminde a_1 (Lower limit) $\lambda_r=0$ için indüksiyon faktörünü, a_2 (upper limit) $\lambda_r=\lambda$ için gerekli indüksiyon faktörünü ifade etmektedir.

Örnek olarak (2.34)'den ;

$$\lambda_r^2 = \frac{(1-a)(4a-1)^2}{(1-3a)}$$

denkleminde a_2 için ;

$$\lambda^2 = (1-a_2)(1-4a_2)^2 / (1-3a_2) \quad (2.40)$$

yazılabilir ve a_1 için $\lambda_r=0$ için $a_1=0.25$ bulunur.

Yukarıdaki denklemden a_2 değeri için gerekli λ uç hız oranı hesaplanır ve (a)'nın maksimum değeri $a_2=1/3$ dür. $C_{p,max}$ değeri (1-3a) yerine x yazarak gerekli integrasyon yaparak ;

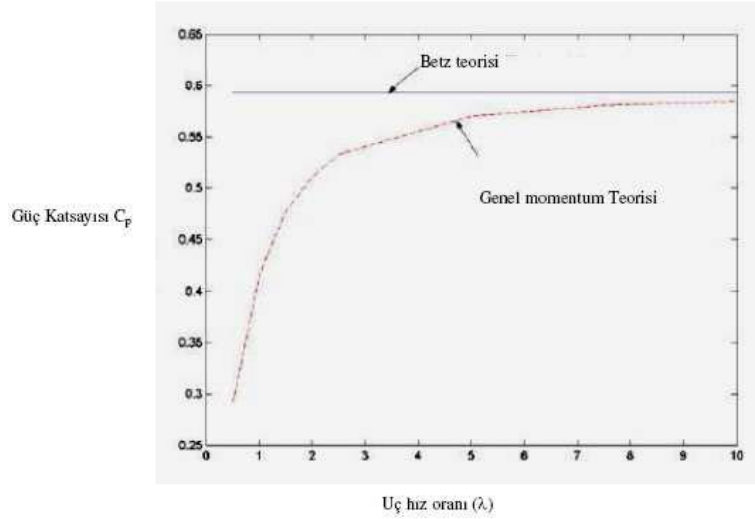
$$C_{p,max} = \frac{8}{729\lambda^2} \left\{ \frac{64}{5} x^5 + 72x^4 + 124x^3 - 38x^2 - 63x - 12[\ln(x)] - 4x^{-1} \right\}_{x=(1-3a_2)}^{x=0.25} \quad (2.41)$$

elde edilir. Bu denklem kullanılarak uç hız oranına göre $C_{p,max}$ ve uç noktadaki a_2 değerleri Çizelge 2.1 'de verilmektedir.

Çizelge 2.1 : Uç hız oranına göre $C_{P,max}$ ve uç noktadaki a_2 değerleri

λ	a_2	$C_{P,max}$
0.5	0.2983	0.289
1.0	0.3170	0.416
1.5	0.3245	0.477
2.0	0.3279	0.511
2.5	0.3297	0.533
5.0	0.3324	0.570
7.5	0.3329	0.581
10.0	0.3330	0.585

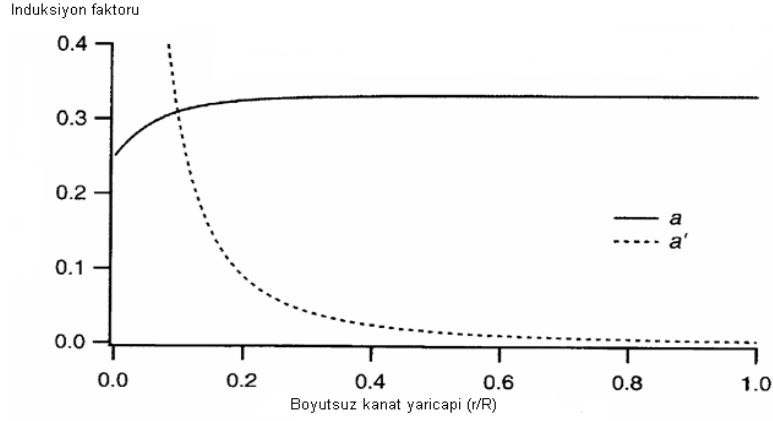
Bu değişim grafiksel olarak aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.4 : Uç hız oranına göre güç katsayısı [47]

Grafikten görüldüğü gibi rotasyon dikkate alındığında uç hız oranı yükseldikçe verim Betz limiti değerine doğru yaklaşmaktadır. $\lambda > 5$ için verim Betz limiti değerine yaklaşmaktadır.

(2.37) ifadesi her halkada maksimum güç üretimi için a' ve a arasındaki ilişkiyi verir. Bu ilişki optimum türbinin tasarımında doğrudan kullanılacak bir ifadedir.



Şekil 2.5: Kanat boyunca değişen aksel ve teğetsel indüksiyon faktörleri

(2.34) denklemi irdelenerek kanat boyunca değişen aksel ve teğetsel indüksiyon faktörleri Şekil 2.5'deki grafik ile gösterilmiştir. Sonuç olarak uç hız oranı arttıkça, maksimum güç katsayısının da arttığı görülmektedir [33].

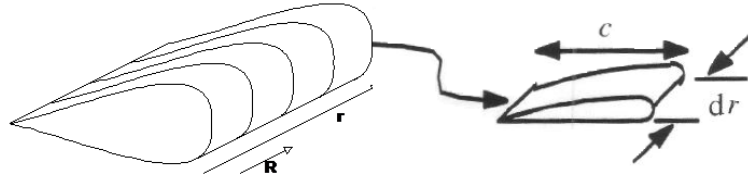
Bu bölümde kullanılan momentum teorisi türbini bir bütün olarak ele alarak akım tüpü içerisindeki rüzgar gücünden elde edilebilecek türbin gücünü vermektedir. Teori türbinde nasıl bir kanat profili kullanılması gerektiğini ortaya koymamaktadır. Kanat geometrisine göre kanada etki eden aerodinamik kuvvetler, ve her kanat kesitin de uç hız oranı $\lambda=(\omega r)/V$ değiştiğine göre maksimum performans için gerekli kanat kesit burkulma miktarları ancak kanat teorileri kullanılarak belirlenebilir.

2.2. Kanat Elaman Teorisi

Bu teori kanat geometrisine bağlı olarak kanada etki eden aerodinamik kuvvetleri ifade etmektedir.

Bir rüzgar türbininin kanatları üzerindeki kuvvetler, kaldırma ve sürüklenme katsayıları ile hücum açısının fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Bu teoriyi kullanarak analiz yapmak için Şekil 2.6'daki gibi kanat "n" eşit elemana bölünür ve aşağıdaki kabuller kullanılarak analiz yapılır.

- Elemanlar arasında aerodinamik etkileşim yoktur.
- Kanata gelen kuvvet sadece profil geometrisinin kaldırma ve sürüklenme özellikleri ile ilişkilidir.

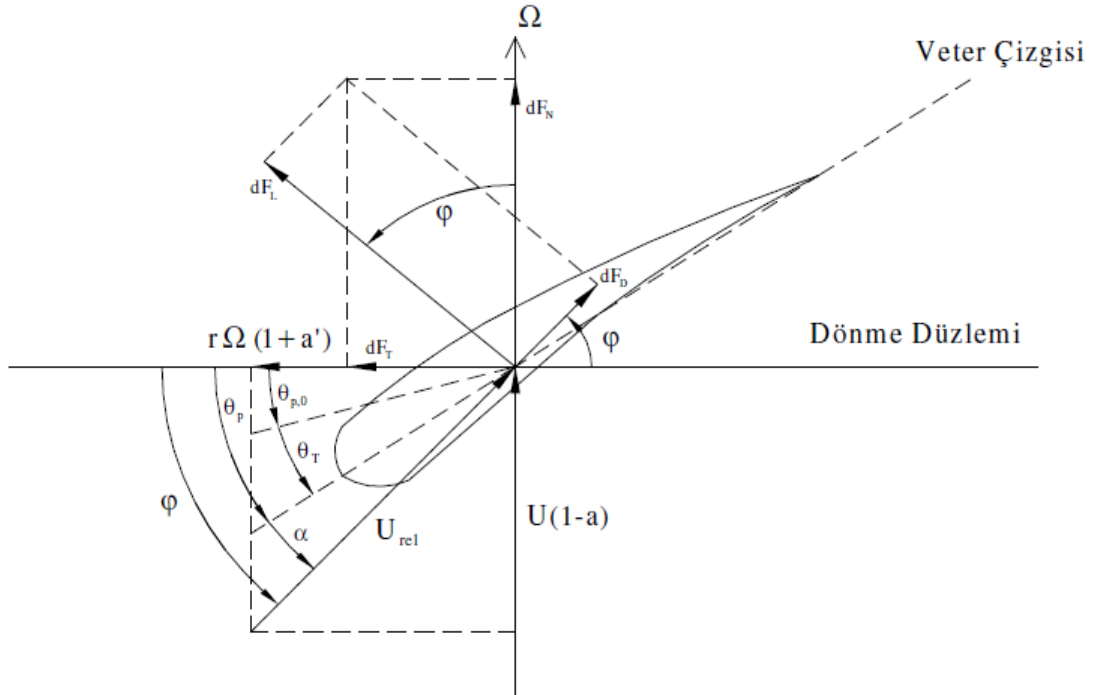


Şekil 2.6 : n adet bölüme ayrılmış kanat yarıçapı

Bir kanat r kesidinde akışkanın kazandığı dönmeden kaynaklı hız, rotorun dönmesinden kaynaklanan hız, Ωr hızı ile kanat elemanına göre kazanılan ilave hız (induced velocity) $(\omega/2r)$ hızlarının bileşkesi olacaktır. Kazanılan ekstra açılma hızı, ω değeri açısal momentum korunumu prensibi kanada uygulanarak bulunabilir [33].

$$\Omega r + \frac{\omega r}{2} = \Omega r + \Omega a' r = \Omega r(1 + a') \quad (2.42)$$

Bir kanada etki eden lift ve drag kuvvetleri bileşke hız referans alınarak belirlenir. Bileşke hıza paralel direnç kuvveti drag, dik olan kuvvete de lift denir. Aşağıda Şekil 2.7' de serbest akım ortamında dönen bir kanat profili ve ona etki eden kuvvetler ve geometrik boyutlar görülmektedir.



Şekil 2.7. Yatay eksenli bir türbinin analizi için pala geometrisi [33]

Burada,

$U(1-a)$ = kanada dik gelen rüzgar hızı

U_{REF} = Bileşke (İzafi)rüzgar hızı

θ_p = Kanat kesit pitch açısı(kanat genişliği çizgisi ve kanadın dönme düzlemi arasındaki açı)

α = Hücüm açısı

$\varphi = \theta_p + \alpha$ = bağıl rüzgar hızının geliş açısı

$\theta_{p,0}$ = Kanat uç pitch açısı

θ_T = Kesit burulma açısı (Bkz. Şekil 2.7)

Geometriden elde edilebilecek ifadeler şunlardır :

$$\tan \varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega \times r \times (1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r} \quad (2.43)$$

$$U_{rel} = \frac{U(1-a)}{\sin \varphi} \quad (2.44)$$

Kanada etki eden lift, drag, normal ve teğetsel kuvvetler

$$dF_L = C_L \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (2.45)$$

$$dF_D = C_D \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (2.46)$$

$$dF_N = dF_L \cos \varphi + dF_D \sin \varphi \quad (2.47)$$

$$dF_T = dF_L \sin \varphi - dF_D \cos \varphi \quad (2.48)$$

denklemleriyle ifade edilir. Bu kuvvetlerden Normal kuvvet kanada etki eden itki (thrust) kuvvetini üretir, teğetsel kuvvet ise kanada etki eden torku oluşturur.

Rotorun B adet palası var ise, göbekten r mesafedeki kesite etkiyen normal kuvvet :

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) c dr \quad (2.49)$$

Göbekten r mesafesi uzaklıkta etkiyen teğetsel kuvvetten kaynaklanan diferansiyel tork :

$$dQ = BrdF_T \quad (2.50)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) c r dr \quad (2.51)$$

olarak elde edilir.

Denklemden görüldüğü gibi kanada etki eden sürüklenme torku ve buna bağlı olarak da güç değerini azaltmaktadır. Buna karşın kanada etki eden normal kuvveti veya itkiyi artırmaktadır.

Böylece kanat elemanları teorisi iki denklem vermektedir. Bu denklemler itki kuvvet (Thrust) ve teğetsel kuvvet (tork) denklemleridir. Bu kuvvetler açısız hareket ortamında kanat akış açılarına ve kanat karakteristiklerine bağlıdır. Dönme olmadığı durumda maksimum güç için $a = 1/3$ değeri bulunmuştur. Aynı basitleştirici yaklaşım momentum ve kanat elemanları teorisine uygulayarak verilen bir hız oranı için maksimum performans için uygun kanat geometrisi belirlenebilir.

Örnek olarak;

$a' = 0$ (dönme yok)

$C_D = 0$ (sürüklenme yok)

Kayıplar yok,

$a = 1/3$ (Betz limiti geçerli)

λ uç hız oranı, kanat sayısı B ve kanadı seçilir. Kanat seçildiğine göre ilgili kanat için $C_L(\alpha)$ ve $C_D(\alpha)$ değerleri bellidir. Kanat için C_L/C_D değerinin maksimum olduğu hücum açısı seçilir. Bunun anlamı C_D yaklaşık olarak 0'dır. Daha sonra her r istasyonunda Betz limitini verecek şekilde kökten uca doğru burulma/veter (twist/chort) dağılımı belirlenir.

$a = 1/3$ için halka elemanında momentum teorisinden, itki

$$dT = \rho U^2 4 \left(\frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{3}\right) \pi r dr = \rho U^2 \frac{8}{9} \pi r dr \quad (2.52)$$

ve kanat elemanları teorisinden, $C_D = 0$ için,

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \cos \varphi) c dr \quad (2.53)$$

yazılır. Bağlı hız,

$$U_{rel} = U(1 - a) / \sin \varphi = \frac{2U}{3 \sin \varphi} \quad (2.54)$$

tanımı kullanılarak ve yukarıdaki iki denklem birleştirilerek,

$$\frac{C_L B c}{4\pi r} = \tan \varphi \sin \varphi \quad (2.55)$$

sonucu bulunur. Aşağıdaki tanımlar ve değerler alttaki eşitlik (2.43)'de

$$\tan \varphi = \frac{U(1 - a)}{\Omega \times r \times (1 + a')} = \frac{1 - a}{(1 + a')\lambda_r}$$

$a'=0$ ve $a=1/3$ için,

$$\tan \varphi = \frac{2}{3\lambda_r} \quad (2.56)$$

kullanılarak,

$$\frac{C_L B c}{4\pi r} = \left(\frac{2}{3\lambda_r} \right) \sin \varphi \quad (2.57)$$

elde edilir. $\lambda_r = \lambda(r/R)$ olduğunu dikkate alarak her kanat kesitinde(r noktasında) bağlı rüzgar açısı, φ ve veter uzunluğu c ,

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3\lambda_r} \right) \quad (2.58)$$

$$c = \frac{8\pi r \sin \varphi}{3B C_L \lambda_r} \quad (2.59)$$

denklemlerinden hesaplanır. Bu denklemler her kanat kesitinde Betz limit değerine uygun olarak veter (chort) ve burkulma (twist) dağılımını verir.

Örnek olarak, $\lambda=7$, $R=5$ m, $C_L=1.0$, $(C_L/C_D)_{max}$ değeri $\alpha=7^0$ de oluşmuş olsun. kanat sayısı $B=3$ olsun.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3\lambda_r} \right)$$

$$c = \frac{8\pi r \sin \varphi}{3B C_L \lambda_r}$$

$$\theta_T = \theta_p - \theta_{p,0}$$

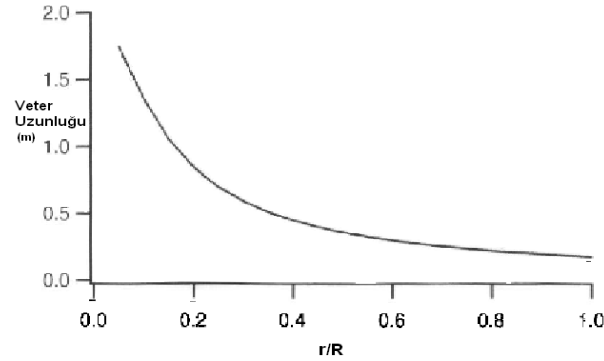
$$\varphi = \theta_p + \alpha$$

denklemlerini kullanarak ve kanat ucunda burulma (twist) açısının 0 olduğunu dikkate alarak kanat kökünden uca doğru veter (chort) ve burulma (twist) açı dağılımları ve diğer büyüklükler aşağıdaki Çizelge 2.2 'de verilmiştir.

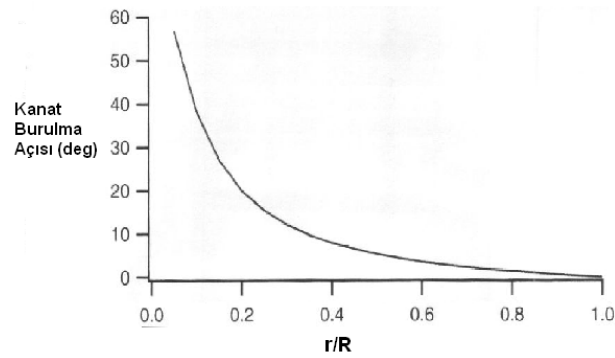
Çizelge 2.2 : Kanat kökünden uca doğru veter ve burulma açı dağılımları

r/R	Veter, m	Burulma Açısı (deg)	Bağıl rüzgar hızının geliş açısı (deg)	Kesit Burulma Açısı (deg)
0.1	1.375	38.2	43.6	36.6
0.2	0.858	20.0	25.5	18.5
0.3	0.604	12.2	17.6	10.6
0.4	0.462	8.0	13.4	6.4
0.5	0.373	5.3	10.8	3.8
0.6	0.313	3.6	9.0	2.0
0.7	0.269	2.3	7.7	0.7
0.8	0.236	1.3	6.8	-0.2
0.9	0.210	0.6	6.0	-1.0
1	0.189	0	5.4	-1.6

Şekil 2.8 ve 2.9 incelendiğinde kanat burulma açılarının ve veter uzunluğunun r/R oranına göre değişimleri görülmektedir.



Şekil 2.8 : Veter uzunluğunun r/R oranına göre değişimi



Şekil 2.9 : Burulma açısının r/R oranına göre değişimi

Kanat Performans Analizi

Bir rüzgar türbini kanadı genellikle 12 m/s rüzgar hızında dizayn edilir. Bu referans değerlerine göre kanat veter uzunluğu ve burulma açısı dağılımı belirlenir. Ancak, rüzgar hız veya dizayn şartları değişince kanatta belirlenmiş olan veter ve burulma dağılımı artık geçerli değildir.

Bu nedenle dizaynda ;

- Üretim kolaylığı,
- Rüzgar hızı ve çalışma devri dağılım aralığında optimum performans şartlarına yakın çalışma,

dikkate alınır.

Yukarıdaki bölümlerde kullanılan her iki teoride de bulunan kuvvetler ve momentler birbirine eşit olmalıdır. Bu denklemlerin eşitliği türbin dizaynında gerekli akım şartlarını belirler.

Momentum Teorisinden:

Eksenel Momentum teorisinden;

$$dT = 4a(1-a)\rho U^2 \pi r dr \quad (2.60)$$

Açısal Momentum teorisinden:

$$dQ = 4a'(1-a)\rho U \pi r^3 \Omega dr \quad (2.61)$$

Kanat Elemanı Teorisinden;

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) c dr \quad (2.62)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) c r dr \quad (2.63)$$

yazılabilir. Burada dQ ve dF_N kuvvetleri birbirine eşit kuvvetlerdir. Bağlı hız,

$$U_{rel} = U(1-a) / \sin \varphi$$

tanımı kullanılarak,

$$dF_N = \sigma' \pi \rho \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) dr \quad (2.64)$$

$$dQ_N = \sigma' \pi \rho \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) r^2 dr \quad (2.65)$$

ede edilir. Burada; $\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r}$: Lokal katılık olarak tanımlanmıştır.

Pratikte $C_D=0$ olarak analizler yapılır. Bunun nedeni ilgili kanat kesitinde C_D/C_L küçük olduğundan C_D' yi 0 olarak yapılan hata ihmal edilebilir mertebededir.

Her iki teoriden bulunan tork ve kuvvet denklemlerinden $C_D=0$ olarak,

$$\frac{a}{(1-a)} = \frac{\sigma' (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi)}{4 \sin^2 \varphi} \quad (2.66)$$

$$\frac{a'}{(1-a')} = \frac{\sigma' (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi)}{4 \sin \varphi \cos \varphi} \quad (2.67)$$

bulunur ve bu iki denklemden ve alarak:

$$C_L = \frac{4 \sin \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi)}{\sigma' (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi)}$$

$$\frac{a'}{1-a'} = \frac{\sigma' C_L}{4 \cos \varphi}$$

denklemleri elde edilir. Ayrıca diğer eşitliklerden,

$$a/a' = \lambda_r / \tan \varphi$$

$$a = 1/[1 + 4 \sin^2 \varphi / (\sigma' C_L \cos \varphi)]$$

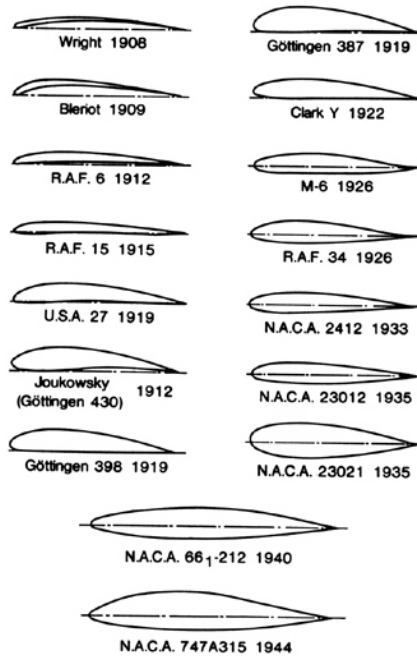
$$a' = 1/[4 \cos \varphi / (\sigma' C_L) - 1]$$

denklemleri bulunur.

Bu denklemler iki metot kullanılarak çözülmek suretiyle kanat kesitinde akış şartları belirlenir [33].

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Günümüzde çeşitli ülkelerde geliştirilmiş binlerce kanat profili şeklinden söz etmek mümkündür. Bu profillerin büyük bir çoğunluğu II. Dünya savaşı öncesi ve savaş sırasında ABD'de NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) tarafından ve bir kısmı da İngiltere, Almanya, Rusya gibi bazı ülkelerde geliştirilmiş olup son yıllarda HAD kullanılarak modern profiller de geliştirilmiştir (Bkz. Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Bazı modern kanat profilleri [34]

Kanat profiline kamburluk verilerek üst yüzeydeki alan arttırılmakta ve bu alanın arttırılması ile profil üzerinden geçen havanın hızının arttırılması sağlanmaktadır. Hava hızının artması ile enerjinin korunumu prensibine (Bernouille denklemi) göre basınç da düşmektedir. Böylece alt yüzey ile üst yüzey arasında oluşan basınç farkı artmakta ve sonuç olarak taşıma kuvveti arttırılmaktadır.

Bu sayısal çalışmada,

- NACA2415 kanat profili,
- NACA2415 + NACA22 slatlı kanat

aerodinamik performansları rüzgar türbini ve su türbini uygulamaları nedeniyle düşük Re sayılarında incelenmiştir.

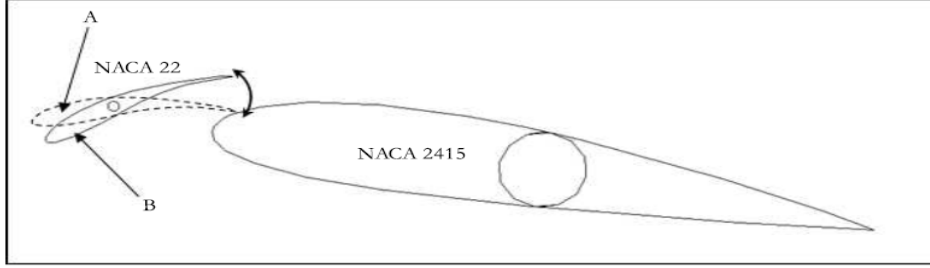
NACA 2415 profili laminar ve konveksiyonal akışta uçak kanatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kanat tipi laminar akışta uçakların hızını arttırmak için kullanılmaktadır. Bu kanat laminar akışı korumak, akışı daha fazla bir % ile kanatta tutarak kontrollü bir akış sağlamaktır. Bu özelliğinden dolayı sürüklenme kuvveti önemli ölçüde azalmakta ve buna bağlı olarak da kaldırma kuvvetinin artması sağlanmaktadır. Bu özellik rüzgar türbini kanatlarında da istenen bir özelliktir. Bu nedenle bu çalışmamızda bu kanat profili referans alınarak bu kanadın aerodinamik performansı incelenmiş ve kanada slat takarak aerodinamik performansta olabilecek iyileştirmeler ortaya konulmaya çalışıldı.

Slat geometrisi olarak NACA22 profilinin seçilmiştir. Slat kullanılarak NACA2415 kanat profili taşıma katsayısını arttırmak ve kanat üzerindeki akım ayrılmasını kontrol etmektir. Hücum kenarı slatının kanat profili seçimi Weick ve Sanders'in [36] değişik profiller ve veter boyları ile azami taşımanın değişimi ile ilgili çalışmasına bağlıdır. Bu çalışmanın sonucunda yüksek kamburluklu NACA22 kanat profilinin daha fazla taşıma katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Slatın boyu ve kalınlığı, rüzgar tüneline test edildiğinde esnemeyecek kadar mukavim olması gerektiğinden azami taşıma katsayısını en az etkileyecek şekilde ideal veter boyu esas kanat profilinin (NACA2415) veter boyunun %30'u yani 38.1 mm alındı [35].

En uygun slat büyüklüğü ve konumu için ESDU verileri kullanıldı ve ESDU verilerinde 0° hücum açısında bir kanat profiline göre slattan elde edilebilecek taşıma katsayısını belirlemek için detaylı çalışmalar mevcuttur [35].

Kanat-slat kombinasyonu Şekil 3.2'de görülmektedir. Analizlerde hücum açısı slat-kanat arası boşluk ve Re sayısı değişken parametre olarak belirlenmiştir. Şekil 3.2'de , A konumundaki gibi NACA22 slat firar kenarı NACA2415 kanat profili hücum kenarına değecek duruma gelene kadar yaklaştırılmış ve B konumunda yani slatlı kanat profili tutunma kaybına uğrayana kadar slat açısı değiştirilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.2 'de de görebileceğimiz gibi NACA2415 kanat

profili hücum açısı (α) saat yönünde dönerken NACA22 slat açısı (δ) ise saat yönünün tersi istikamette dönmektedir.



Şekil 3.2 : NACA22 hücum kenarı slatlı NACA2415 kanat profili [19]

3.1. Aerodinamik Kuvvetler ve Kavramlar

Aerodinamik, hava ile havanın içinde hareket eden katı kütlelerin etkileşimini inceler ve bu hareketler esnasında oluşabilecek kuvvetleri hesaplayan bilim dalıdır.

Aerodinamik performans, kanat profili etrafında oluşan ve kanadın performansını etkileyen, taşıma ve sürüklenme kuvveti ve bunların oranları ile ilgilidir. Performansın artırılması, hava araçlarının daha verimli çalışmaları için taşıma kuvvetinin fazla, sürüklenme kuvvetinin ise düşük olması yani birbirlerine oranının artması gerektiği için yapılan çalışmalar her zaman aerodinamik performansı artırılması üzerine olmuştur.

Rüzgar türbinlerinde kullanılan kanadın geometrisi, gelen havanın kanat üzerinde farklı basınçlar göstermektedir ve bu oluşan basınç farkından aerodinamik kuvvetler meydana gelir ve buda kanadın dönmesini sağlar. Seçilecek kanat geometrisi bu aerodinamik kuvvetlerin değişmesine sebep olacaktır.

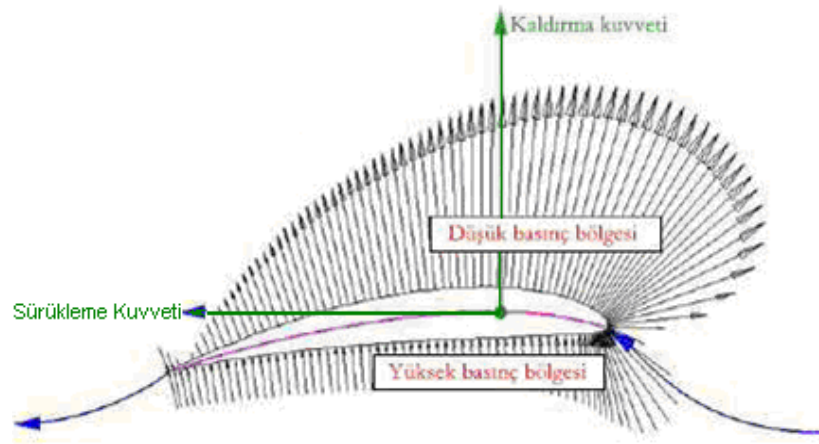
3.1.1. Aerodinamik kuvvetler

Kanatın hareketi sırasında, hava hareketine bağlı olarak gelişen aerodinamik kuvvetler, kanadın performansını etkilemektedir. Hava akışı, kanat dönme hızına ve ortamın rüzgâr hızına bağlıdır. Rüzgarın hızı bölgesel topografya ve atmosferik koşullara bağımlı olarak değişmektedir. Tüm kanat yüzeyine dağılmış olan basınçların bileşkesi olan aerodinamik kuvvet, basınç merkezi adı verilen bir noktaya etki etmekte, kanat performansını olumlu veya olumsuz biçimde etkileyen

koşullar yaratmaktadır. Aerodinamik kuvvet; kanat kararlılığı bakımından dikkate alınması gereken önemli bir kuvvettir.

a. Basınç dağılımı

Cisim etrafında çeşitli noktalardaki farklı hızlar, Bernoulli denkleminde göre cisim etrafında her noktada değişen bir basınç dağılımına neden olur. Şekil 3.3'de verilen basınç dağılımında görüldüğü gibi üst yüzeyde düşük basınç bölgesi, alt yüzeyde yüksek basınç bölgesi oluşur.

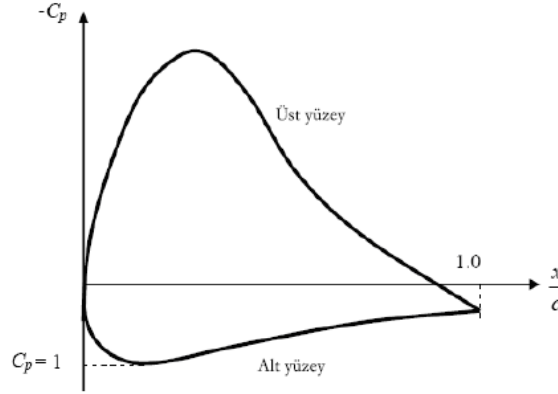


Şekil 3.3: Küçük hücum açısına sahip bir kanat profili etrafındaki basınç dağılımı

Aerodinamik incelemelerinde sıklıkla cisimlerin etrafındaki basınç dağılımıyla ilgilenilir. Ancak bu incelemelerde basıncın mutlak değeri yerine bir katsayı şeklindeki ifadesinin kullanılması tercih edilir. Kanat profili etrafındaki basınç dağılımı 3.1'nolu denklemde görüldüğü gibi boyutsuzlaştırılır ve bu boyutsuz sayıya basınç katsayısı adı verilir.

$$C^l_p = \frac{p - p_{ref}}{\frac{1}{2} \rho v_{ref}^2} \quad (3.1)$$

Bu denklemde; p statik basınç, p_{ref} referans basıncı ve v_{ref} ise referans hızıdır. Kanat etrafındaki akımda basınç katsayısı dağılımı referanslarda Şekil 3.4'de verildiği şekilde değişmektedir.

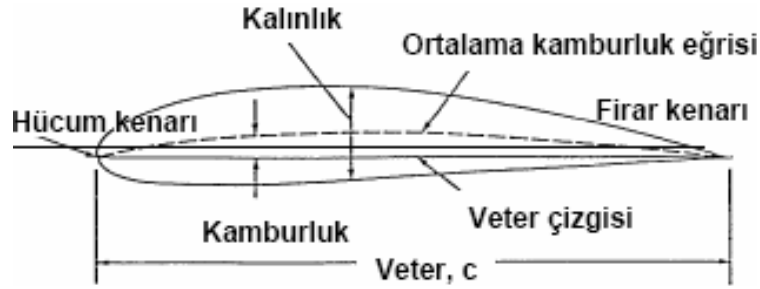


Şekil 3.4: Basınç katsayısının veter uzunluğu boyunca değişimi

Bu basınç katsayısı Şekil 3.4'de görüldüğü gibi kanadın veter uzunluğu boyunca değişmektedir.

b. Aerodinamik kuvvet ve momentler

Kanat profili, göreceli olarak yüksek verimlilikle taşıma gücü üretebilen şekildir. Kanat profilinin tanımlanabilmesi için belirli karakteristikleri vardır ve bunlar Şekil 3.5'de de görüldüğü gibi; veter hattı, azami kalınlık, azami kamburluk, hücum açısı, hücum kenarı, firar kenarı vb.'dir



Şekil 3.5 : Kanat profili karakteristikleri

Kanat veter hattı: Kanat profili hücum kenarı ile firar kenarını birleştiren hattır.

Hücum kenarı: Kanat profilinin en öndeki havayı karşılayan kenarıdır.

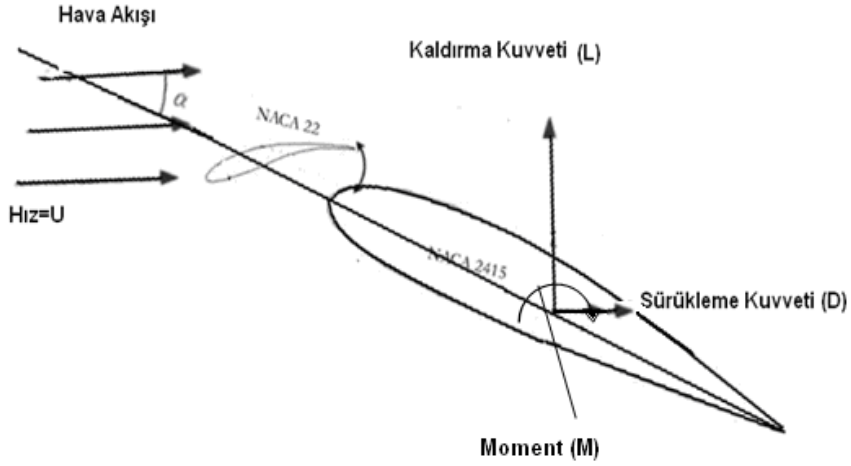
Fırar kenarı: Kanat profilinin arkadaki kenarıdır.

Kalınlık: Kanat profilinin alt ve üst yüzeyi arasındaki azami mesafedir ve veterin yüzdesi olarak verilir.

Hücum Açısı: Veter hattı ile göreceli hava akımı arasındaki açıdır.

Ortalama Kamburluk Eğrisi: Kanadın alt ve üst noktasını ikiye ayıran çizgi.

Kanat profili etrafında iki boyutlu bir akış ortamında kanada etki eden aerodinamik kuvvetler, sürüklenme kuvveti, D (Drag), Kaldırma kuvveti, L (Lift) ve moment, M' dir (Bkz. Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : Kanat kesiti üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler

Kanat yüzeyinin önüne çarpan hava akımı, kanadın üst yüzeyi daha kavisli olduğu için, hızlı bir şekilde, alt yüzey ise üste göre daha az kavisli olduğundan yavaş hareket eder. Bu da, yüksek basınç oluşumuna neden olur ve bir kaldırma kuvveti meydana gelir. Lift kuvveti serbest akış hızına dik olarak tanımlanır.

Sürüklenme kuvvet veya drag akış hızına paralel olan ve model etki eden aerodinamik kuvvettir.

Kanat etrafındaki akımda aerodinamik kuvvetleri oluşturan kanat etrafında simetrik olamayan basınç dağılımı ile kanat yüzeyinde oluşan kayma gerilmelerinin oluşturduğu sürtünme kuvvetleridir. Dolayısıyla bu kuvvetler, $D=D_{\text{basınç}}+D_{\text{sür.}}$ formunda iki kısma ayrılabilir. Kür cisimlerde sadece sürtünme kaynaklı direnç ihmal edilirken kanatlarda kanat kalınlığına bağlı olarak basınç kaynaklı direnç kuvvetleri ihmal edilebilir.

Kanada etki eden moment, kanat üzerinde tanımlandığı noktaya göre değişebilir. Kanatta momenti oluşturan kanada etki eden lift ve drag kuvvetleridir.

Bu aerodinamik kuvvetler, bilindiği gibi, akış ortamında hücum açısına, Re sayısına ve Mach sayısına bağlıdır.

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho_\infty V_\infty^2 A = f(\alpha, Re, M_\infty) \quad (3.2)$$

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho_\infty V_\infty^2 A = f(\alpha, Re, M_\infty) \quad (3.3)$$

$$M = \frac{1}{2} C_M \rho_\infty V_\infty^2 A.L = f(\alpha, Re, M_\infty) \quad (3.4)$$

(3.2), (3.3) ve (3.4) denklemlerinin sağ tarafındaki bütün boyutlu büyüklükler sol tarafa bölünerek geçirilirse, aerodinamik kuvvetler ve moment için,

$$\frac{L}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 A} = C_L = f(\alpha, Re, M_\infty) \quad (3.5)$$

$$\frac{D}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 A} = C_D = f(\alpha, Re, M_\infty) \quad (3.6)$$

$$\frac{M}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 A.L} = C_M = f(\alpha, Re, M_\infty) \quad (3.7)$$

şeklinde boyutsuz birer ifade elde edilir. Bu ifadelerin sağ taraflarındaki boyutsuz büyüklükler sırasıyla aerodinamik kuvvet ve moment katsayıları olarak adlandırılır. Aerodinamikte kuvvet ve momentler genellikle katsayılar cinsinden ifade edilir.

Uçak ve benzeri vasıtalarla ilgili uygulamada şüphesiz çok farklı büyüklüklerde ve hızlarda ilgilenilmektedir. Birbirine yakın özelliklerdeki kanat, kuyruk gibi elemanlarının geometrileri arasında da farklılıklar vardır. Dolayısıyla bunlara etkiyen aerodinamik kuvvet de farklı olacaktır. Bu durumda bu kanadın hangisinin aerodinamik bakımdan daha iyi vasıflara sahip olduğu sorusunun cevabı ilk bakışta güç gelecektir. Ancak, aerodinamik kuvvet yerine aerodinamik katsayıları birbiriyle karşılaştırarak cisimlerin aerodinamik performanslarını kıyaslamak mümkündür. Örneğin, aynı taşıma katsayısındaki bir kanatta sürüklenme katsayısı

daha küçük olan kanadın aerodinamik sürükleme açısından daha vasıflı olduğu söylenebilir.

3.1.2. Aerodinamik performansı arttırma yöntemleri

Aerodinamik performans arttırmak, kanat profili etrafında oluşan kaldırma kuvvetinin artırılması ve sürükleme kuvvetini azaltılması ile sağlanır. Kaldırma kuvveti ve geri sürükleme kuvveti oranı (L/D) aerodinamik kesitin verimliliğini gösterir. Yüksek L/D oranlı hava araçları düşük oranlılardan daha etkin ve daha verimlidirler. Bu koşullar gerçekleştirildiğinde aynı rüzgar hızlarında ve daha düşük rüzgar hızlarında daha iyi performans sağlanıp üretilen güç arttırılabilir. Kanat profili dizayn edilirken genelde C_L/C_D oranının maksimum olduğu andaki hücum açısı seçilir [35].

Kaldırma kuvvetini arttırmak kanat profili etrafındaki basınç dağılımını arttırmakla sağlanabildiği gibi aynı zamanda profil etrafındaki sınır tabaka kalınlığının düşürülmesi veya türbülanslı sınır tabakanın firar kenarı civarına taşınması ile sağlanabilir. Aerodinamik performansı arttırmak için; hücum açısı arttırılabilir, kanat profiline kamburluk verilebilir veya yüksek kaldırma aygıtları kullanılabilir.

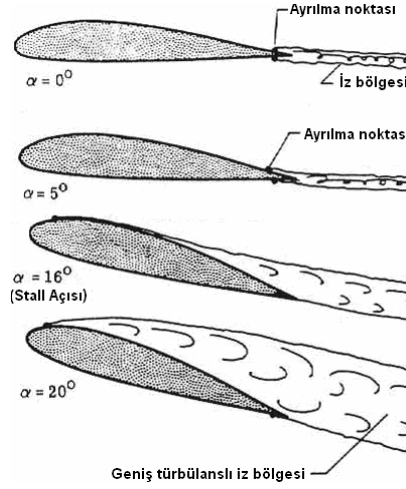
a. Hücum açısı

Hücum açısı hava aracının hız vektörü ile kanat veter yönü arasında kalan açıdır (Bkz. Şekil 3.7).



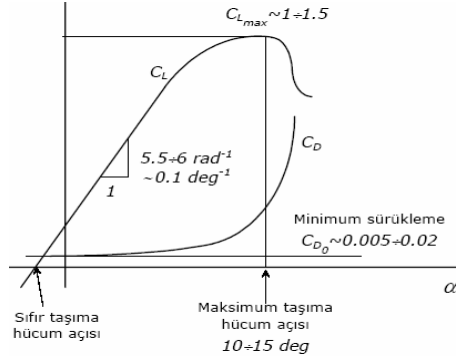
Şekil 3.7: Hücum açısı

Hücum açısı arttıkça kaldırma kuvveti de artar. Fakat bu açının belirli bir değeri geçmesi ile akım çizgileri kanat üzerinde tutunamayacaktır. 0° lik hücum açısına sahip bir kanat profili firar kenarında akım ayrılmaları başlar ve kanat arkasında iz bölgesi oluşur (Bkz. Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Hücüm açısının değışimi ile kanat profili etrafındaki akış

Hücüm açısı arttırıldıkça ayrılma noktası hücüm kenarına yaklaşır ve yaklaşık 12–16°'lik hücüm açısına ulaşıldığında akım ayrılması (*stall*) başlar. Türbülansın başladığı bu açiya stall açısı denir. Bu açıdan daha fazla hücüm açısının arttırılması halinde kaldırma kuvveti azalır ve sürüklenme kuvveti hızla artar. Hücüm açısının küçülmesi ile azalan kaldırma kuvveti uçak hızının arttırılması ile arttırılır.



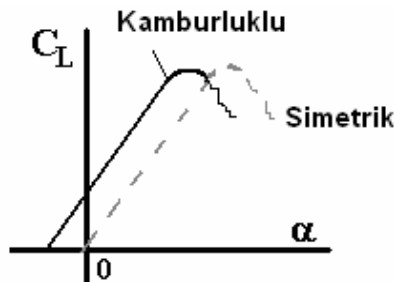
Şekil 3.9: Aerodinamik katsayıların hücüm açısı ile değışimi

Şekil 3.9'de (Aerodinamik katsayıların hücüm açısı ile değışimi.) kaldırma katsayısının *stall* açısına kadar arttığı ve bu açı değeriinden sonra düşmeye başladığı görülmektedir. Ayrıca hücüm açısının artışı ile ayrılma noktasının hücüm kenarına yaklaşması sonucu sürüklenme katsayısı artmakta olduğu görülmektedir.

b. Kamburluk

Uçak kanatlarında % 0-5 arasında_kamburluklara rastlanır. Türbin ve kompresörlerde ise daha kambur profiller görmek mümkündür. Şekil 3.5 'da (Kanat profili karakteristikleri.); veter çizgisi, hücum kenarı ile firar kenarını birleştiren doğrudur. Kamburluk eğrisi, kanat üst yüzeyi ile alt yüzeyi arasındaki orta noktaları birleştiren eğridir. Kamburluk ise kamburluk eğrisi ile veter doğrusu arasındaki maksimum mesafedir.

Kanat profiline kamburluk verilerek üst yüzeydeki alan arttırılmakta ve bu alanın arttırılması ile profil üzerinden geçen havanın hızının arttırılması sağlanmaktadır. Hava hızının arttırılması ile Bernoulli denkleminde basınç daha fazla düşürülmektedir. Böylece alt yüzey ile üst yüzey arasında oluşan basınç farkı artmakta ve sonuç olarak kaldırma kuvveti arttırılmaktadır. Şekil 3.10'da kamburluklu ve simetrik kanat profillerinden elde edilen kaldırma katsayısının değişimi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.10 : Kamburluklu ve simetrik kanat profillerinden elde edilen kaldırma katsayısı

Şekilden görüldüğü gibi kambur kanatlar sıfır hücum açısında lift oluştururken simetrik kanatlar sıfır hücum açısında lift oluşturmazlar.

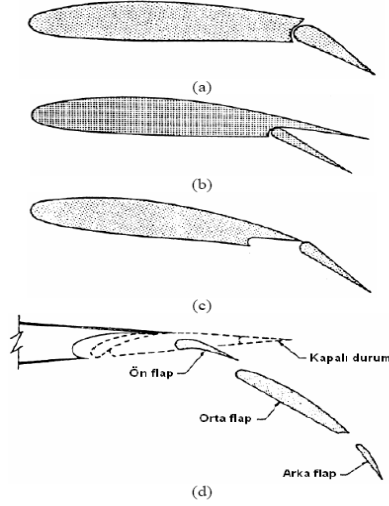
c. Yüksek kaldırma aygıtları

Kanat profili tasarımlarında yüksek kaldırma katsayısı, düşük sürüklenme katsayısı ve sağlam bir yapı olmasına çalışılır. 40–50 yıldır kullanılan klasik kanat profillerinde maksimum C_L (kaldırma katsayısı) 1,4 ile 1,5 ve C_D (sürüklenme katsayısı) 0.01'dir. Bu kanat profillerinin hepsi üretim kusurlarından dolayı

pürüzlülük açısından oldukça az hassastır. Bunların C_M (momentum katsayısı) leri oldukça düşüktür öyle ki kanat yüksek hızda çok büyük bükmeye dayanamaz.

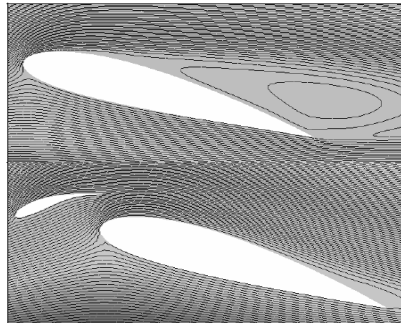
Kanatta kaldırma kuvvetini artırmak için; flap ve saltlar kullanılır.

Flaplar: Maksimum kaldırmayı arttırmak için, geleneksel olarak kamburluğu uygun bir şekilde arttırmanın gerektiğini bir önceki başlıkta bahsedilmişti. Pratikte bu durum, kanat profilinin üst yüzeyini kambur yapmakla olduğu gibi kanat profilinin arkasını eğmek ile de yapılır ve bu eğilen parçaya *flap* denir. Kanat firar kenarına monte edilmiş bu flap sadece kanat profilin şeklinin değişmesini sağlar, kanat alanını artırmaz. (Şekil 3.11 a,b). 15° hücum açısı ile bu flaplar kullanıldığında kaldırmadaki artış orta seviyededir yani $C_L=2,2$ olur. Bu değer bütün kanat genişliği boyunca düşünüldüğünde 1,9 dur. 15° hücum açısından sonraki açılarda üst yüzeyde bu flapda stall olur. Çünkü hava akımı, sınır tabaka nedeniyle meydana gelen doğrultudaki ani değişikliklerin üstesinden gelecek kadar yeterli momentuma sahip değildir. Sürüklenme artışı 15° den daha büyük hücum açılarında çok önemli olur ve kaldırma katsayısında artık artış olmaz. Düz ve yarıklı flapın bu sorunu daha gelişmiş olan kayan flap ile aşılır (Şekil 3.11 c). Kanat profilinin hücum kenarında bir boşluk oluşturan yarıklı flap huni şeklindeki bu boşluktan havanın hızlanmasını sağlar ve hızlanan bu hava üst yüzeyde oluşan sınır tabakaya doğru hareket ederek sınır tabakanın oluşmasını geciktirir. Böylece kanat profilinde flapların kullanılışı yaklaşık 25° lik hücum açısına kadar verimli hala gelir. Genellikle kayan flaplar döndürülmekle birlikte ileri doğru ötelenir ve veter uzunluğunun artışı ile kanat alanı arttırılır. Bir diğer flap türü kayan yarıklı flapdır (Şekil 3.11 d). Kanadın kuyruk kısmının altında ayrı küçük bir veya birkaç kanat profilidir ve her zaman üst yüzey sınır tabaka etkisini azaltan huni etkisi ortaya çıkaracak şekilde mesnetlidir. Kayan yarıklı flap özellikle aileron olarak kullanılabilirler. Aileronlar kanadın arkasındaki flap kısmıdır ve bunlarla pilotlar birini aşağı indirirken diğerini yukarı kaldırarak roll kontrolünü yani uçağın sağa-sola hareketini sağlarlar [19].



Şekil 3.11 : Flap çeşitleri; a- Düz flap, b- Yarıklı flap, c- Kayan flap, d- Kayan yarıklı flap

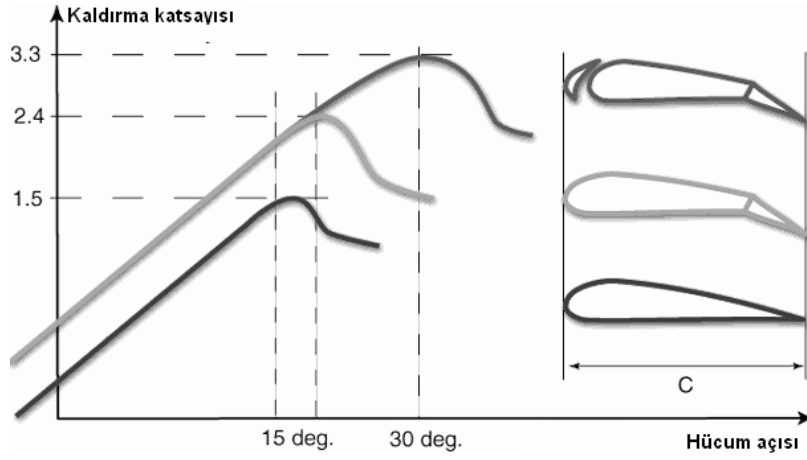
Slot ve slatlar: Kanat profilinin hücum kenarında sabit olan açıklık kısma *slot* hareketli olan açık kısma da *slat* denir (Şekil 3.12). Bazı uçakların hücum kenarlarında sadece slat, bazılarında ise hem slat hem de flap kullanılmaktadır. Slatlar firar kenarı flapları ile kullanılarak kanat profili şeklini değiştirir ve uçağın kaldırma kuvvetini arttırmaları. Aynı zamanda flapların açılmasıyla birlikte uzayan kanat genişliği nedeniyle kanat üzerindeki türbülansın kaybolması için kanat üzerinde hava akışını yönlendirir. Slatların bir görevi de, uçağın hücum açısının artışı ile meydana gelebilecek stall olayını önlemektir. Slat kullanılarak sınır tabaka kontrolü sağlanır ve sınır tabaka üzerine hızlandırılmış hava gönderilerek sınır tabakayı kanat arkasına doğru iter, böylece akımı kanat profiline yapıştırmak için ekstra lokal türbülans olmaksızın hava akışına izin verilir.



Şekil 3.12 : Slat kullanımı ile kanat profili etrafındaki akışın kontrolü

Değişik kanat profilleri için kaldırma katsayısının hücum açısı ile değişimi Şekil 3.13'de gösterilmektedir. Bu grafikten görüldüğü gibi yüksek kaldırma aygıtlarının

kullanımı ile hem kaldırma katsayısı artırılır hem de daha yüksek hücum açılarındaki uçulabilir [19].



Şekil 3.13 : Değişik kanat profilleri için kaldırma katsayısının hücum açısı ile değişimi

3.2. Rüzgar Türbinlerinde Boyutsal Analiz ve Kanat Benzeşimi

Türbin kanatları alanında yapılabilecek analizlerde sayısal ya da deneysel, hangi parametrelerin dikkate alınması gerektiği konusunda bir sonuca varabilmek için boyutsal çözümlene şarttır. Bu boyutsuz çözümlene sonucunda sistemde etkili boyutlu yada boyutsuz parametreler belirlenerek analizle bu boyutsuz parametrelere göre gerçekleştirilir. Genellikle analizler modeller üzerinde gerçekleştirildiği için modelle prototip arasında benzerlik kurallarının uygulanması gerekir. Benzerlik olabilmesi için, geometrik benzerlik, kinematik benzerlik ve dinamik benzerlik kurallarının beraberce sağlanması gerekir.

3.2.1. Boyutsal Çözümlene

Kanat etrafındaki akımda boyutsal çözümlenede kanada etki eden aerodinamik kuvvetlere etki eden büyüklükler , μ ; vizkozite, v ; akışkan hızı, h ; kanat ile slat arasındaki mesafe, slat açısı , c_1 ; kanat veter uzunluğu, c_2 ; slat veter uzunluğu, ρ ; akışkanın yoğunluğu, N ; devir sayısı hücum açısı (α), slat (δ) açısıdır.

$F_D=f(\mu, v, c_1, c_2, \rho, N, h, \alpha, \delta)$ ise; c_1, V, ρ tekrarlanan parametreler olmak üzere, Pi teoremi uygulanarak,

$$\Pi_1 = F_D / (\mu \cdot v \cdot c_1) = C_D$$

$$\Pi_2 = (\rho \cdot v / \mu) \cdot c_1 = Re$$

$$\Pi_3 = h/c_1$$

$$\Pi_4 = c_1/c_2$$

$$\Pi_5 = \alpha \text{ (Hücüm Açısı)}$$

$$\Pi_6 = \delta \text{ (Slat Açısı)}$$

$$\Pi_7 = (\mu \cdot N) / (v^2 \cdot \rho) = (N \cdot c_1) / v \text{ uç hız oranı}$$

Aynı işlemler F_L (kaldırma kuvveti) için yapıldığında farklı bir parametre olarak C_L kaldırma katsayısı bulundu.

C_L katsayısı aşağıda verilmektedir.

$$\Pi = F_L / (\mu \cdot v \cdot c_1) = C_L$$

Sonuç olarak analizde Re sayısı, c_1/c_2 , h/c_1 , hücüm açısı (α) ve slat (δ) açısı değerleri referans alınarak sayısal analizler yapılmışna karar verildi.

Yapılan boyut analizi sonucunda, sürüklenme katsayısı (C_D), kaldırma katsayısı (C_L), Reynolds sayısı, hücüm açısı (α), slat (δ) açısı, h/c_1 oranı ve uç hız oranı (λ) ile değiştiği görüldü.

Bu analizde akış problemi iki boyutlu olarak çözüldüğünden uç hız oranı dikkate alınmadı. Akımın Mach sayısı 0.3 değerinden küçük olduğundan (Hava ortamında 0.035, su ortamında 0.00006) akışkanın yoğunluk değişimi dikkate alınmasına gerek olmadığından Ma sayısının etkisi de ihmal edildi.

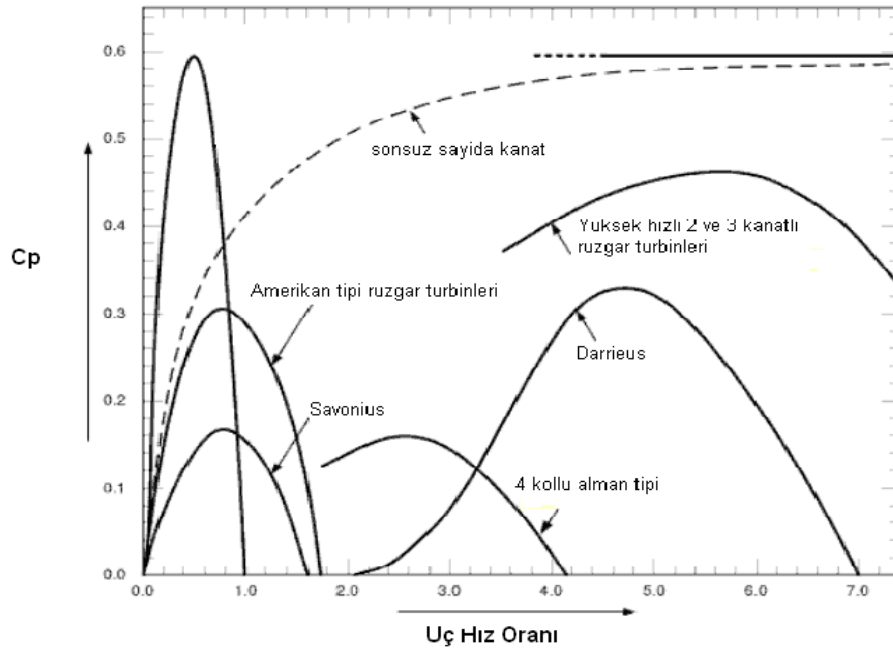
Uç hız oranı ;

$$\lambda = \frac{r\Omega}{U} \tag{3.8}$$

dır. Burada ω rotor hızıdır. Bu denklemde eğer rotor hızı sabit tutulursa o zaman rüzgar hızındaki herhangi bir değişimin tepe hız oranına yansıtacağı görülür. Bunun sonucu C_p rüzgar türbini güç sabitinin aynı zamanda rüzgar türbininden üretilen güç çıkışının değişmesi demektir. Bununla birlikte eğer rüzgar hızındaki değişime göre rotor hızı ayarlanırsa, o zaman tepe hız oranının optimum bir noktada bulunması sağlanabilir. Bunun sonucunda sistemden maksimum güç çıkışı üretilebilir. Uç hız oranı Şekil 3.14'de de görüldüğü gibi kullanılan rüzgar türbini tipine en uygun değerinin 5 olduğu görülmektedir ve A.S. Baraj ve arkadaşları model türbinin bir kavitasyon tüneline su ortamında 1-2 m/s su hızlarında yapılan deneysel araştırmasından elde ettiği sonuçlara göre uç hız oranının en uygun değeri 5 olarak elde etmişlerdir[30]. Yapılan sayısal çalışmalarda hem su hem de hava ortamında çalışma yapıldı ve bu değer kullanıldı.

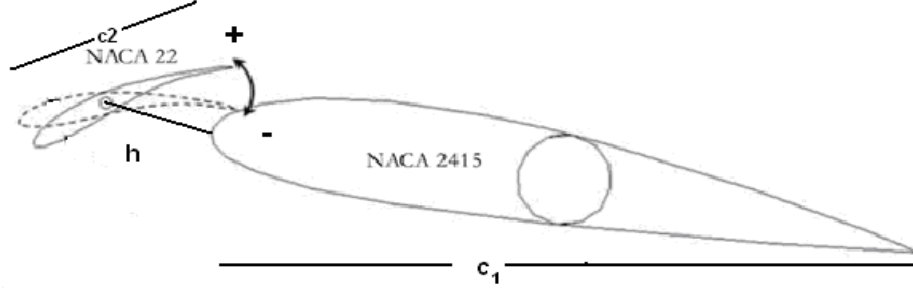
Türbinin yüksek performans sağlaması amacıyla seçilebilecek bir uç hız oranını belirlemek için denklem (3.9)'de verilen ampirik ifadeden faydalanılabilir [Spera,1994].

$$C_{p,max} = 0,593 \left[\frac{\lambda B^{0,67}}{1,48 + (B^{0,67} - 0,04)\lambda + 0,0025\lambda^2} - \frac{1,92\lambda^2 B D}{1 + 2\lambda B L} \right] \quad (3.9)$$



Şekil 3.14: Rüzgar türbin tiplerine göre uç hız oranı- C_p grafiği [36]

Yapılan sayısal analizde slatsız ve slatlı kanat performansları Re sayısı, hücum açısı, slat açısı ve slat-kanat boşluğu referans alınarak yapıldı ve maksimum performans için optimum değerler bulundu.



Şekil 3.15 : NACA22 hücum kenarı slatlı NACA2415 kanat profili

Çalışma değişkenler;

h/c_1 : 0.125, 0.145, 0.165 ve 0,185

Hücum açısı : $0^0, 6^0, 10^0, 12^0, 18^0, 24^0, 27^0, 30^0, 33^0, 35^0, 38^0$

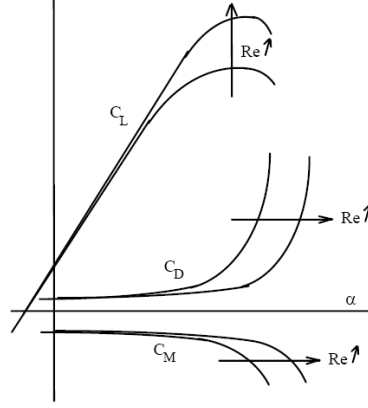
Slat açısı : (+) ve (-) yönlerde çevrilerek 18^0-37^0 slat açılarında denenmiştir.(Bkz. Şekil 3.15)

Re sayısı : Akış ortamındaki atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olup 1883 yılında Osborne Reynolds tarafından tanımlanan boyutsuz bir sayıdır;

$$R_e = \frac{\rho V_\infty c}{\mu} \quad (3.9)$$

Burada; ρ yoğunluğu, V_∞ serbest akım hızını, c veter uzunluğu ve μ dinamik viskoziteyi ifade etmektedir. c uzunluğu, kanat profilleri için veter boyunu ifade etmektedir. Rüzgar türbinleri düşük Re sayılı rejimde çalışırlar.

Re sayısına, hücum açısına ve kanat profilinin geometrik şekline bağlı olarak bir miktar farklılıklar gösterebilir. Şekil 3.16' da görüldüğü gibi yüksek hücum açılarında Re sayısının etkisi tutunma kaybını geciktirici tarzdadır. Bu durum, maksimum taşımada ve tutunma kaybı hücum açısında bir artış ve yüksek hücum açısındaki sürüklemeye bir miktar düşüş şeklinde kendini gösterir. Yani yüksek Re sayılarında kaldırma kuvveti artar ve sürüklenme kuvveti azalır.



Şekil 3.16: Kanatlardaki yüksek hücum açısında Re sayısının etkisi

Biz bu çalışmada;

Hava ortamında ; 1×10^5 ($V=12$ m/s)

Su ortamında ; 2.53×10^5 , 1.9×10^5 ve 1.26×10^5 ($V=1$ m/s, 1.5 m/s, 2 m/s)

çalışıldı.

Yapılan aerodinamik hesaplamalar sonucunda elde edilen, basınç dağılımları, aerodinamik kuvvet karakteristikleri ve akım karakteristikleri belirlendi. Maksimum C_L/C_D ve maksimum C_L katsayılarının hem hava hem de su ortamındaki hücum açılarında, kanatta oluşan basınç dağılımları ve konturları, hız konturları, türbülans şiddetleri belirlenerek sistemden ayrılmaları hesaplayarak vorteks kopma frekanslarının belirlendi.

Tüm bu sayısal sonuçlar daha sonra kullandığımız kanat profili olan NACA 2415 profilinin slat olmadığı performansı ile karşılaştırılarak uygulanabilirliği irdelendi.

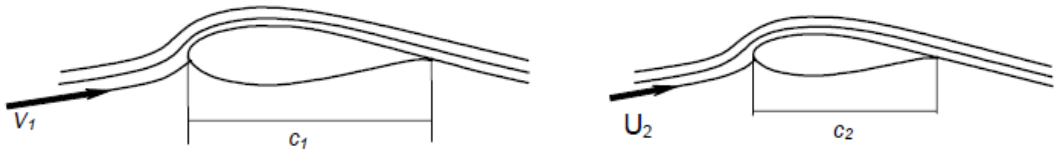
3.2.2. Akım, geometrik ve dinamik benzerlik

Rayleigh denklemi bir cisme etkiyen aerodinamik kuvvet ve momentin, cismin büyüklüğü, havaya nazaran hızı ve havanın yoğunluğu gibi boyutlu büyüklüklere bağlı olduğu gibi geometrik şekli ve pürüzlülüğüne, havaya nazaran hareket doğrultusuna ve Reynolds ve Mach sayısı gibi boyutsuz büyüklüklere bağlı olduğunu, buna karşılık aerodinamik katsayıların belirtilen boyutlu büyüklüklerden bağımsız olduğunu göstermektedir. Katsayılar sadece geometrik şekil ve doğrultu ile Re ve Ma sayılarına bağlıdır.

Bu durumda, herhangi iki cismin büyüklükleri, havaya nazaran hızları ve içinde buldukları havanın yoğunlukları farklı olsa dahi, bunlara etkiyecek aerodinamik kuvvet ve moment farklı olmakla birlikte, aerodinamik katsayıların aynı olması imkanı bulunmaktadır. Katsayıların aynı olmasının, (Eşitlik 3.5 - 3.6 - 3.7) bağıntılarının sağ taraflarında yer alan parametrelerin aynı olmasını gerektirdiği açıkça görülmektedir.

İki cisme etkiyen aerodinamik katsayıların aynı olması için fiziksel olarak iki cisim etrafındaki akımın Şekil 3.17 'da gösterildiği gibi benzer olması gerektiği söylenebilir. Akımların benzer olmasının ilk şartı cisimlerin geometrik şekillerinin birbirine benzemesidir. Bu benzerliğe her iki cisim yüzeyi üzerindeki pürüzlülüklerin de dahil edilmesi gereklidir. Ayrıca cisimlerin havaya nazaran hareket doğrultuları da aynı olmalıdır. Bütün bu şartların sağlanması "*geometrik benzerlik*" olarak adlandırılır.

Ancak geometrik benzerlik, akımların benzerliği için yeterli değildir. Bunun yanında her iki akıma ait Reynolds sayıları ve Mach sayıları da aynı olmalıdır. Geometrik benzerlikle birlikte bu şartların gerçekleşmesi ise "*dinamik benzerlik*" olarak adlandırılır.

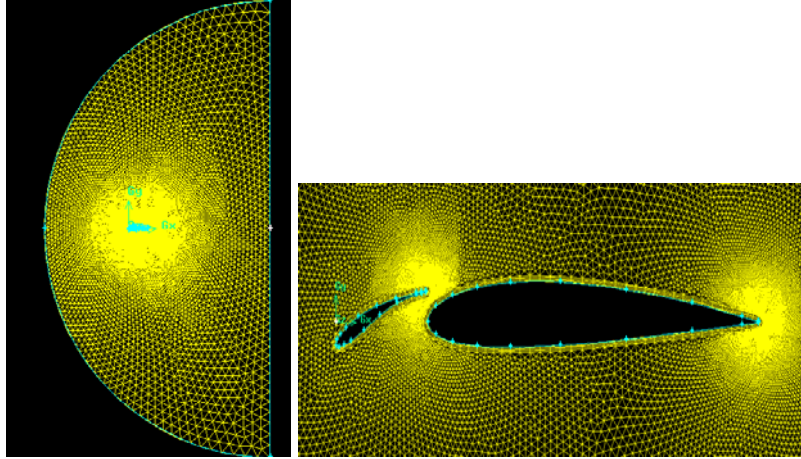


Şekil 3.17: Akımların benzerliği

Dinamik benzerlik rüzgar tünellerindeki deneysel çalışmaların esasını teşkil eder. Şöyle ki; hiçbir zaman bir uçak olduğu gibi bir rüzgar tüneline sokularak uçuş hızındaki bir akım içerisinde deneye tabi tutulamaz. Henüz geliştirme (dizayn) aşamasında olan bir uçak uçurularak atmosfer içerisinde deneye tabi tutulamaz. Bunlar yerine uçakların küçük ölçekteki benzeri modelleri rüzgar tünellerine konularak Reynolds ve Mach sayıları uçuş şartlarındakine yakın olacak şekilde deneye tabi tutulur. Deneylerden elde edilen sonuçlar uçuş şartlarındaki değerlere dönüştürülür.

3.3. Sayısal Analiz ve Hesaplamalar

Ağ yapısı incelenirken, akışı etkilenmemesi için yeteri büyüklükte bir akış ortamı olarak hazırlanması ön görüldü. Kanat profilinin alt ve üstünde veter boyunun 12 katı kadar, kanat profilinin önünde 5 katı kadar ve iz bölgesinde 7 katı kadar serbest akım bölgesi oluşturuldu. Ağ yapısı oluşturmak için GAMBİT™ yazılımı kullanıldı ve Şekil 3.18'de ki gibi bir ağ yapısı oluşturuldu.



Şekil 3.18 : Kanat profili için oluşturulan ağ yapısı

Ağ sayısı yapılan çalışmalarda ve hesaplamalarda önemli bir yere sahiptir. Ağ sayısının belirlenmesi yapılmış olan benzeşim modellerinin yani belirlenen parametrelerden bağımsız olması oldukça önemlidir. Yapılan deneyler sonucunda belirli bir ağ sayısının ulaştıktan sonra belirlenen parametrelerde değişme olmadığı gözlenmektedir. Ağ sayısındaki artış yapılacak hesaplamalarda zaman kaybettireceği için, belirli bir artış olmayana kadar yani yaklaşık olarak 1×10^{-5} kadarlık bir fark olana kadar devam edildi ve uygun ağ sayısı hesaplandı. Böylece çözümün hücre sayısından bağımsız olduğu kanıtlandı.

Burada kanat profilinin sınır şartları; alt ve üst yüzeyleri duvar olarak, giriş; serbest akım bölgesinde hız girişi ve çıkışta; dış akış (outflow) olarak ele alındı. Çünkü çıkış akışının hızı ve basıncı bilinmediği bu durumlarda bu sınır şartı kullanılır.

Aerodinamik yöntemler incelenirken yapılan çalışmalar, hem deneysel hem de teorik olarak incelenirler. Bu deneyler yapılırken sistem oluşturmak zorluğu ve belirli olanaksızlıklar nedeni ile yapılacak olan hesaplamalar HAD (hesaplı

akışkanlar dinamiği) yöntemi çözülmektedir. Bu hesaplama yöntemi ile hem zamandan hem de ekonomik anlamda kazançlı çıkmaktadır.

Genel olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği, her türlü akışkan ve akışının değişik koşullardaki analizini yapmaya yarayan bir yöntemdir. Bu yöntemde temel olarak üç ana denklem (süreklilik, momentum ve enerji denklemleri) esas alınır ve bu denklemler sayısal çözümlere akış içindeki basınç, hız ve sıcaklık dağılımları ve bu parametrelere bağlı olarak birçok veriye ulaşılır.

Günümüzde hesaplamalı akışkanlar dinamiği araştırma–geliştirme ve ürün tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak bir uçak kanadının üzerindeki basınçlar, bir yeraltı rezervuarının sıcaklık dağılımı, bir ortamdaki hava akımı dağılımı veya hareketli bir arabanın etrafındaki hava hızı gibi akış ile ilgili birçok parametre bulunabilir. Son yıllardaki hesaplamalı akışkanlar dinamiği teorisi ve bilgisayar yazılımlarındaki gelişmeler yüksek türbülanslı akışların ve dinamik sistemlerin nümerik olarak incelenmesine ve sanal ortamda simüle edilmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca, tek fazlı akışların yanında çok fazlı akışlar da artık çözülebilir hale gelmiştir. Örneğin pompalarda kavitasyon gibi zararlı etkenlerin yapısı incelenmekte ve alınan sonuçlara göre önlemler alınmaktadır.

Tez çalışmasında düşük R_e sayılarında çalışıldı. Hava için $1 \times 10^5 R_e$ ve su için $2,53 \times 10^5 R_e$ sayısında çalışıldı. Hesaplamaları yaparken FLUENT™ yazılımını kullanıldı.

İki ortamda yapılan deneylerde; hava için sıkıştırılmaz, su için sabit yoğunluklu hesaplamalar yapıldı. Burada önemli olan parametre Mach Sayısıdır. Mach sayısı 0.3 'in altına düşerse, akış hızının ses altı alanında olduğu söylenir. Söz konusu alanda akışkanı, gaz bile olsa, sıkıştırılmaz akışkan saymak önemli bir yanlış sayılmaz. Mach Sayısı akış hızının ses hızına oranı olarak tanımlanır. Bizim çalışmada hava ortamında bu değer 0,035 ve su ortamında ise 0,0006 olarak hesaplandı.

Kaldırma ve sürüklenme kuvvetinin hesabının daha doğru yapılmasını sağlamak için, serbest ortamda ikinci-mertebe geriye-farklar (second order upwind)

ayrıklaştırması seçildi ve SIMPLE çözüm algoritması ile çözdürüldü. SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) ise kaydırılmış ızgara yapısı kullanılarak sonlu farklılaştırılmış fark denklemleri kullanılarak çözüm sağlayan yarı-implicit bir metodudur. Özellikle dalga denklemlerinde, hız ve basınç değerlerinin olduğu Navier-Stokes denklemlerinde oldukça iyi sonuçlar veren ve sınır şartlarını belirlenmesi de kolay olan bir metodudur. Yapılan interpolasyonlar, sonuçların doğruluğu artırıcı yönde etki eder. Yakınsama için hava ortamında; her parametredeki kalanların 1×10^{-5} , su ortamında 1×10^{-6} olması durumuna kadar çözüme devam edildi.

Türbülanslı akışların incelenmesi laminar akışlara oranla oldukça zordur. Bu tip problemlerde türbülansın etkisini katmak için modeller geliştirilmiştir. Bu modellerde akışkanın fiziksel viskozitesine ilave olarak, akışın özelliklerine bağlı diğer bir viskozite terimi tanımlanmakta ve ona türbülans viskozitesi denilmektedir. Bu ek viskozite terimini hesaplamak için araştırmacılar tarafından değişik modeller sunulmaktadır. Bu modeller, FLUENT™ HAD programında bulunan;

- Spalart-Allmaras, k-epsilon,
- RNG (*Renormalization Group*) k- ϵ
- SST (*Shear-Stress Transport*) k- ω 'dır [38].

Bu modellerin arasında ise "standart k-epsilon modeli" yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modelde "k" türbülansın kinetik enerjisini, "epsilon" ise türbülansın yayılımını belirtir. Türbülans modelini seçerken programın bize düşük Re_e sayılarında kullanılmak üzere olan Realizable k- ϵ türbülans modelini kullandık. Ayrıca kanat yakınında, sınır tabaka için geliştirilmiş duvar işlemi ve çözüme basınç gradyantının etkisini de dahil ederek performansını geliştirmektedir.

4. SAYISAL SONUÇLAR

Burada yapılacak sayısal çalışmada slatlı kanadın aerodinamik performansının Re sayısının, hücum açısına, h/c_1 ve slat açısına göre değişimleri incelenerek maksimum performans belirlendi.

Çalışmada ilk önce hücre sayısı belirlendi. Böylece çözümün hücre sayısından bağımsız olduğu kanıtlandı. Daha sonra h/c_1 'nin değişimi sabit slat açısında hem hava hem de su ortamında optimum C_L değerine ulaşana kadar farklı hücum açıları denenerek $h/c_{1, opt}$ belirlendi. Belirlenen $h/c_{1, opt}$ değerinden sonra bu değer sabit tutularak slat açıları değiştirilerek farklı hücum açıları optimum slat açılarına ulaşıldı.

Çalışma hava ve su ortamlarında gerçekleştirildi. Hava için 1×10^5 ve su için 2.53×10^5 , 1.9×10^5 ve 1.26×10^5 Re sayılarında çalışıldı.

Yapılan aerodinamik hesaplamalar sonucunda elde edilen, basınç dağılımları, aerodinamik kuvvet karakteristikleri ve akım karakteristikleri belirlendi. Maksimum C_L/C_D ve maksimum C_L katsayılarının hem hava hem de su ortamındaki hücum açıları, kanatta oluşan basınç dağılımları ve konturları, hız konturları, akım çizgileri, türbülans şiddetleri belirlenerek sistemden ayrılmaları hesaplayarak vorteks kopma frekansları belirlendi.

Tüm bu sayısal sonuçlar daha sonra kullanılan kanat profili olan NACA 2415 profilinin slat olmadığı durumda ki performansı ile karşılaştırılarak uygulanabilirliği irdelendi.

4.1. Sayısal Sonuçlar

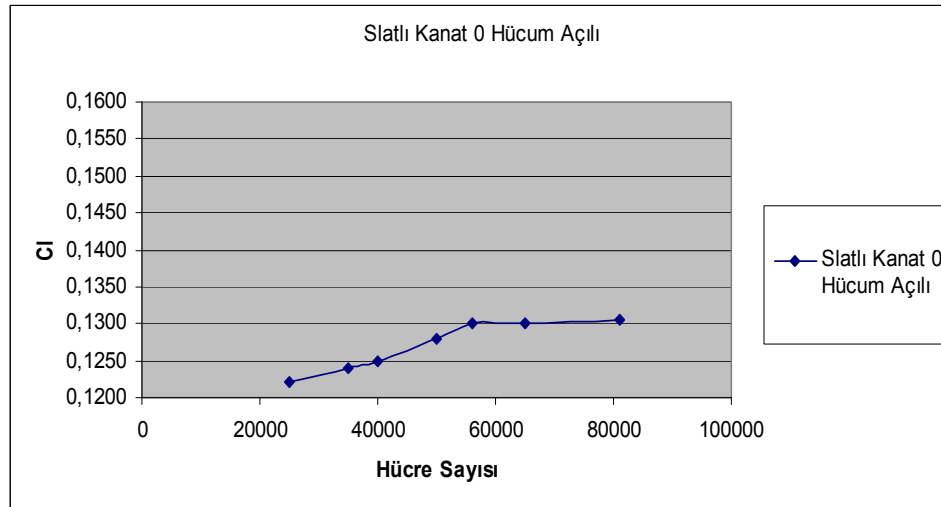
Bu bölümde yapılan sayısal çalışmaların değerleri sırası ile optimum hücre sayısı, h/c_1 değerleri verildi. Yapılan aerodinamik hesaplamalar sonucunda elde edilen, basınç dağılımları, aerodinamik kuvvet karakteristikleri ve akım karakteristikleri verildi. Maksimum C_L/C_D ve maksimum C_L katsayılarının hem hava hem de su ortamındaki hücum açıları, kanatta oluşan basınç dağılımları ve konturları, hız konturları, akım çizgileri, türbülans şiddetleri belirlenerek sistemden ayrılmaları hesaplayarak vorteks kopma frekansları verildi.

4.1.1. Rüzgar ortamındaki sayısal sonuçlar

Uygun ağ yapısı belirlendikten sonra optimum h/c_1 ve slat açısındaki 0^0 , Maksimum C_L/C_D ve maksimum C_L ve tutunma açısından sonraki hücum açılarındaki kanatta oluşan basınç dağılımları ve konturları, aerodinamik kuvvet analizler, yine belirli hücum açılarında hız konturları, akım çizgileri, türbülans şiddetleri belirlenerek sistemden ayrılmaları hesaplayarak vorteks kopma frekansları verildi.

4.1.1.1. Uygun ağ yapısı belirlenmesi

Ağ yapısı incelenirken, akışı etkilenmemesi için yeteri büyüklükte bir akış ortamı olarak hazırlanması ön görüldü. Kanat profilinin alt ve üstünde veter boyunun 12 katı kadar, kanat profilinin önünde 5 katı kadar ve iz bölgesinde 7 katı kadar serbest akım bölgesi oluşturuldu. Ağ yapısı oluşturmak için GAMBİT™ yazılımı kullanıldı ve Şekil 3.19'da ki gibi bir ağ yapısı oluşturuldu.



Şekil 4.1 : 0^0 hücum açısında ki slatlı kanat profilinin eleman sayısına göre değişen C_L değerleri

Yapılan hesaplamalar ve çözümlenmeler sonucunda Şekil 4.2' de gördüğümüz gibi slatlı kanat profilinin 0^0 hücum açısındaki değerlerini elde edildi. İlk olarak 25000 hücre sayısında C_L katsayısı 0.122 olarak belirlendi ve daha sonra hücre sayısının artması ile artış göstermektedir fakat 55000 hücre sayısından sonra C_L katsayısı 0.130'lede sabitlendiği görüldü. Elemen sayısının artması bizim için yapılan hesaplamalarda zaman anlamında dezavantaj oluşturacağından diğer

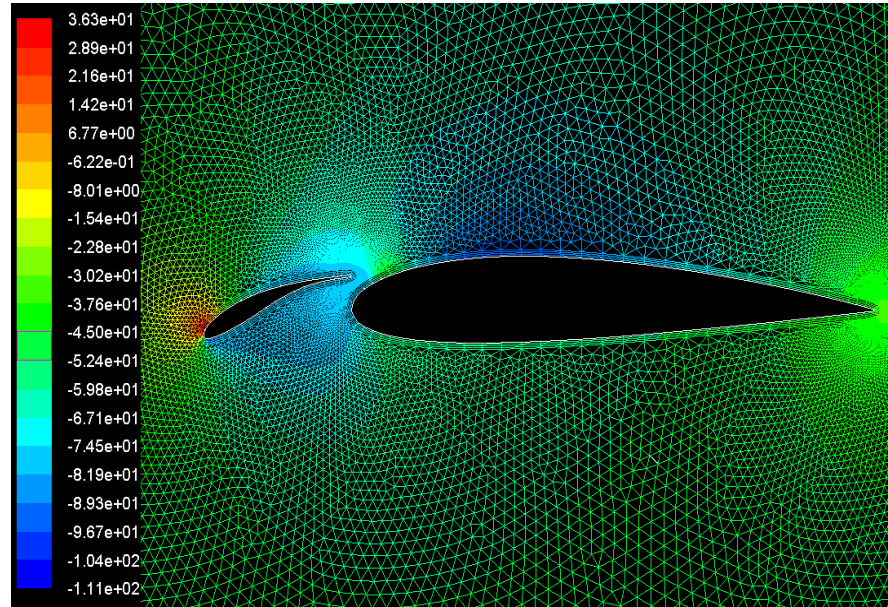
yapılacak olan tüm hesaplamalar için hücre sayısı 55000 olarak kullanıldı. Aynı zamanda da hücre sayısından bağımsız olarak hesaplamalarımızı yapma imkanı sağlandı.

4.1.1.2. Slatlı kanat profilinin basınç değişkenleri

Basınç değişkenleri statik basınç konturları ve basınç katsayı dağılımı olmak üzere iki bölümde incelendi.

a. Kanat profilinin statik basınç konturları

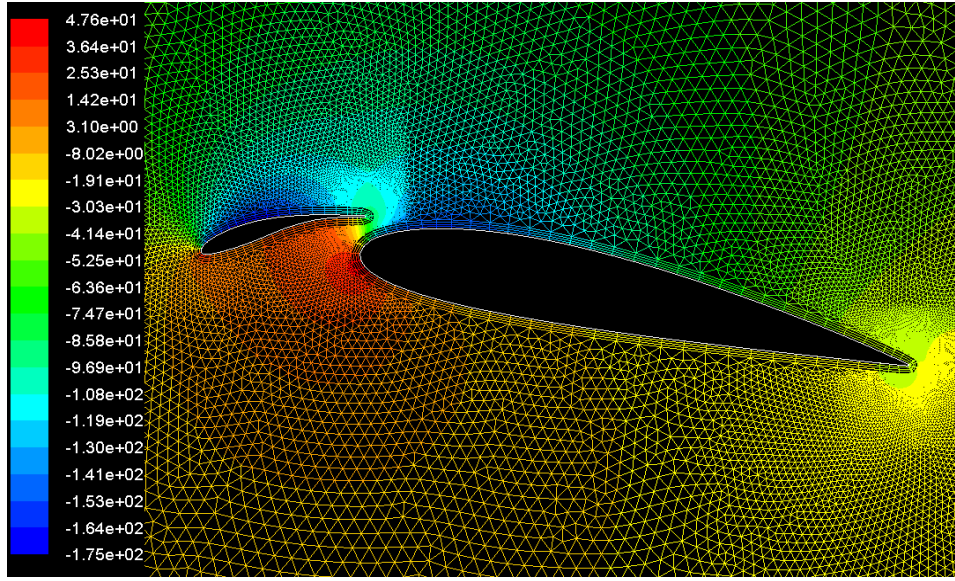
Statik basınç konturları, hava ortamında 1×10^5 Re sayısında, $h/c_1=0.165$ iken irdelendi.



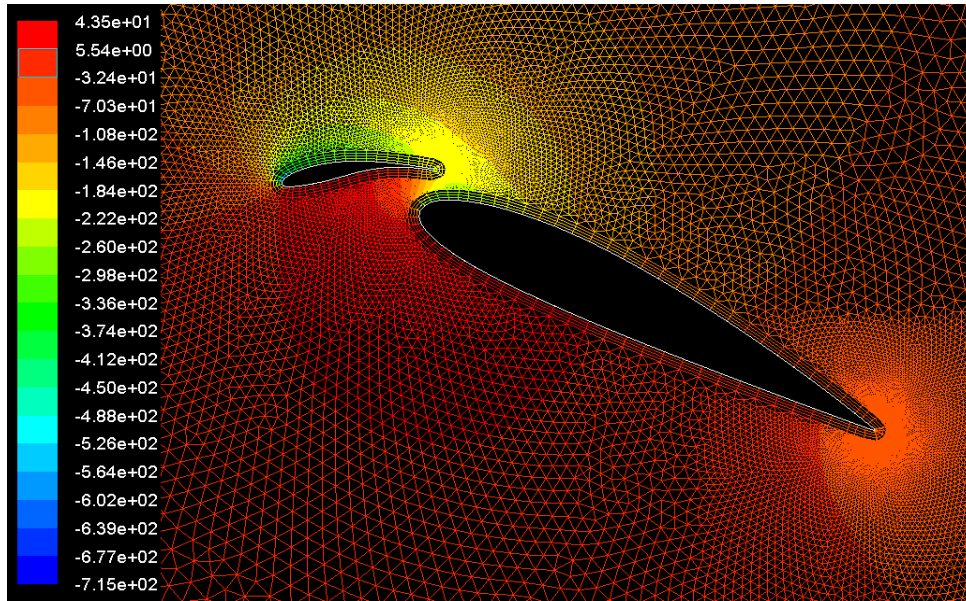
Şekil 4.2 : $\alpha = 0^\circ$ 'da ve $\delta = 21^\circ$ 'daki basınç konturu (Pa) ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

Kanat profilleri 0° hücum açısında slat açısı 21° iken, gelen rüzgarı ilk önce hücum kenarı karşılar ve yüksek basınç bölgesi oluşur. Şekil 4.2 'de görüldüğü gibi kanatın uç noktasında yüksek basınca maruz kalmaktadır. Kanatın uç kısmındaki hızın çok düşük olmasından dolayı burada basınç yüksektir. Fakat kanatların üst kısımlarında akışkanın hızın artması ile düşük basınç bölgeleri meydana gelmektedir. Yine aynı şekilde, alt kısımlarda da hızın düşük olması yüksek basınç bölgelerini oluşturmaktadır.

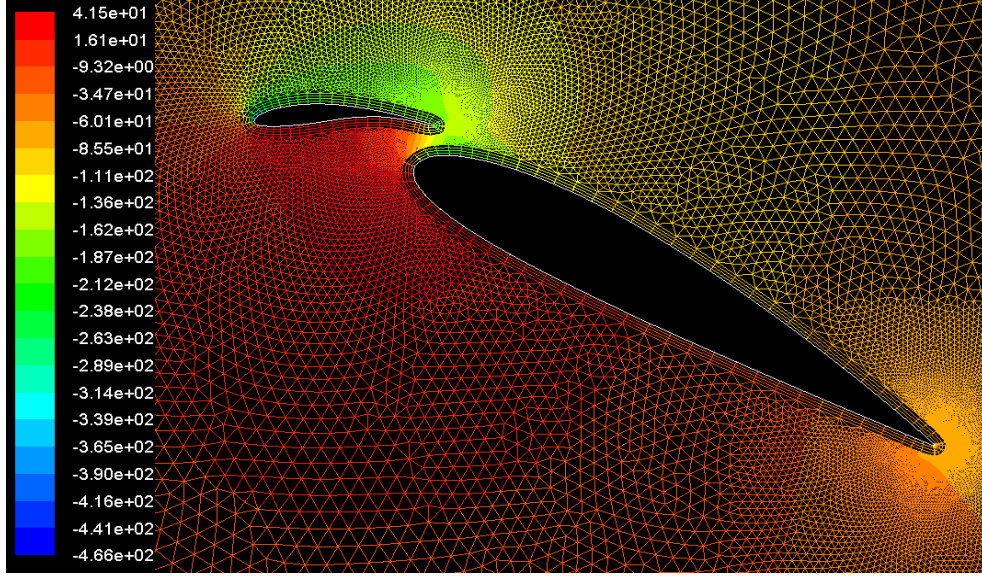
Hücum açısının artması ile Şekil 4.3'de ki 12° hücum açısında ve slat açısı 25° iken kanadın üstünde basınç düşüşünün arttığı ve alt kısımda basınç artışının olduğu görülmektedir. Hücum açısı tutunma açısına kadar arttırıldığında yani 27° hücum açısı ve slat açısı 33° iken Şekil 4.4' de görüldüğü gibi kanatların hücum kenarının hemen üst noktasından başlayan basınç düşmesi görülmektedir ve alt kısımdaki basınç artışıyla birlikte kanadın alt ve üst kısmında basınç farkı maksimum seviyeye ulaşip maksimum kaldırma kuvveti elde edildi.



Şekil 4.3 : $\alpha = 12^{\circ}$ 'de ve $\delta = 25^{\circ}$ 'daki basınç konturu (Pa) ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)



Şekil 4.4 : $\alpha = 27^{\circ}$ 'de ve $\delta = 33^{\circ}$ 'daki basınç konturu (Pa) ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

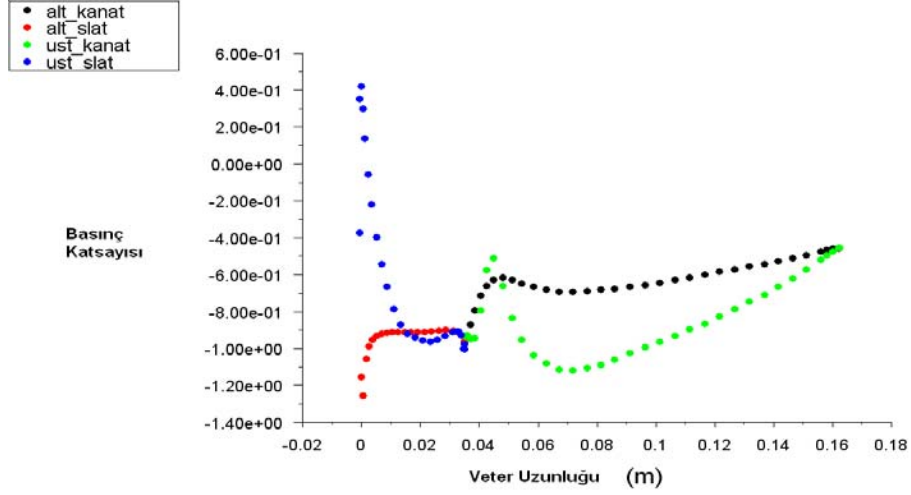


Şekil 4.5 : $\alpha = 30^\circ$ 'da ve $\delta = 35^\circ$ 'daki basınç konturu (Pa) ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

Daha sonra tutunma kaybına uğrayan kanat profili, Şekil 4.5'deki üst kısımda düşük basınç alanı bulunmaktadır. Fakat 27° hücum açılı konuma göre yani maksimum C_L değerinin olduğu açıdan sonra kanadın alt ve üst bölgesi arası basınç farkından daha azdır ve bu hücum açısından sonra kaldırma kuvveti giderek azalır.

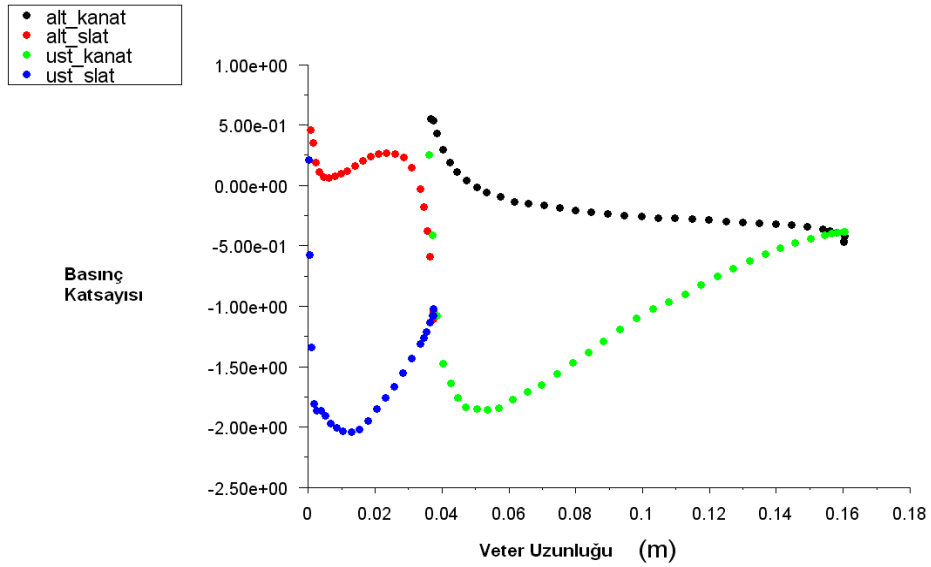
b. Slatlı kanat profilinin basınç katsayı dağılımları

Slatlı kanat profilinin basınç katsayı dağılımları kanat profili $h/c_1=0,165$ konumundayken basınç katsayısı dağılımları, hava akışında 1×10^5 Re sayısında ve hava ortamında maksimum C_L katsayısının olduğu, maksimum C_L/C_D oranının elde edildiği 0° , 12° , 27° , 30° hücum açıları, hücum açıları irdelendi. Şekiller incelendiğinde her kanat yüzeyi farklı renklerle gösterilmektedir. Şekillerde ki kırmızı slatın alt kısmını, mavi renk üst slatı, siyah renk alt ve yeşil renk ise üst kanata aittir.



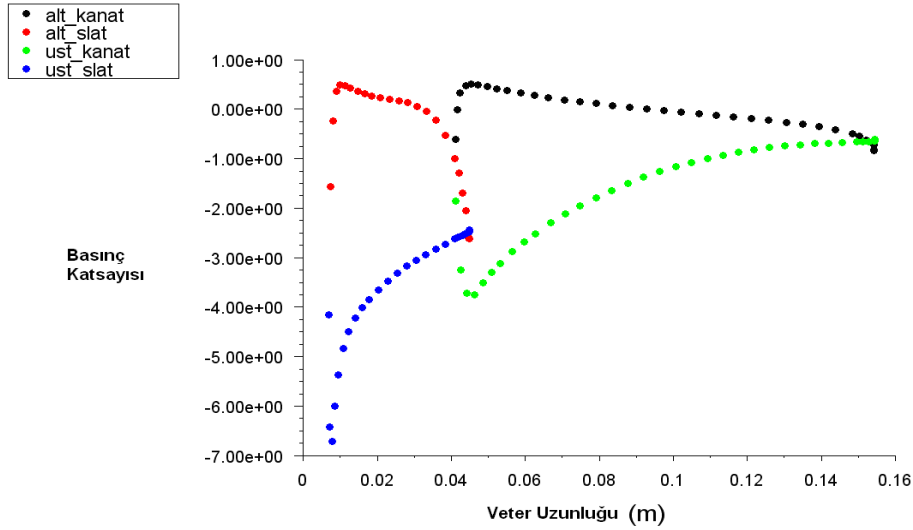
Şekil 4.6 : $\alpha = 0^\circ$ 'da ve $\delta = 21^\circ$ 'daki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

Şekil 4.6' da hava akışında 0° hücum açısında ve slat açısı 21° iken, kanadın hücum kenarında yüksek basınca maruz kaldığını görmekteyiz ve firar kenarına doğru gidildiğinde, kanatların üst kısımlarında basıncın giderek arttığını görülmektedir. Kanatların üst kısımlarında akışkanın hızının artması düşük basınç bölgelerini oluşturmaktadır. Alt kısımlarda da hızın düşük olmasından dolayı yüksek basınç bölgeleri oluşturmaktadır. Alt ve üst kanatlar arasındaki basınç farkı kaldırma kuvvetini oluşturmaktadır. Basınç farkı ne kadar fazlaysa o kadar kaldırma kuvveti de artmaktadır.

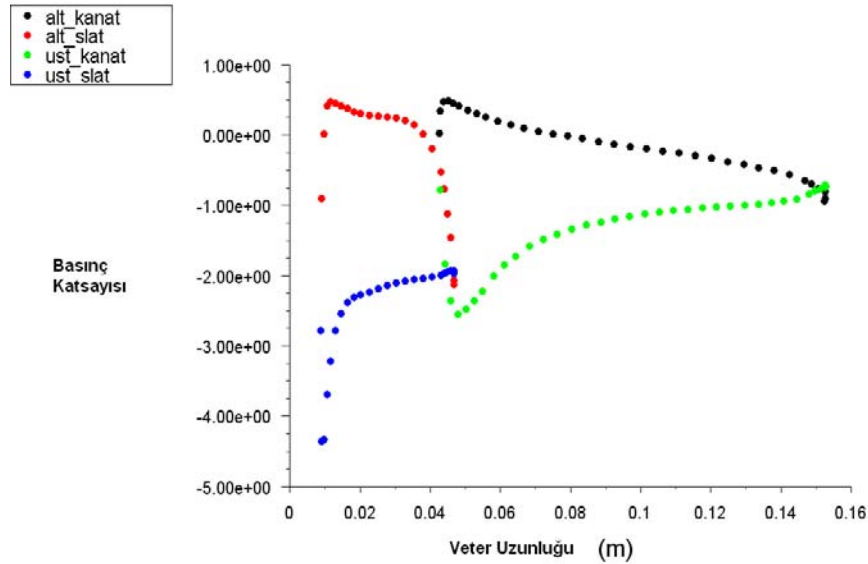


Şekil 4.7 : $\alpha = 12^\circ$ 'da ve $\delta = 21^\circ$ 'deki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

12° hücum açısına geçildiğinde Şekil 4.7’ de; slat ve kanadın üst bölgesinde hız alanları arttığından basınçta düşüş, alt bölgesinde hız alanları azaldığından basınçta büyük miktarda bir artış gözlemlendi. Şekil 4.8’de tutunma kaybı açısı olan 27° hücum açısında, slat ve kanadın üst bölgelerinde hız alanı daha fazladır, basınç katsayılarının daha da azaldığını, alt bölgelerinde buna zıt olarak basınç katsayılarının daha da arttığı görüldü.



Şekil 4.8 : $\alpha = 27^\circ$ ‘da ve $\delta = 33^\circ$ ‘deki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)



Şekil 4.9 : $\alpha = 30^\circ$ ‘da ve $\delta = 35^\circ$ ‘deki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

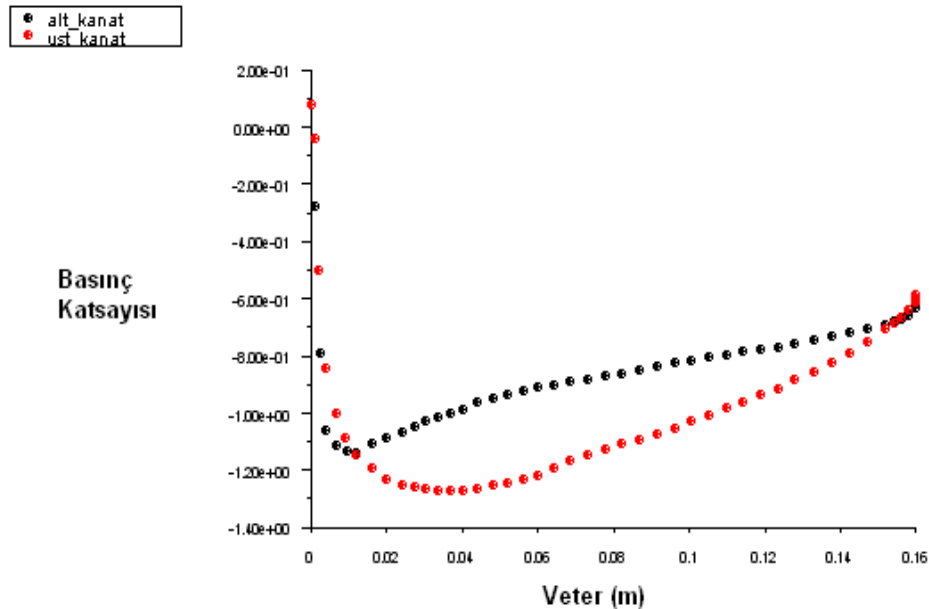
Şekil 4.9’da tutunma kaybı açısından sonra incelenen 30° hücum açısındaki basınç katsayı dağılımı incelendi. Şekil incelendiğinde, kanatların alt ve üst

yüzeyleri arasındaki basınç katsayı farkının 27° hücum açısına göre biraz daha az olduğu görülmektedir.

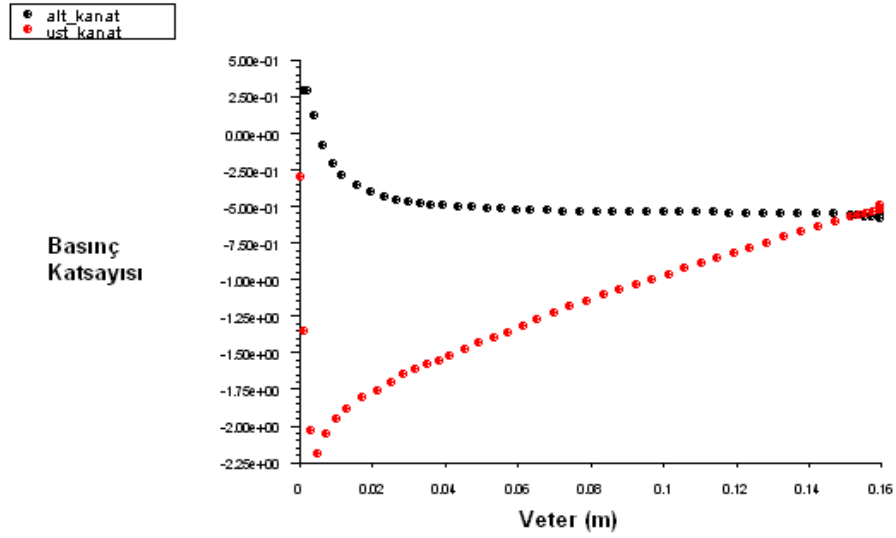
NACA 2415 slatsız kanat profili

Naca 2415 kanat profilinin performansını incelemek amacı ile kullandığımız slatın etkisini görmek amacı ile slatsız hali ile karşılaştırmalar yapıldı. Bu karşılaştırmayı, hava ortamında 1×10^5 Re sayısında yine hesaplanan kritik noktalarda yani, C_L/C_D oranının maksimum olduğu 6° hücum açısında, kaldırma katsayısının maksimum olduğu 12° hücum açısında incelendi.

0° hücum açısındaki performanslarını incelenecek olursa eğer, Şekil 4.10 'de uç kısmında hız değeri düşük olduğu için hem alt hem de üst kanat arsındaki basınç farkı negatif olmaktadır, fakat firar kenarına doğru gidildikçe kanatın üst kısmında hızın artması ile basınç düşerken, aynı zamanda alt kızımda hızın az olmasından dolayı basınç yüksektir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi, NACA2415 kanat profiline ait basınç katsayı farkı, slatlı halde ki kanat profili basınç katsayı farkından çok düşüktür. Bu da, kanatın slatlı hali daha fazla kaldırma kuvveti elde edileceğini ispatlar niteliktedir.

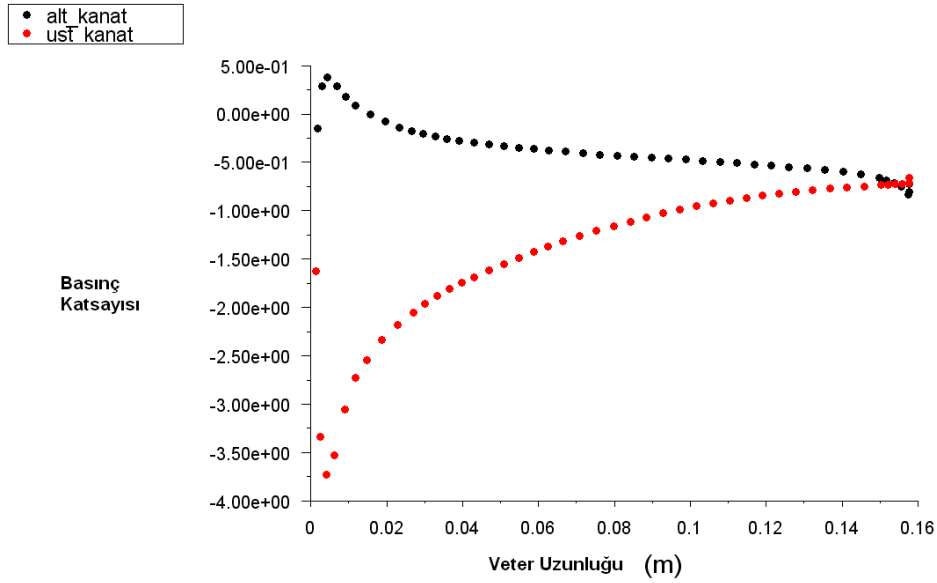


Şekil 4.10: $\alpha = 0^\circ$ 'daki basınç dağılımı ($Re = 1 \times 10^5$)



Şekil 4.11: $\alpha = 6^\circ$ 'daki basınç dağılımı ($Re=1 \times 10^5$)

6° hücum açısına geçildiğinde Şekil 4.11'yi incelediğimizde; kanadın üst bölgesinde hız alanları arttığından basınçta düşüş, alt bölgesinde hız alanları azaldığından basınçta büyük miktarda bir artış gözlemlenmektedir.



Şekil 4.12 : $\alpha = 12^\circ$ 'deki basınç dağılımı ($Re=1 \times 10^5$)

Şekil 4.12'de tutunma kaybı açısı olan 12° hücum açısında, kanadın üst bölgelerinde hız alanı daha fazladır, basınç katsayılarının daha da azaldığını, alt bölgelerinde buna zıt olarak basınç katsayılarının daha da arttığını görmektedir.

Değerlendirilme yapıldığında düşük hücum açılarında slatsız kanat profilini basınç farklarının daha yüksek olduğu, buna bağlı olarak da bu basınç farkının artmasının kaldırma kuvvetine etki etmektedir. Fakat yüksek hücum açılarında basınç farkının slatlı kanatlarda daha da arttığı gözlenmektedir. Hücum açısındaki artışla slatlı kanadın performansının arttığı görülmektedir ve kaldırma katsayıda artmaktadır.

4.1.1.3. Slatlı kanat profilinin aerodinamik kuvvet analizi

Kanatlar arası mesafenin $h/c_1=0.125$, $h/c_1=0.145$, $h/c_1=0.165$ ve $h/c_1=0.185$ olduğu durumlar için, hava akışında 1×10^5 Re, sayılarında değişik hücum açılarında ve 25° sabit slat açısında aerodinamik analizler yapıldı. Bu analizin amacı optimum h/c_1 oranının belirlenmesidir

Çizelge 4.1: Farklı hücum açılarında ve $\delta_{sbt}=25^\circ$ 'deki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.125$, $Re=1 \times 10^5$)

$h/c_1 = 0.125$			
Hücum Açısı	C_L	C_D	C_L/C_D
0	0,11643	0,05090	2,28718
6	0,59638	0,05694	10,47383
9	0,99345	0,05876	16,90691
12	1,26671	0,05967	21,22865
18	1,68379	0,10041	16,76915
21	1,74658	0,16168	10,80269
24	1,58419	0,25269	6,26943

Çizelge 4.2: Farklı hücum açılarında ve $\delta_{sbt}=25^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.145$, $Re=1 \times 10^5$)

$h/c_1 = 0.145$			
Hücum Açısı	C_L	C_D	C_L/C_D
0	0,13218	0,04929	2,68159
6	0,62605	0,05213	12,00917
9	1,11586	0,05419	20,59056
12	1,39137	0,05745	24,21798
18	1,89072	0,10500	18,00607
21	2,01525	0,16081	12,53201
24	1,81727	0,29854	6,08725

Çizelge 4.3: Farklı hücum açılarında ve $\delta_{sbt}=25^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

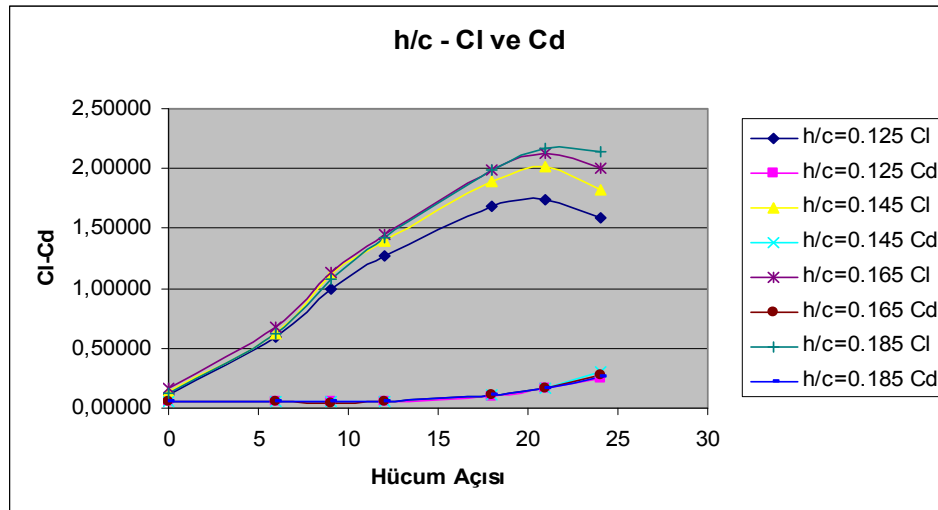
$h/c_1 = 0.165$			
Hücum Açısı	C_L	C_D	C_L/C_D
0	0,16301	0,05621	2,89979
6	0,67889	0,05073	13,38236
9	1,13416	0,04676	24,25504
12	1,44677	0,05627	25,71031
18	1,99204	0,10700	18,61677
21	2,13156	0,16595	12,84481
24	2,00404	0,27237	7,35787

Çizelge 4.4: Farklı hücum açılarında ve $\delta_{sbt}=25^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.185$, $Re=1 \times 10^5$)

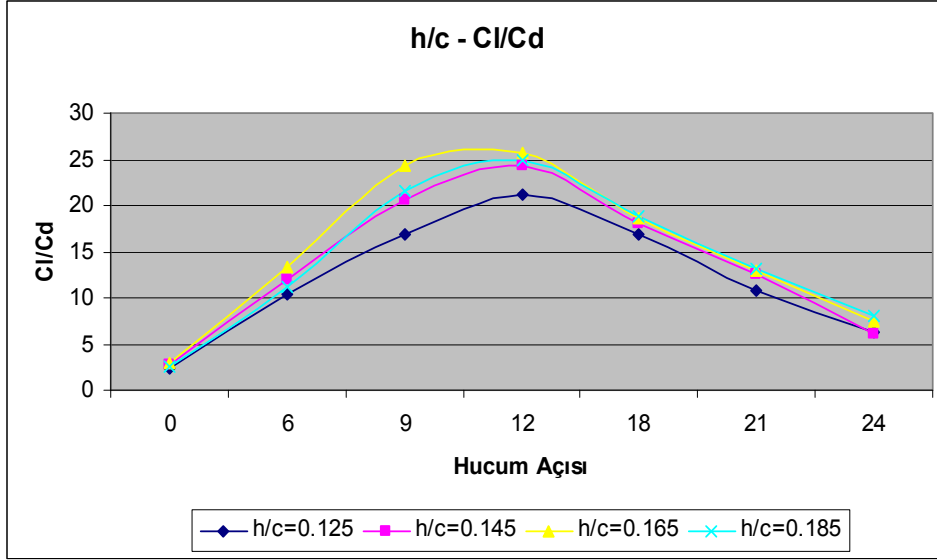
$h/c_1 = 0.185$

Hücum Açısı	C_L	C_D	C_L/C_D
0	0,13079	0,05064	2,58260
6	0,62802	0,05597	11,22073
9	1,08391	0,05047	21,47579
12	1,42111	0,05728	24,81004
18	1,99421	0,10606	18,80305
21	2,16763	0,16447	13,17922
24	2,13579	0,26580	8,03545

Yukarıda verilen çizelgelerdeki verileri kullanarak, Şekil 4.13 ve 4.14'de ki $h/c_1 - C_L$ ve C_D ile C_L/C_D değerleri grafiklere geçirildi. Şekil 4.13'de farklı hücum açılarında C_L ve C_D değerleri incelendi. Grafik incelendiğinde maksimum kaldırma kuvveti değeri 25^0 sabit slat açısında 2.17 olarak h/c_1 değeri 0.185'de iken elde edildi.



Şekil 4.13 : Farklı hücum açılarında hava akışında $\delta_{sbt}=25^0$ 'deki farklı $h/c_1 - C_L$ ve C_D değerleri grafiği ($Re=1 \times 10^5$)

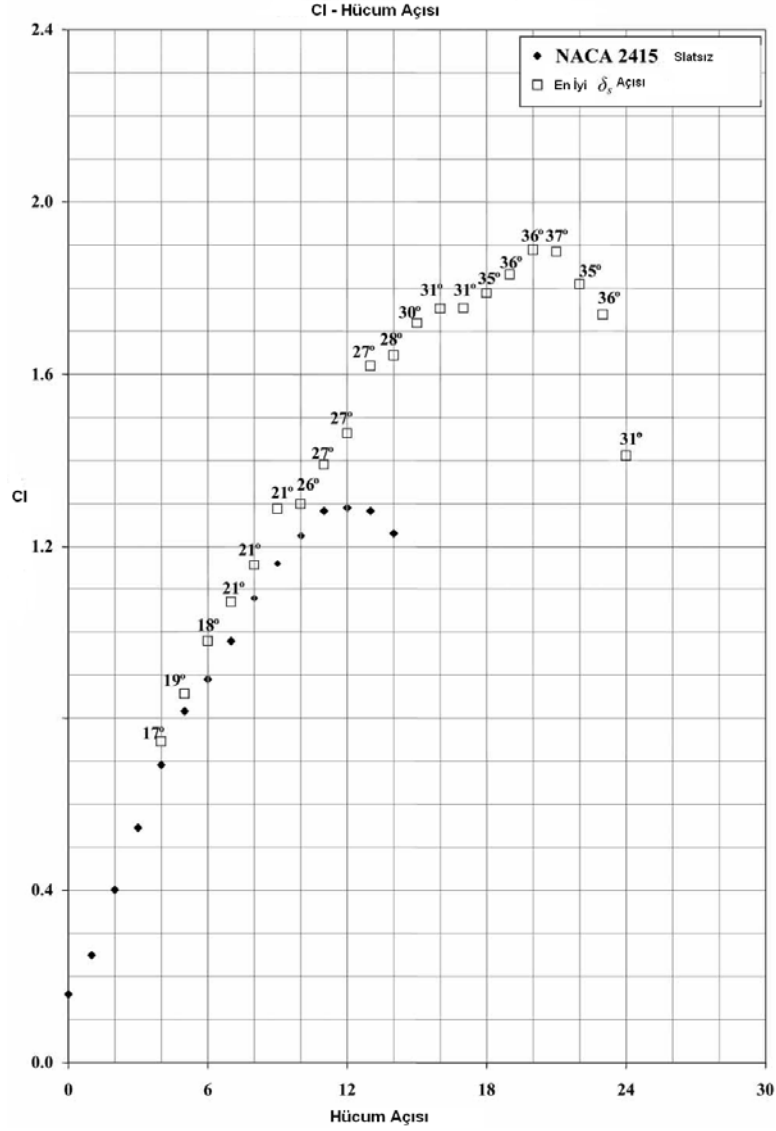


Şekil 4.14 : Farklı hücum açılarında hava akışında $\delta_{sbt}=25^{\circ}$ 'deki farklı $h/c_1 - C_L/C_D$ değerleri grafiği ($Re=1 \times 10^5$)

Kanat profili dizayn edilirken genelde C_L/C_D oranının maksimum olduğu andaki hücum açısı seçilir [37]. Şekil 4.14 incelendiğinde maksimum C_L/C_D değeri h/c_1 değeri 0.165'de 12° hücum açısında 25.71 olarak bulundu ve $h/c_{1,opt}$ değeri 0.165 olarak alındı.

Optimum h/c_1 oranı belirlendikten sonra diğer bir parametre olan slat açısının optimum olduğu açının belirlenmesi çalışmaları yapıldı. Bu çalışmada ise $h/c_{1,opt}$ değeri yani 0.165 sabit tutularak slatın kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvvet katsayıları ve bunların birbirlerine oranı üzerindeki performansı incelendi. Slat açısı 21° ve 35° arasında değiştirildi ve her hücum açısında ki optimum slat açıları belirlendi.

Fakat önce Genç ve arkadaşlarının daha önce slatlı kanatlar üzerinde rüzgar tüneline yaptıkları deneylerle kıyaslandı. Yapılan çalışmanın doğruluğunun bir kanıtı olması açısından yapılan bu kıyaslama oldukça önemlidir. Yapılan sayısal çalışmalar, Şekil 4.15 'de görülen değerlerle kıyaslandı.



Şekil 4.15 : NACA22 hücum kenarı slatlı NACA2415 kanat profili deneysel taşıma katsayısının hücum açısı ile değişimi

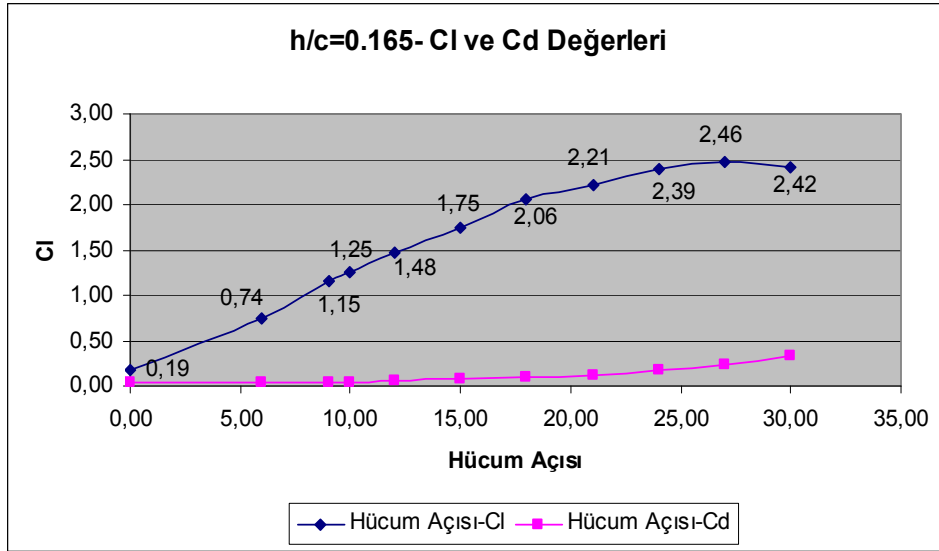
Şekil 4.15 ve 4.16 incelenip karşılaştırıldığına hücum açısının artması slatlı kanat profillerinde kaldırma kuvvetinin arttığı gözlenmektedir. Genç ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışma deneysel bir çalışma olmasından dolayı yaptığımız çalışmanın doğruluğunu kanıtlamak için önemli bir referanstır. Şekil 4.15 incelendiğinde maksimum kaldırma kuvveti 20° hücum açısında yaklaşık olarak 1.9 civarındadır. Bizim çalışmamızda ise bu değer 2.46 değerine kadar çıkarılmıştır. Fakat çalışmış olduğumuz R_e sayısının farklı olması ve hesaplamalarda kullanılan FLUENT™ HAD programında farklı türbülans benzeşim modelleri kullanılması bu değerın değişmesine sebep olabilir. Fakat kullanılan slatın etkisi açıkça görülmektedir.

Çizelge 4.5: Farklı hücum açılarında ve optimum slat açısındaki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

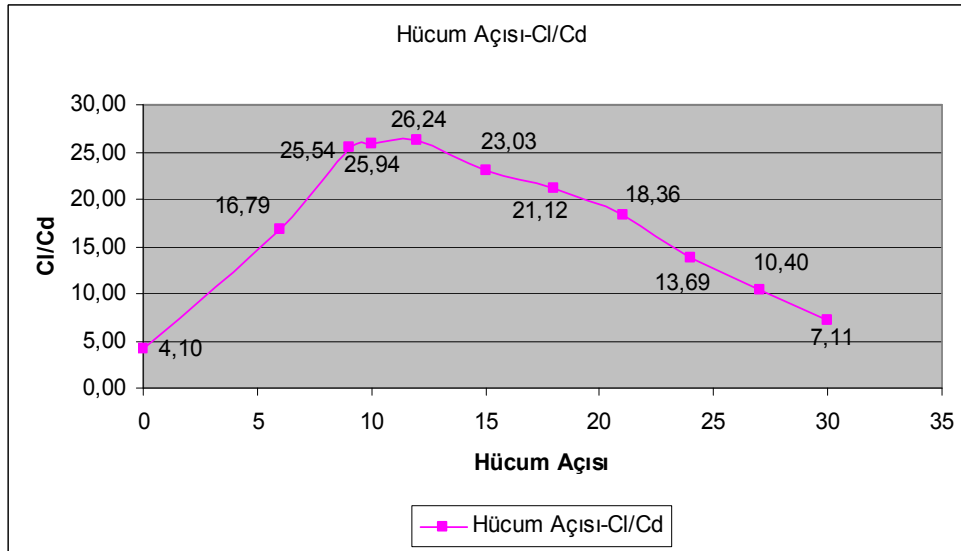
$h/c_1 = 0.165$				
<u>Hücum Açısı</u>	<u>Optimum Slat Açıları</u>	<u>C_L</u>	<u>C_D</u>	<u>C_L/C_D</u>
0	21	0,18519	0,045164	4,10036
6	21	0,74237	0,044224	16,78663
9	23	1,15159	0,045095	25,53683
10	25	1,25120	0,04824	25,93859
12	25	1,47677	0,056272	26,24343
15	25	1,74670	0,075861	23,02504
18	27	2,05965	0,097504	21,12378
21	31	2,21134	0,120455	18,35821
24	31	2,38940	0,17458	13,68656
27	33	2,46430	0,23688	10,40316
30	35	2,42080	0,34047	7,11017

Yukarıda verilen çizelgelerdeki verileri kullanarak, Şekil 4.16 ki $h/c_1=0.165$ - C_L ve C_D değerleri grafiklere geçirildi. Şekil 4.16'de farklı hücum açılarında C_L ve C_D değerleri incelendi. Grafik incelendiğinde maksimum kaldırma kuvveti değeri 2.46 olarak 27° hücum açısında ve 33° slat açısında elde edildi.

Dizayn parametresi olan C_L/C_D oranının maksimum olduğu andaki hücum açısı Şekil 4.17 incelendiğinde, maksimum C_L/C_D değeri, $h/c_{1,opt}$ değeri 0.165'de iken 12° hücum açısında ve 25° slat açısında 26.24 olarak bulundu.

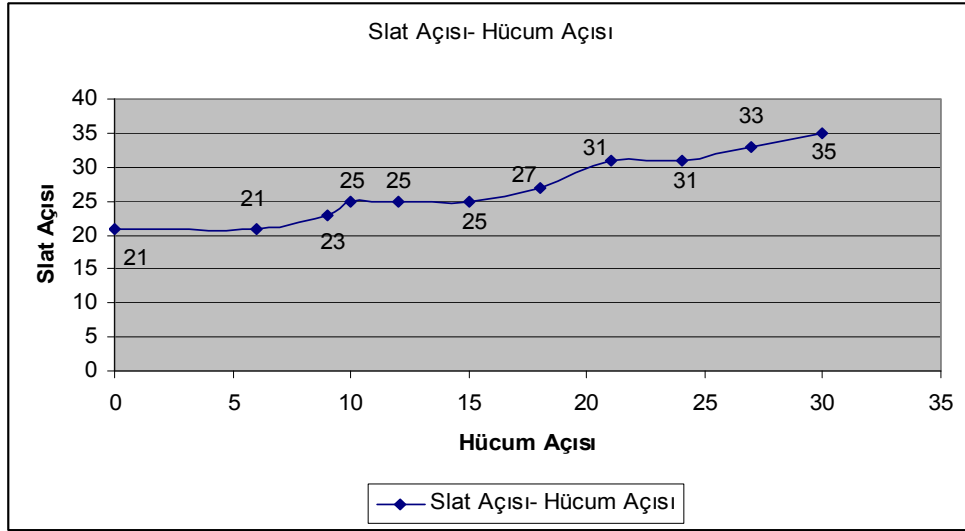


Şekil 4.16: Farklı hücum açılarında ve optimum slat açısındaki C_L ve C_D değerleri grafiği ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)



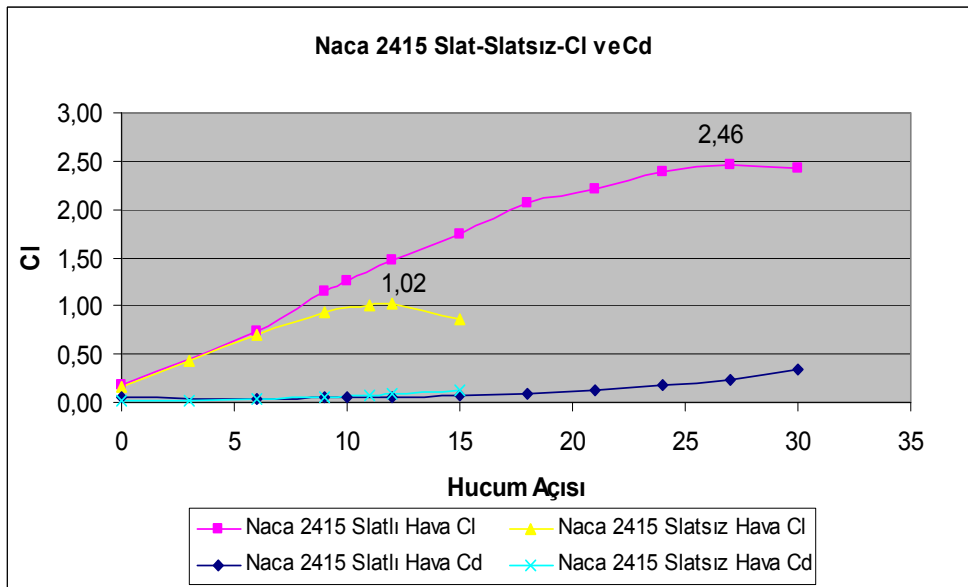
Şekil 4.17: Farklı hücum açılarında ve optimum slat açısındaki C_L ve C_D değerleri grafiği ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

Slatın hareketi kaldırma kuvveti katsayısı etkilediği Şekil 4.18 incelendiğinde görülmektedir. Yine Genç ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışma incelendiğinde Şekil 4.15 görüldüğü gibi hücum açısının artması ile slat açısı da artmaktadır. Bizim yapmış olduğumuz çalışmada da hücum açısının artması ile slat açısı artmaktadır.



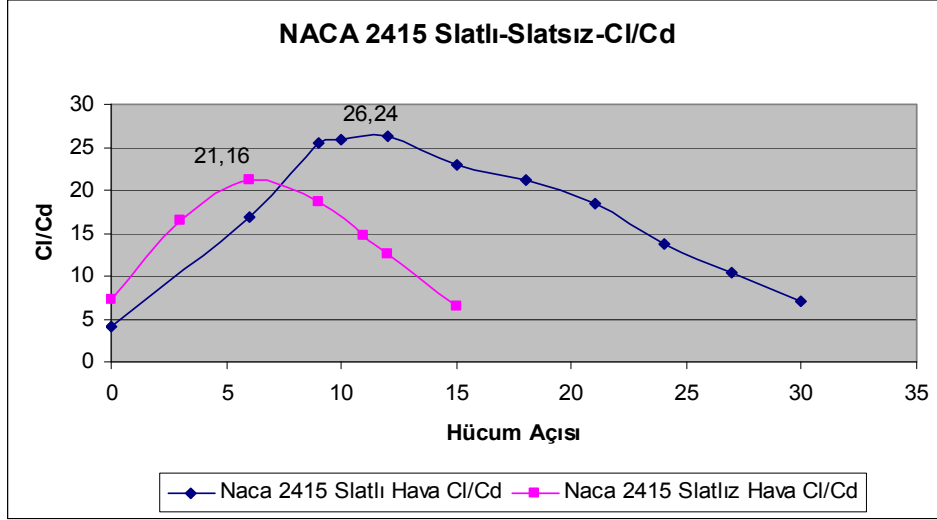
Şekil 4.18: Farklı hücüm açılarında optimum slat açıları grafiği ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

Yapılan çalışmanın gerekliliği ve performansını incelemek için sayısal çalışmada kullanılan NACA2415'in slatlı ve slatsız durumda ki C_L ve C_D değerleri Şekil 4.19'da görülmektedir. Şekil incelendiğinde kanadın slatsız halinde maksimum kaldırma kuvveti 1.02 olarak bulundu. Slatlı NACA 2415 kanadı incelendiğinde ise bu değer 2.46 olarak elde edildi. Slatın kaldırma kuvvetine etkisi de yapılan sayısal çalışma ile belirlenmiş oldu.



Şekil 4.19 : Slatlı ve slatsız NACA2415'in hava akışında farklı hücüm açılarında C_L ve C_D değerleri grafiği ($Re=1 \times 10^5$)

Dizayn parametresi olan C_L/C_D oranının slatlı ve slatsız NACA2415 kanatın değerleri karşılaştırıldığında Şekil 4.20 bakılırsa, maksimum C_L/C_D değeri slatlı kanatta hava akışında 1×10^5 Re sayısında 26,24 iken, slatsız kanatta da değer 21.16 olarak bulundu.



Şekil 4.20 : Slatlı ve slatsız NACA2415'in hava akışında farklı hücum açılarında C_L/C_D değerleri grafiği ($Re=1 \times 10^5$)

a. Hava ortamında elde edilen kanat kesit açıları

FLUENT™ programı analizi ile elde edilen sonuçlara göre, kanat profili dizayn edilirken genelde C_L/C_D oranının maksimum olduğu andaki hücum açısı seçilir. Sonuçlar incelendiğinde bu değer 1×10^5 Re sayısında, $h/c_1=0,165$ konumlarında 12° hücum açısında olduğu bulundu.

Kanat elemanı momentum teorisi kullanılarak elde edilen denklemi ile bulunan rüzgarın geliş açısı (φ) ile sayısal analizi ile elde edilen optimum hücum açısının (α) farkı bize kanat kesitinin burulma açısını verecektir. Aşağıda Çizelge 4.6'da verilen hava ortamında, sonuçlar incelendiğinde bu değer 1×10^5 Re sayısında, $h/c_1=0,165$ konumlarında 12° hücum açısında olduğu bulundu. Buna göre kanat üzerindeki diğer açılar da elde edildi.

Çizelge 4.6 $\alpha = 12^\circ$ ve $\delta = 25^\circ$ 'deki kanat kesit açıları ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

$h/c_1=0.165$							
r (m)	r/R	λ_r	φ	$\alpha(0)$	$\Theta_p = \varphi - \alpha$	$\Theta_{p,o}$	$\Theta_T = \Theta_p - \Theta_{p,o}$
0,05	0,1	0,5	42,29	12	30,29	-4,46	34,75
0,1	0,2	1	30	12	18	-4,46	22,46
0,15	0,3	1,5	22,46	12	10,46	-4,46	14,92
0,2	0,4	2	17,73	12	5,73	-4,46	10,19
0,25	0,5	2,5	14,53	12	2,53	-4,46	6,99
0,3	0,6	3	12,29	12	0,29	-4,46	4,75
0,35	0,7	3,5	10,63	12	-1,37	-4,46	3,09
0,4	0,8	4	9,36	12	-2,64	-4,46	1,82
0,45	0,9	4,5	8,35	12	-3,65	-4,46	0,81
0,5	1	5	7,54	12	-4,46	-4,46	0

4.1.1.4. Hava ortamında elde edilen güç hesabı

Bu bölümde NACA2415 ve NACA22'li halinin 1×10^5 Re sayısında performansı incelendi. Elde etmiş olduğumuz aerodinamik sonuçlar Çizelge 4.7'de ki değerleri elde edildi.

Çizelge 4.7 : Slatlı ve slatsız NACA2415'in hava akışında elde edilen aerodinamik sonuçlar ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

Hava Ortamında $h/c=0.165$			
$Re= 1 \times 10^5$ (12 m/s)	Uç Hız Oranı (λ)	$(C_L/C_D)_{max}$	$(C_L/C_D)_{max}$ Hücum Açısı
NACA 2415	5	21,17	6
NACA2415+NACA22	5	26,24	12

Yapılan bütün çalışmalarda $C_L/C_{D,max}$ 'ın bulunduğu açının öneminden bahsedildi ve güç hesabında da bu değer oldukça önemlidir. Eşitlik 3.9'da da görüleceği gibi $C_{p,max}$ değeri için önemli bir parametredir. Bu değeri ne kadar arttırsak o kadar fazla güç elde edilir.

Çizelge 4.8 : Slatsız NACA2415 kanat profilinin hava ortamında Güç,İtki ve Tork değerleri ($Re=1 \times 10^5$)

$Re= 1 \times 10^5$ (12 m/s)	
Naca 2415	
Açısal Hız (Ω)	120 rad/sn = 1146 rpm
Güç (P)	305,23 kW
Net Güç ($\eta_{mek} = 0.9, \eta_{jen} = 0.85$)	233,50 kW
İtki Kuvveti (T)	29,04 N
Tork (Q)	1,27 N.m

Çizelge 4.9 : Slatlı NACA2415 kanat profilinin hava ortamında Güç,İtki ve Tork değerleri ($h/c_1=0.165, Re=1 \times 10^5$)

$Re= 2,53 \times 10^5$ (12 m/s)	
NACA 2415+NACA22	
Açısal Hız (Ω)	120 rad/sn = 1146 rpm
Güç (P)	335,7 kW
Net Güç ($\eta_{mek} = 0.9, \eta_{jen} = 0.85$)	256,8 kW
İtki Kuvveti (T)	32,62 N
Tork (Q)	1,40 N.m

Çizelge 4.8 ve 4.9’de ki güç değerleri incelendiğinde NACA22 kanadı eklenmiş halde ki güç değerinin %10 kadar daha yüksek olduğunu görüldü.

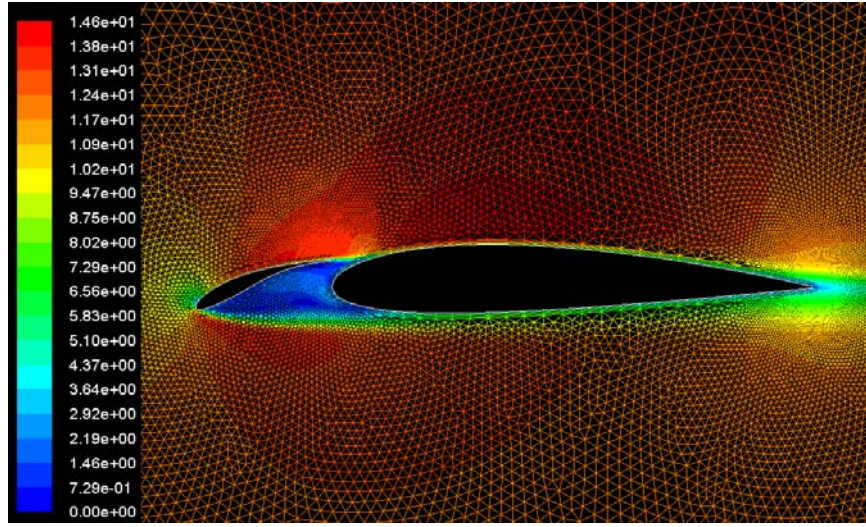
4.1.1.5. Hava ortamında kanat profilinin akış karakteristikleri

Bu bölümde kanat kesitinin akış karakteristikleri incelendi ve kanat üzerindeki hız dağılımları, akım çizgileri oluşturma, türbülans şiddetleri ve vorteks kopma frekansları belirlendi.

a. **Slatlı kanat profilinin kanat üzerinde oluşan hız konturları**

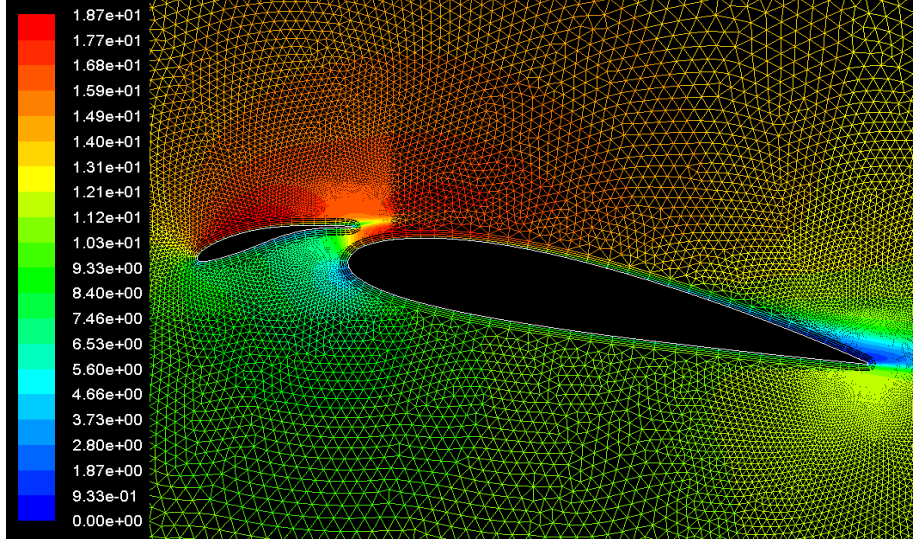
Her iki kanadı da incelerken alınan sonuçlarda ki kritik noktaların hız konturlarını incelendi. Bunlar kaldırma kuvvetinin maksimum olduğu, C_L/C_D oranının maksimum olduğu yerlerdir. Slatlı kanat için, hava ortamında 1×10^5 Re sayısında $0^\circ, 12^\circ, 27^\circ$ ve 30° hücum açılarındaki hız konturlarıdır. Daha sonra slatsız Naca 2415 kanat profili için, hava ortamında 1×10^5 Re sayısında $0^\circ, 6^\circ, 12^\circ$ hücum açılarındaki hız konturlarını incelendi.

Kanatların alt taraflarında ki hızın az olmasından dolayı yüksek basınç, üst taraftaki hızın yüksek olmasından dolayı da üst tarafta ki basıncın düşüktür. Bu oluşan basınç farkından dolayı da kaldırma kuvveti oluşmaktadır. Bu fark hücum açısının artması ile artarken belirli bir hücum açısından sonra kanadın firar kenarından ayrılmalar oluşacağından kanadın üst kısmındaki hız düşer ve basınçta artma gözlenmektedir. Basıncıdaki düşüş sonucunda ise kaldırma kuvvetinde düşüş görülmektedir.

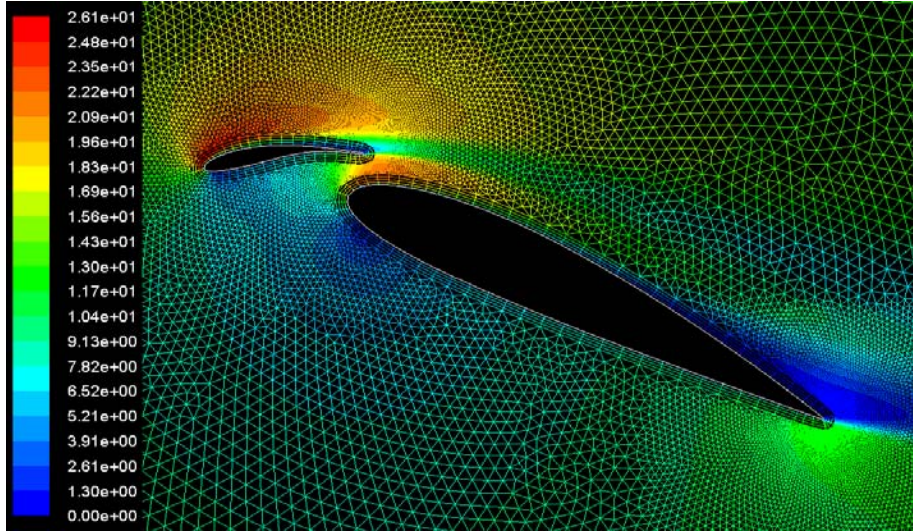


Şekil 4.21 : $\alpha = 0^\circ$ 'da ve $\delta = 21^\circ$ 'deki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

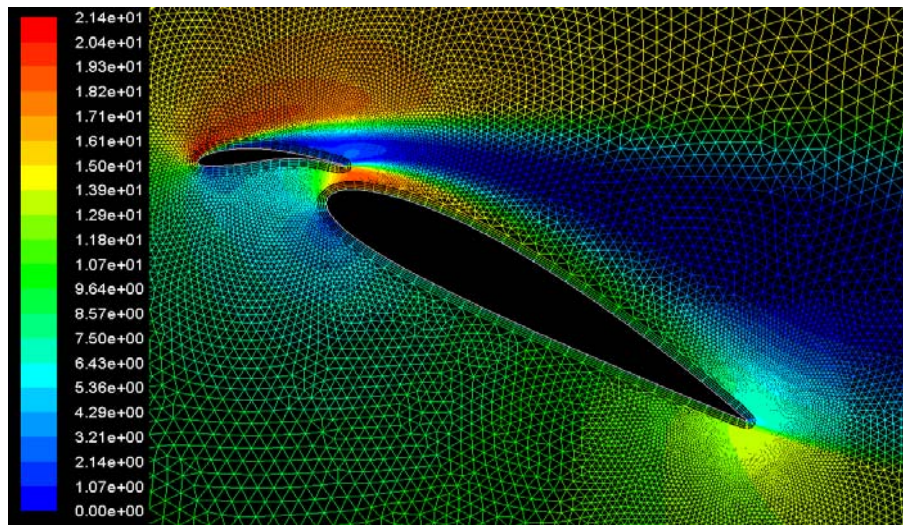
Hava ortamındaki hız konturlarını incelenirse, Şekil 4.21 de 0° hücum açısında 1×10^5 Re sayısında yani 12 m/s hızda maksimum hızın 14.6 m/s'ye çıktığını görülmektedir. Kanadın alt kısmında ve slatın belirli yerlerinde hızın oldukça düşük olduğu hatta bazı bölgelerde 0 m/s kadar inmektedir. C_L/C_D katsayısının maksimum olduğu Şekil 4.22 de 12° hücum açısında bu hız 18.7 m/s ye, C_L (kaldırma kuvveti)'nin maksimum olduğu Şekil 4.23 'da 27° hücum açısına geldiğinde ise bu hız 22.6 m/s'ye kadar çıkmaktadır. Bu da hücum açısının artması ile hızlarında arttığını göstermektedir. Fakat yüksek hücum açılarında kanattan ayrılmalar meydana geldiği için kaldırma kuvvetinde azalmalar meydana gelecektir. Fakat tutunma açısından sonra Şekil 4.24 incelendiğinde 21.4 m/s' ye düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.22 : $\alpha = 12^{\circ}$ 'de ve $\delta = 25^{\circ}$ 'daki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)



Şekil 4.23 : $\alpha = 27^{\circ}$ 'de ve $\delta = 33^{\circ}$ 'deki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

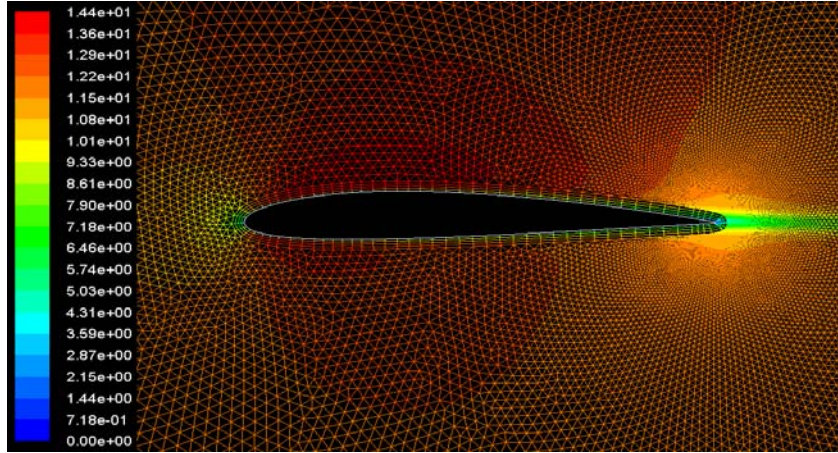


Şekil 4.24 : $\alpha = 30^{\circ}$ 'da ve $\delta = 35^{\circ}$ 'deki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

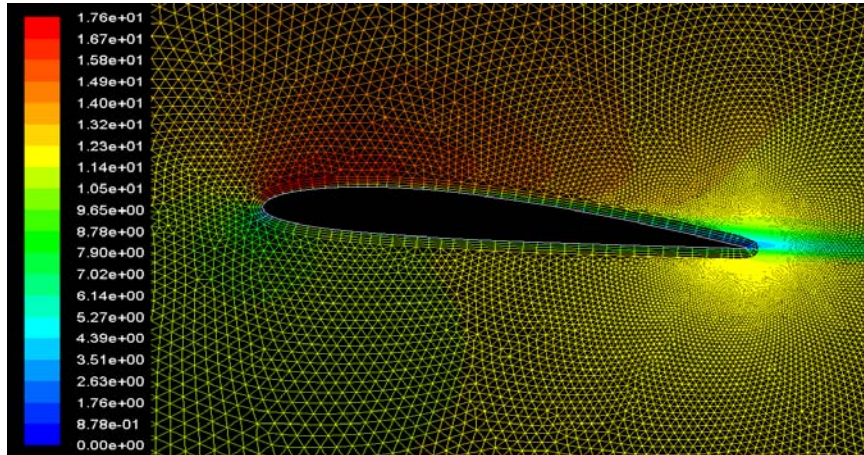
2415 Slatlı kanadının hız konturları

Naca 2415 kanat profilinin performansını incelemek amacı ile kullandığımız slatın etkisini görmek amacı ile slatlı hali ile karşılaştırmalar yapıldı. Bu karşılaştırmayı, hava ortamında 1×10^5 Re sayısında yine hesapladığımız kritik noktalarda yani, C_L/C_D oranının maksimum olduğu 6° hücum açısında, kaldırma katsayısının maksimum olduğu 12° hücum açısında incelendi.

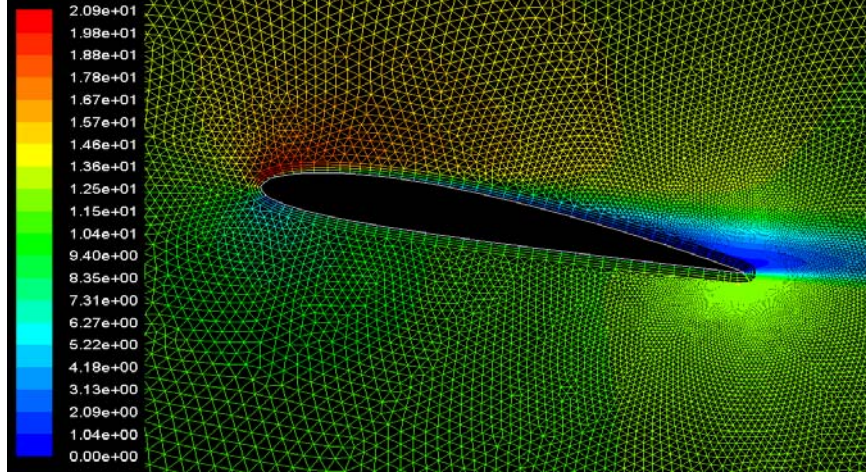
Slatlı kanatta 0° hücum açısında max hız değeri 14.6 m/s iken Şekil 4.25' de görüldüğü gibi 14.4 m/s'dir. Bu değer az olmasının nedeni slatın akış yönünü kanadın üst kısmına doğru yönlendirerek hızın artması ve akışın düzenli olmasını sağlamak olarak yorumlanabilir. Hücum açısı arttıkça hem performans hem de hızlar atmaktadır. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27 incelediğimizde slatlı kanatta yine hızların biraz daha düşük olduğunu görülmektedir.



Şekil 4.25 : $\alpha = 0^\circ$ 'daki hız konturu ($Re=1 \times 10^5$)



Şekil 4.26 : $\alpha = 6^\circ$ 'daki hız konturu ($Re=1 \times 10^5$)



Şekil 4.27 : $\alpha = 12^\circ$ 'deki hız konturu ($Re=1 \times 10^5$)

Performanslar karşılaştırıldığında tutunma açısında yani C_L 'nin maksimum olukları açılarda slatlı kanadın üst kısmındaki hız slatsız kanada göre daha fazladır ve yine kanadın alt kısmında slatlı kanatta hızın 0 m/s' ye kadar düştüğü fakat slatsız kanat profilinde bu değer daha yüksektir. Bu durum slatlı kanatlarda akışın daha kontrollü olduğunu ve basınç farkını da arttırarak kaldırma kuvvetinin daha yüksek olmasına neden olmaktadır.

b. Slatlı kanat profilinin kanat üzerinde oluşan akım çizgileri

Slatlı kanat profili hava ortamında $h/c_{1,opt} = 0,165$ konumundayken, hava akışında 1×10^5 Re sayısında 0° , 12° , 27° ve 30° hücum açılarında akım çizgileri irdelendi. Ayrıca NACA2415 kanat profili için, hava akışında 1×10^5 Re sayısında 0° , 6° , 12° ve 15° hücum açılarında akım çizgileri irdelendi ve slatlı kanat profili ile karşılaştırıldı.

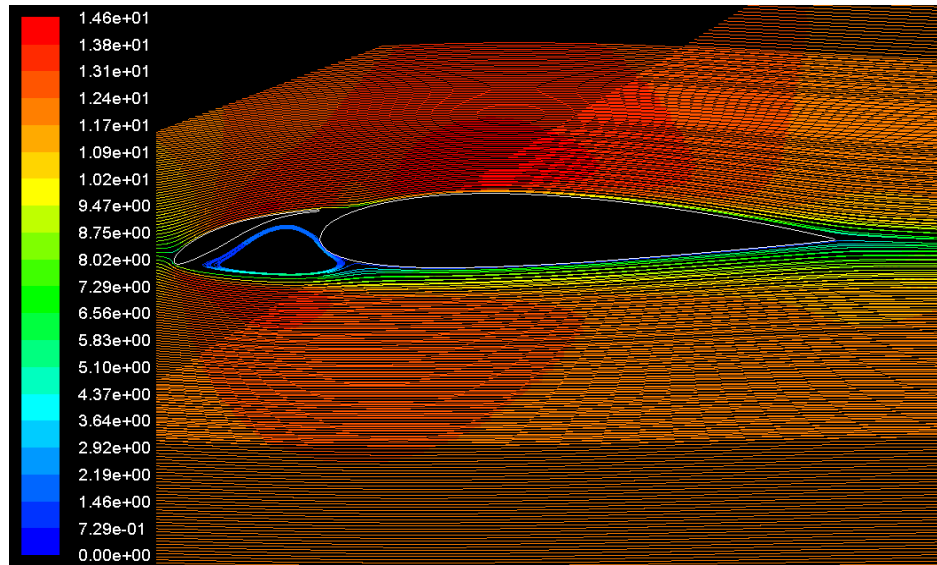
Ayrılma kabarcığına sebep olarak; düşük Re sayılı akışlarda laminar akım viskoz kuvvetlerin etkisi ile türbülanslı akıma çok çabuk geçmeye başlaması gösterilir. Türbülansa geçiş bölgesinde, viskoz etkiler ve ters basınç gradyanlarının üstesinden gelemez laminar sınır tabaka ayrılması ve ayrılma kabarcığı meydana gelir. Bu kabarcıkta geri akışlar ve akımın geliş yönüne ters hız profilleri oluşur. Ayrılma kabarcığından sonra basınç toparlanmaya ve kanada tekrar tutunmaya çalışır. Bu da, türbülansa geçiş bölgesinde akış gelişip türbülanslı olunca da türbülanslı akışın yeterli enerjisi ile yüzeye tekrar tutunur. Akımın kanada

tutunması ile birlikte akış yüzeye yaklaşır ve türbülanslı ayrılma olana kadar akışa düzgün bir şekilde devam eder.

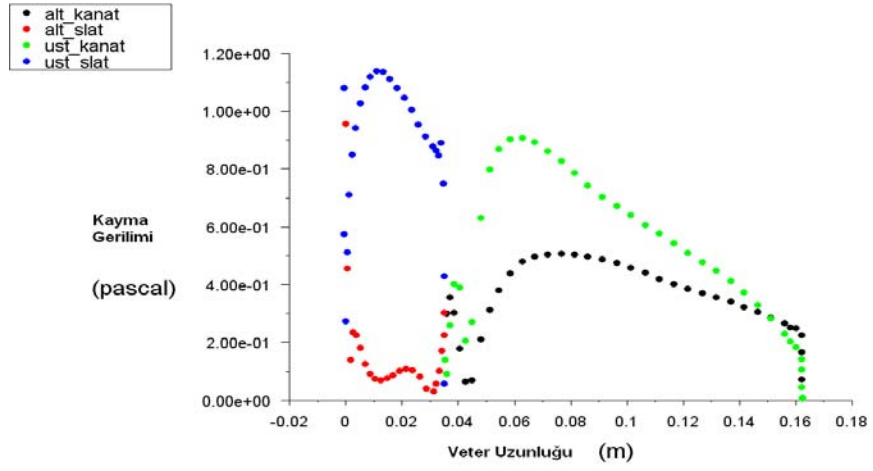
Bu bölümde; kanat profilleri üzerindeki laminer ayrılma kabarcığının nerede oluştuğunu ve kanadın hangi hücum açısından sonra türbülanslı ayrılmaya geçtiğini görebilmek için kanat üzerine akım çizgileri gönderildi. Akım çizgileri, kanadın üzerinde ve arka kısmında, doğru şekilde ayrılma olayını gösterebilmektedir. Ayrıca bu laminer ayrılma kabarcığı ve akış ayrılmaları cidar kayma gerilmesi grafiğinden de elde edilebilmektedir. Cidar kayma gerilmesinin ($Z_w=0$) sıfır olduğu durumda kanat profili üzerinde laminer ayrılma kabarcığının olduğu ya da türbülanslı ayrılmaya girdiğinin kanıtıdır [39].

Şekil 4.28'da hava ortamındaki 0° hücum açısında; slat ile kanat arasındaki boşluktan dolayı bir laminer ayrılma kabarcığının oluştuğunu görüldü. Bu da daha önce bahsedildiği gibi daha sonra kanada tekrar yapışacaktır.

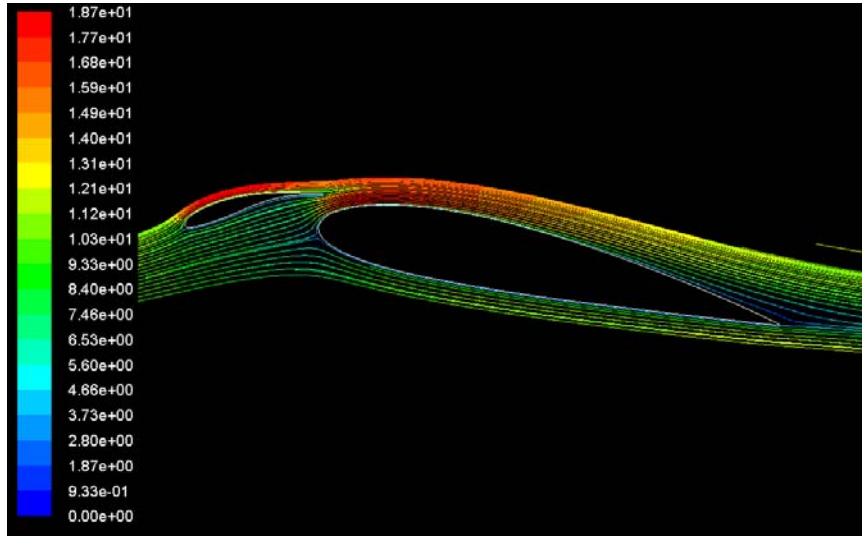
Şekil 4.29'de 0° hücum açısındaki cidar kayma gerilmesi grafiğini incelediğimizde, bu ayrılma kabarcığının oluştuğu slatın alt kısmında cidar kayma gerilmesi grafikte sıfır noktasındadır.



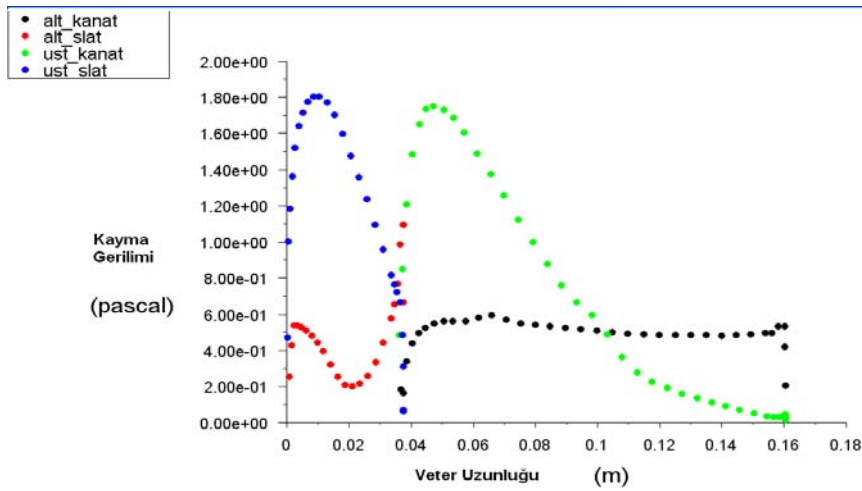
Şekil 4.28 : $\alpha = 0^\circ$ 'da ve $\delta = 21^\circ$ 'daki akış çizgileri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)



Şekil 4.29 : $\alpha = 0^\circ$ 'da ve $\delta = 21^\circ$ 'deki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

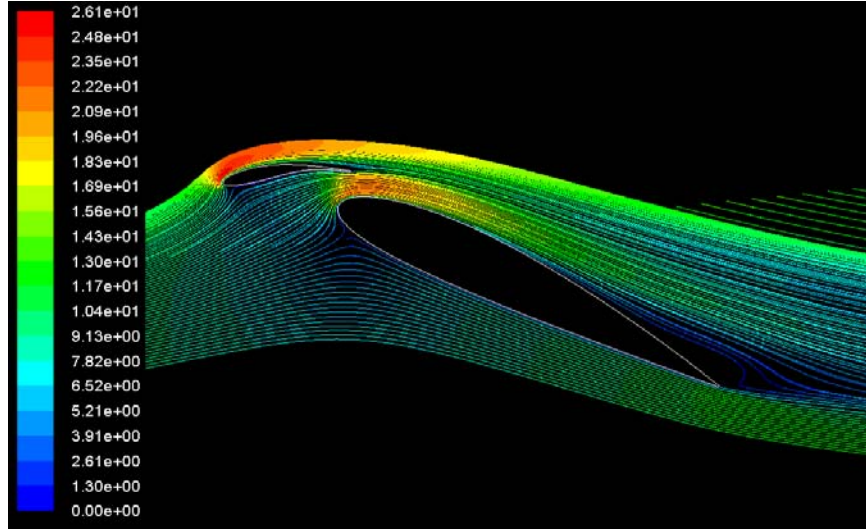


Şekil 4.30 : $\alpha = 12^\circ$ 'da ve $\delta = 25^\circ$ 'deki akış çizgileri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

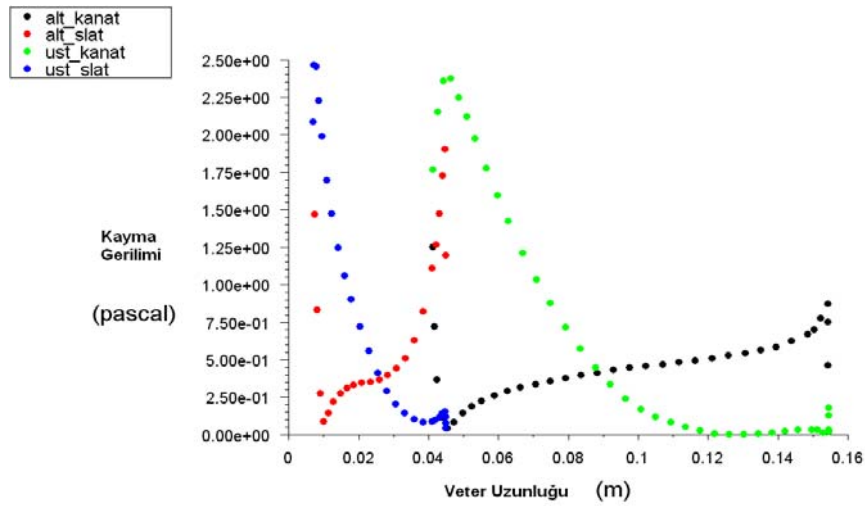


Şekil 4.31 : $\alpha = 12^\circ$ 'da ve $\delta = 25^\circ$ 'deki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

12° hücum açısında Şekil 4.30'de ayrılma kabarcığının kanatlar arasından kanatın üst kısmından firar kenarına doğru giderek yüzeye yapışmaya başladığını görüldü. Firar kenarına doğru kanat üzerinden akış ayrılması olmaması kanat profili üzerindeki akışın ters basınç gradyanlarına direnebilmesidir. Şekil 4.31'da 12° hücum açısındaki cidar kayma gerilmesinden laminer ayrılma kabarcığının firar kenarında doğru kaydığını ve çok daha azaldığı gözlemlendi.



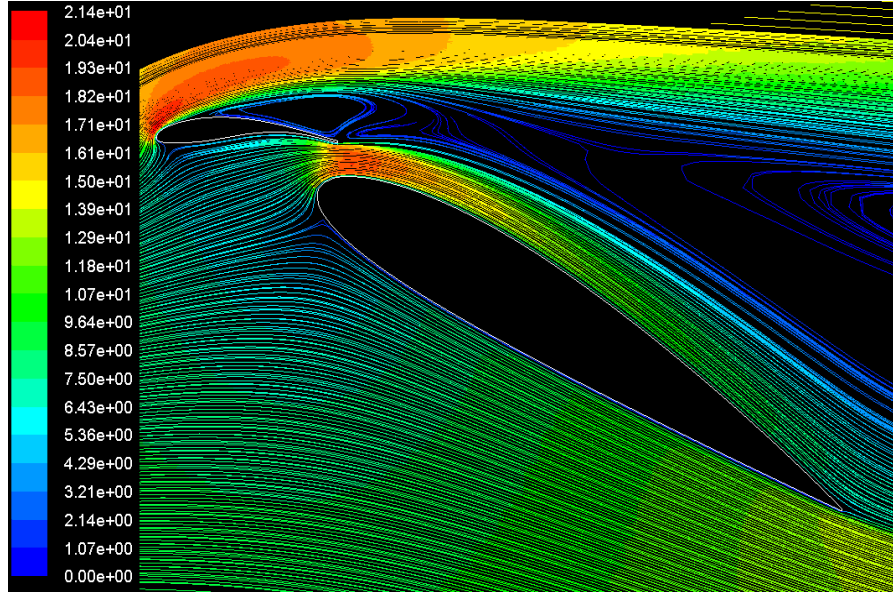
Şekil 4.32 : $\alpha = 27^\circ$ 'da ve $\delta = 33^\circ$ 'daki akış çizgileri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)



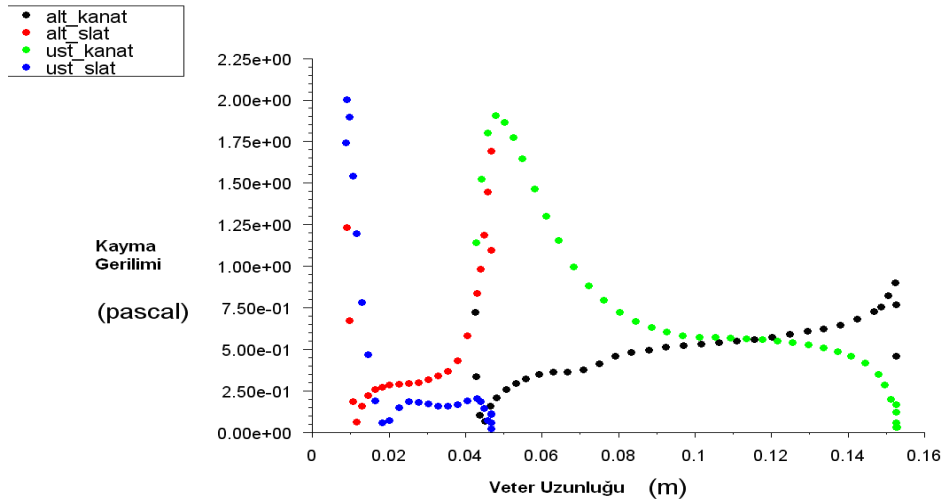
Şekil 4.33 : $\alpha = 27^\circ$ 'da ve $\delta = 33^\circ$ 'daki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

Tutunma açısında Şekil 4.32 'da da görüldüğü gibi 27° hücum açısında firar kenarında türbülansa geçerek kanatlardan ayılmaya başlamıştır. Şekil 4.33'deki cidar kayma gerilimi grafiği incelendiğinde firar kenarına yakın bölgesinde kanadın $\frac{1}{4}$ 'lük kısmında kayma gerilimi 0'dır ve türbülans ayrılmalar

başlamaktadır. Tutunma açısından sonra 30^0 hücum açısından sonra Şekil 4.34'ye bakarsak eğer, türbülanslı bölgenin arttığını ve slatın yani hücum kenarına doğru iyice kaydığını görüldü. Bu da, sürüklenme katsayısının çok fazla artmasına ve kaldırma katsayısını düşüşüne neden olmaktadır. Şekil 4.35'de cidar kayma gerilimine bakılırsa, slatın orta kısımlarından itibaren kayma geriliminin 0'a yaklaştığı ve daha sonra 0 olduğu görülmektedir.



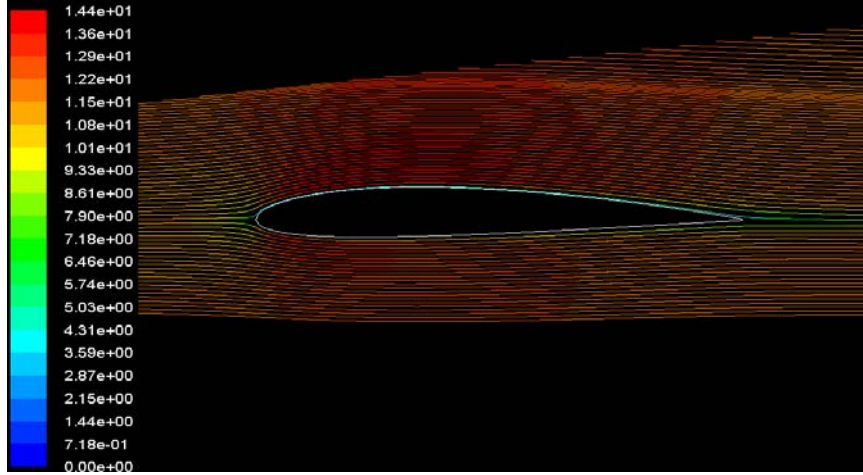
Şekil 4.34 : $\alpha = 30^0$ 'da ve $\delta = 35^0$ 'daki akış çizgileri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)



Şekil 4.35 : $\alpha = 30^0$ 'da ve $\delta = 35^0$ 'daki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

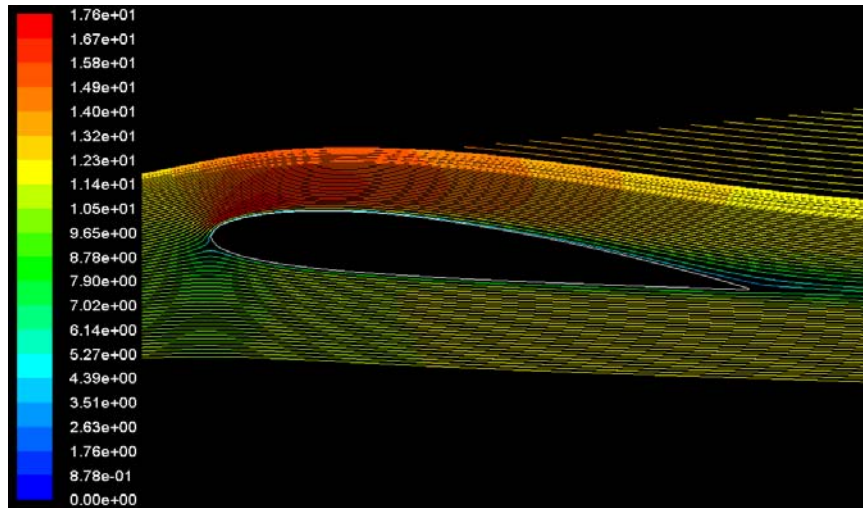
NACA2415 kanadının akış çizgileri ;

NACA2415 kanat profilinde, Şekil 4.36' de hava ortamlarında 1×10^5 Re sayısında 0° hücum açılarında laminer ayrılma kabarcığının ve kuyrukta türbülansa geçiş ayrılmalarının olmadığı görüldü.



Şekil 4.36 : $\alpha = 0^\circ$ 'daki akış çizgileri ($Re=1 \times 10^5$)

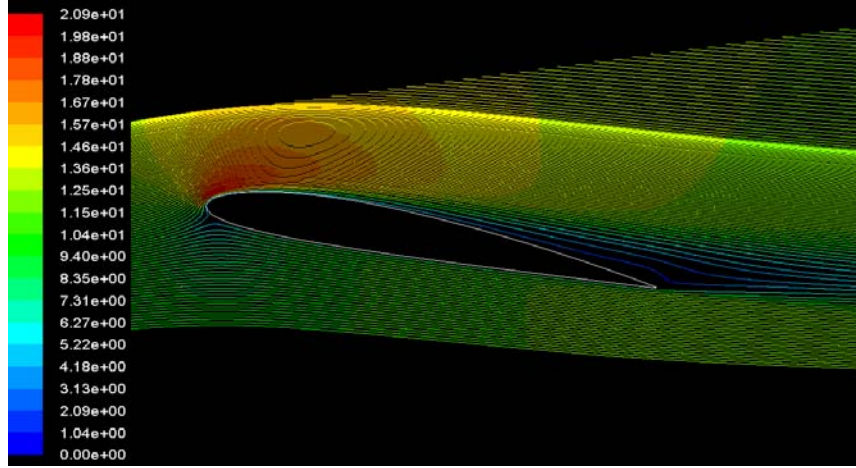
6° hücum açısında Şekil 4.37'de hava ortamındaki NACA2415 kanat profilinin akım çizgileri görülmektedir. Kanat profilinin firar kenarında akış ayrılması çok az da olsa görülmektedir.



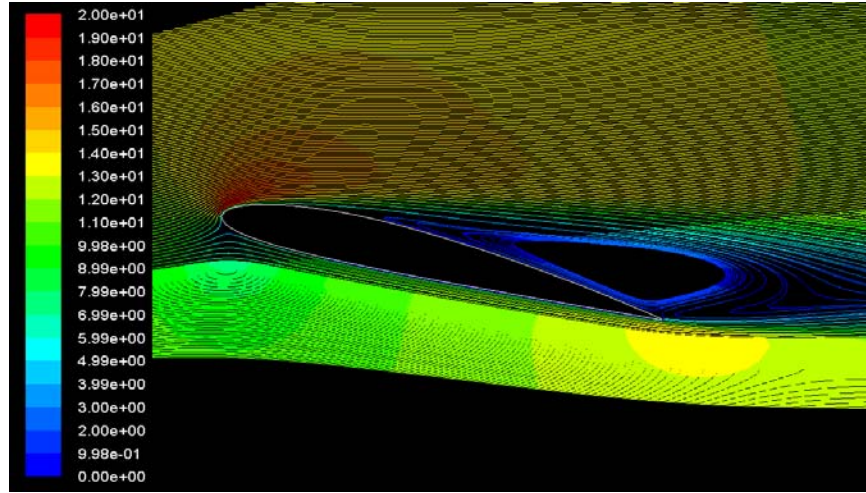
Şekil 4.37 : $\alpha = 6^\circ$ 'daki akış çizgileri ($Re=1 \times 10^5$)

NACA 2415'in tutunma açısı olan ve Şekil 4.38'da görülen 12° hücum açısındaki akım çizgileri incelendiğinde, kanadın firar kenarında yavaş yavaş türbülans ayrılmaları oluşmaya başlamaktadır. Bu da, sürüklenme kuvvetinin artmasına

neden olmaktadır. Tutunma açısından sonra 15° hücum açısını incelenirse, Şekil 4.39'de de türbülans akımları firar kenarından artık hücum kenarına doğru kaymaktadır ve kanat profili arkasında geniş bir türbülanslı bölgeler oluşturmaktadır.



Şekil 4.38 : $\alpha = 12^\circ$ 'daki akış çizgileri ($Re=1 \times 10^5$)



Şekil 4.39 : $\alpha = 15^\circ$ 'daki akış çizgileri ($Re=1 \times 10^5$)

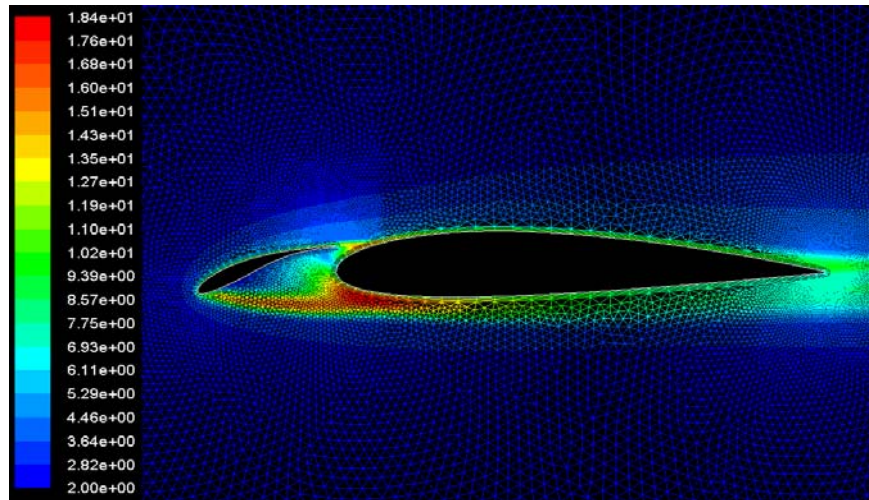
Kanat üzerindeki akış ayrılmalarının geç olursa kanat aerodinamik performans açısından o kadar iyidir. Kanat profili üzerinde ayrılmaya geçen bölgede çok düşük hız alanları oluşur ve bu da kanadın üst kısmındaki basıncı artırır ve kanat profilinin alt ve üst kısımları arasındaki basınç farkı azalarak kaldırma kuvvetinde düşüş, sürüklenme kuvvetinde artış meydana gelir. Slatlı ve slatsız kanat profilleri incelendiğinde türbülansa geçiş akışları slatsız kanatta 12° hücum açısında meydana gelirken, slatlı kanatta bu açı 27° hücum açısına kadar

çıkarıldı. Ve bu hücum açısındaki artış bize kaldırma kuvvetinde de oldukça fazla bir artış sağladı.

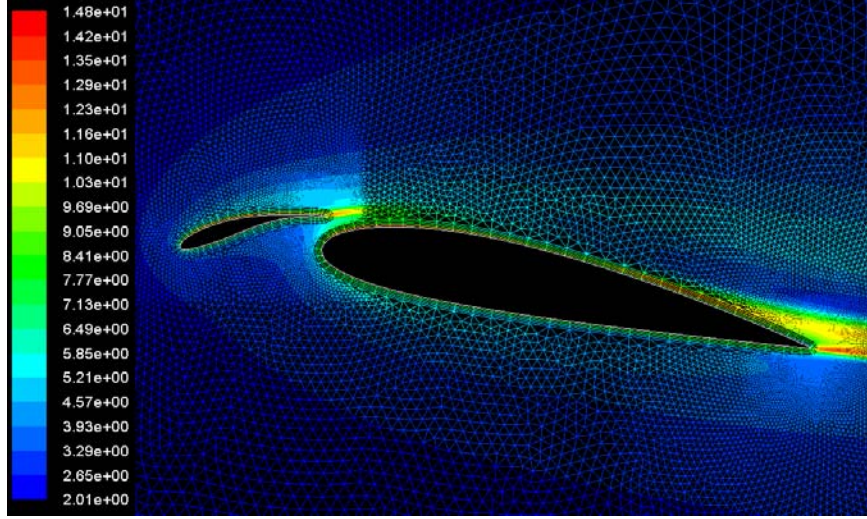
c. Slatlı kanat profilinin kanat üzerinde oluşan türbülans şiddetleri

Türbülans şiddetini genel olarak türbülansın olduğu yerleri belirlemekte ve nerelerde daha yoğun olduğuna karar vermek için kullanılmaktadır. Kanat profili üzerine akım çizgileri gönderilerek türbülansın oluştuğu bölgeler bir önceki bölümde incelendi. Bu bölgeler ile türbülans şiddetinin yüksek olduğu bölgeler, yani kırmızı renkle oluşan bölgelerde türbülans şiddetinin fazla olduğu belirtildi ve türbülans şiddetinin yüksek olduğu bölgeler ile akım çizgilerindeki dalgalanmaların birbirini tamamlar niteliktedir. Daha sonra incelenecek olan vorteks kopma frekanslarının belirlenmesinde yine türbülansın yoğun olduğu yerlere yerleştirilen mikrofonlar sayesinde kopma frekansının şiddeti hesaplandı.

Hava ortamında Şekil 4.40 incelendiğinde 0° hücum açısında slatla ile kanat arasında kalan kısımda kırmızı renk ile belli olan yerde türbülans şiddetinin yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 4.28'da ki akım çizgileri incelendiğinde o bölgede ayrılma kabarcıkları oluştuğunu bir önceki bölümde incelenmişti ve bu bölgede türbülans şiddeti %18.4 civarındadır. 12° hücum açısında Şekil 4.41'a baktığımızda kanadın firar kenarında türbülans şiddetinin arttığı görülmektedir. Şekil 4.30'de de akışın firar kenarının yakın kısımlarında küçük çaplı olduğu görüldü. 12° hücum açısındaki türbülans şiddeti %14 civarındadır ve 0° hücum açısındaki türbülans şiddetindeki değerden daha az bir yüzdededir.

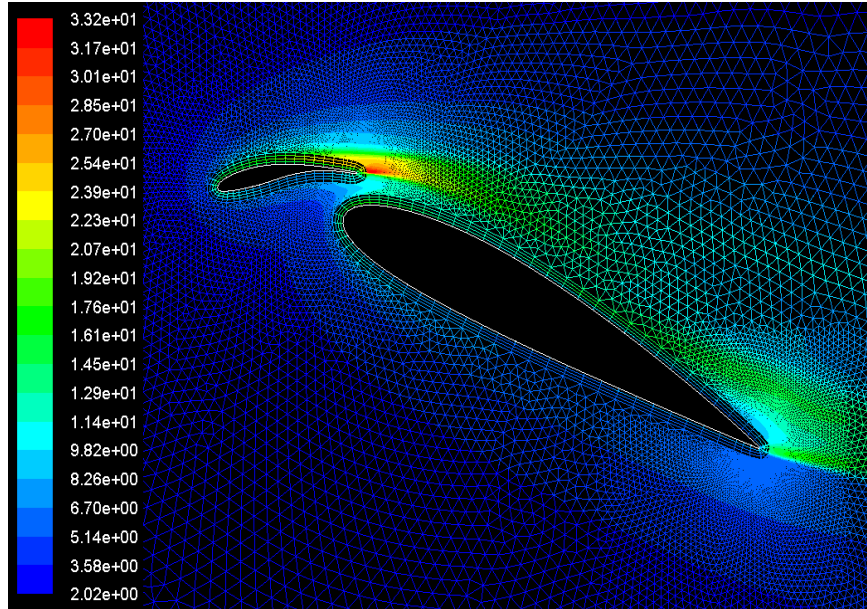


Şekil 4.40 : $\alpha = 0^{\circ}$ 'da ve $\delta = 21^{\circ}$ 'daki türbülans şiddetleri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

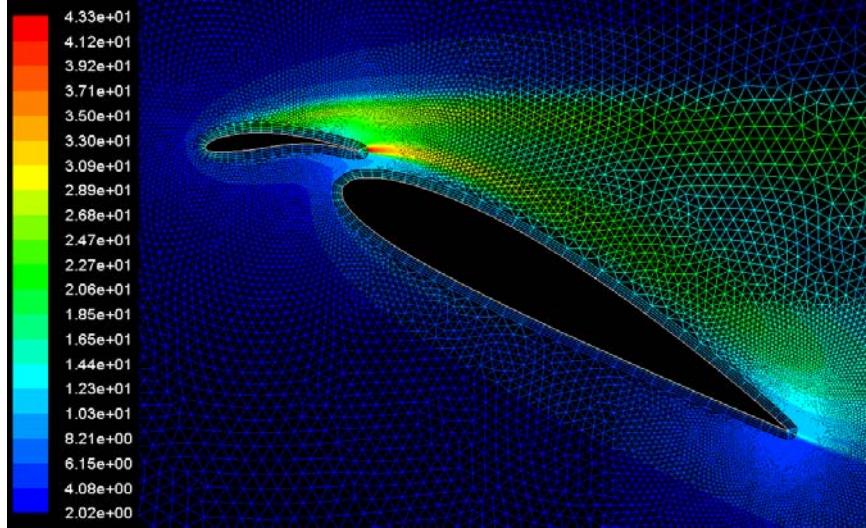


Şekil 4.41 : $\alpha = 12^\circ$ 'da ve $\delta = 25^\circ$ 'daki türbülans şiddetleri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

Tutunma açısında, akış çizgilerinin incelendiği Şekil 4.32 'de görüldüğü gibi 27° hücum açısında kanattan ayılmaların firar kenarında başladığı irdelenmişti. Şekil 4.42' da kanadın firar kenarı akış bölgesinde yüksek türbülans bölgesi görülmekte olup şiddeti % 33.2 olarak elde edildi. Tutunma açısından sonra 30° hücum açısından sonra Şekil 4.34'ye tekrar bakılırsa, türbülanslı bölgenin arttığını ve slatın yani hücum kenarına doğru iyice kaydığını görüldü. Şekil 4.43'da görüldüğü gibi daha da yoğunlaşarak türbülans şiddeti % 43.3 olarak elde edildi.



Şekil 4.42 : $\alpha = 27^\circ$ 'da ve $\delta = 33^\circ$ 'daki türbülans şiddetleri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)



Şekil 4.43 : $\alpha = 30^\circ$ 'da ve $\delta = 35^\circ$ 'daki türbülans şiddetleri ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

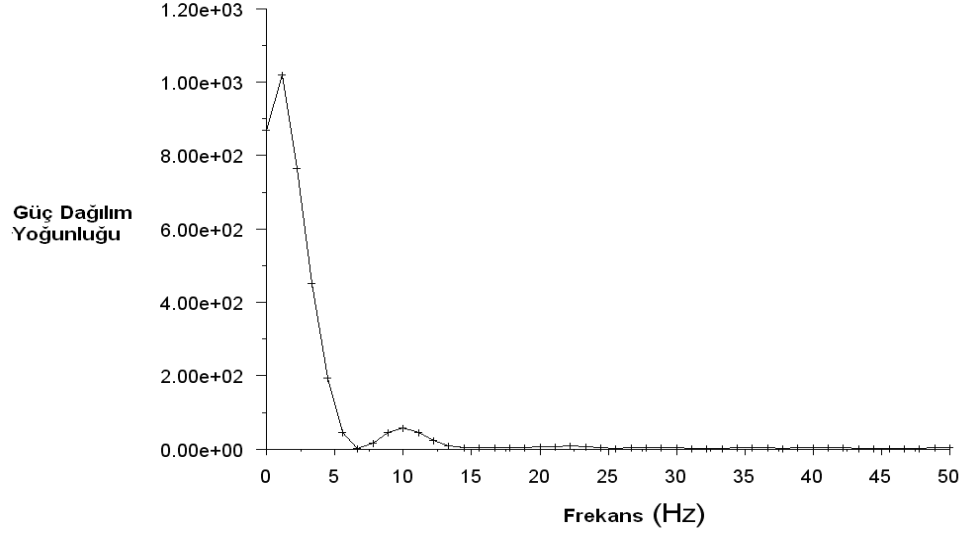
d. Slatlı Kanat Profiline Kanat Üzerinde Oluşan Vorteks Kopma Frekansları

Cisimlerden girdap yayılması, akım ayrılması nedeniyle ortaya çıkan cisim gerisindeki girdapların, periyodik olarak cisimden kopmaları ve iz bölgesinde ilerlemeleridir. Bunun sonucunda cisme etki eden direnç ve kaldırma kuvveti gibi temel kuvvetler zamana bağlı olarak bir salınım gösterirler. Özellikle pervane kanatları, yalpa finleri, girdap yapıcılar gibi yüksek Reynolds sayılı hidrodinamik araçlarda girdap yayılması rahatlıkla görülebilir. Bu nedenle girdap yayılmasının modellenebilmesi ve akış karakteristiklerinin anlaşılabilmesi hidrodinamik açıdan önem taşımaktadır. Reynolds sayısının artmasıyla birlikte girdap boyları ve akım ayrılma noktasının yatay eksenle yaptığı açı artış gösterir. Giderek boyları artan girdaplar periyodik olarak kanadın üst ve ara bölgesinde koparak iz bölgesine doğru yayılırlar. Bu şekilde hareketlerini sürdüren girdaplar, akış yönü boyunca silindirin arkasında “Karman girdap caddesi” ni oluştururlar. Kanadın iz bölgesinde oluşan girdapların yayılma frekansını ifade eden boyutsuz katsayı Strouhal sayısı olup,

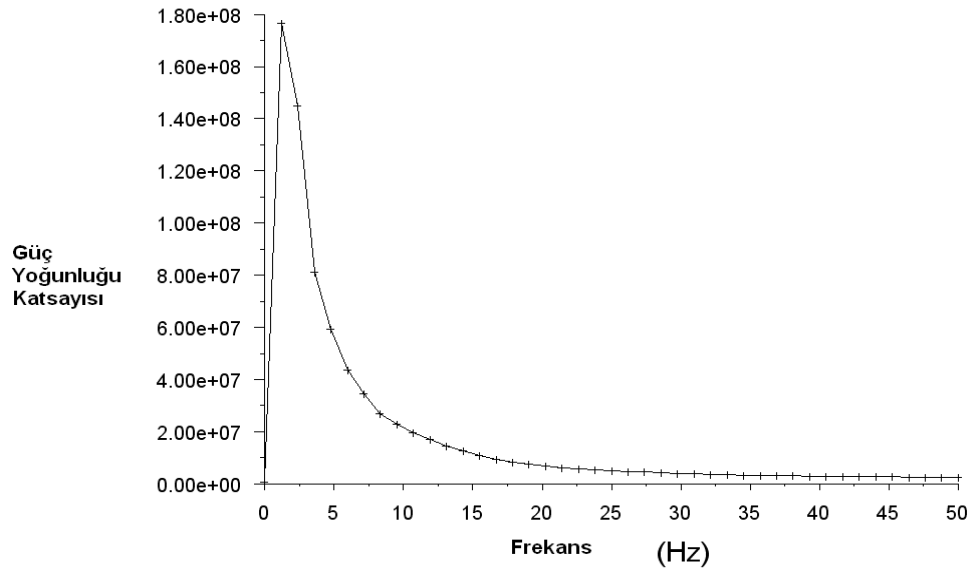
$$St = \frac{fxc}{U_\infty} \quad (4.1)$$

olarak ifade edilir. Burada c kanat genişliğini, U_∞ serbest akım hızını ve f vorteks kopma frekansınıdır. Bu oluşan kopmalar hem kaldırma katsayısının hem de sürükleme katsayısını etkilemektedir.

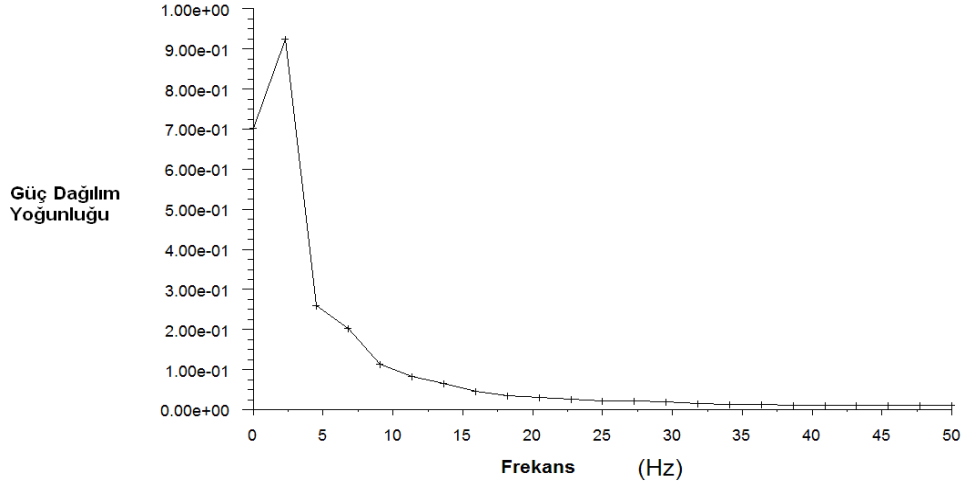
Bu bölümde incelenen kanat profili olan slatlı kanat profili için hava ortamında 1×10^5 Re sayısında 0° , 12° ve tutunma açısı olan 27° hücum açısında vorteks kopma frekansları incelenmektedir.



Şekil 4.44 : $\alpha = 0^\circ$ 'da ve $\delta = 21^\circ$ 'daki vorteks kopma frekansı (Hz) ($h/c_1 = 0.165$, $Re = 1 \times 10^5$)



Şekil 4.45 : $\alpha = 12^\circ$ 'da ve $\delta = 25^\circ$ 'daki vorteks kopma frekansı (Hz) ($h/c_1 = 0.165$, $Re = 1 \times 10^5$)



Şekil 4.46 : $\alpha = 27^\circ$ 'da ve $\delta = 33^\circ$ 'daki vorteks kopma frekansı (Hz) ($h/c_1=0.165$, $Re=1 \times 10^5$)

0° hücum açısında Şekil 4.44' de elde edilen vorteks kopma frekansı 2Hz ve Strouhal sayısı 0.020 iken, Şekil 4.45'da maksimum C_L/C_D oranının elde edildiği 12° hücum açısında vorteks kopma frekansı 1Hz civarındadır ve 0° derece hücum açısına nazaran daha düşük bir frekansta olduğu görüldü. Şekil 4.46'de tutunma kaybı açısı olan 27° hücum açısında vorteks kopma frekansı 2.5Hz ve Strouhal sayısı 0.033'dür. Hücum açısının artmasıyla girdap oluşumunun da arttığını görüldü. 0° hücum açısında laminer ayrılma kabarcığının olmasından dolayı yüksek olan frekans, optimum hücum açısı olan 12° hücum açısında slatın akışı düzenli hale getirmesinden dolayı ayrılmanın daha az olduğundan frekansın düşük olması , fakat açının artmasıyla kanat yüzeyinden kopmalar ve girdap oluşumu arttıkça frekansında arttığı görüldü.

4.1.2. Su ortamındaki sayısal sonuçlar

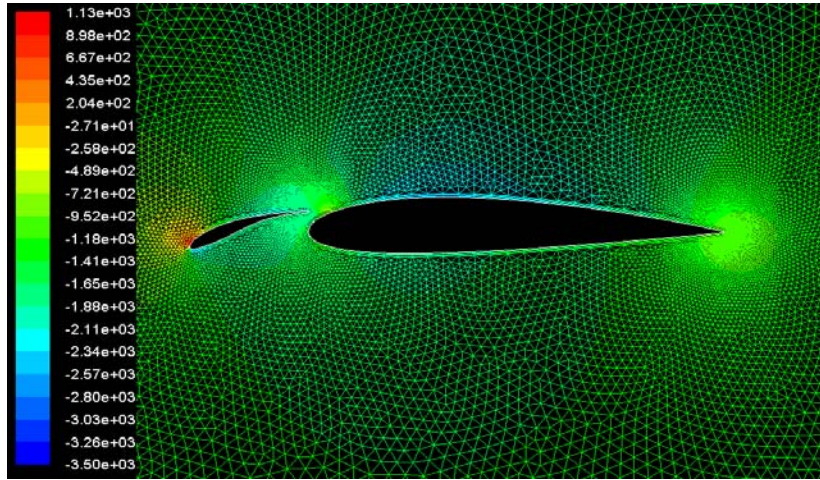
Belirlenen uygun ağ yapısına göre optimum h/c_1 ve slat açısındaki 0° , Maksimum C_L/C_D ve maksimum C_L ve tutunma açısından sonraki hücum açılarındaki kanatta oluşan basınç dağılımları ve konturları, aerodinamik kuvvet analizler, yine belirli hücum açılarındaki hız konturları, akım çizgileri, türbülans şiddetleri belirlenerek sistemden ayrılmaları hesaplayarak vorteks kopma frekanslarının verildi.

4.1.2.1. Slatlı kanat profilinin basınç değişkenleri

Basınç değişkenleri statik basınç konturları ve basınç katsayı dağılımı olmak üzere iki bölümde incelendi.

a. Kanat Profilinin Statik Basınç Konturları

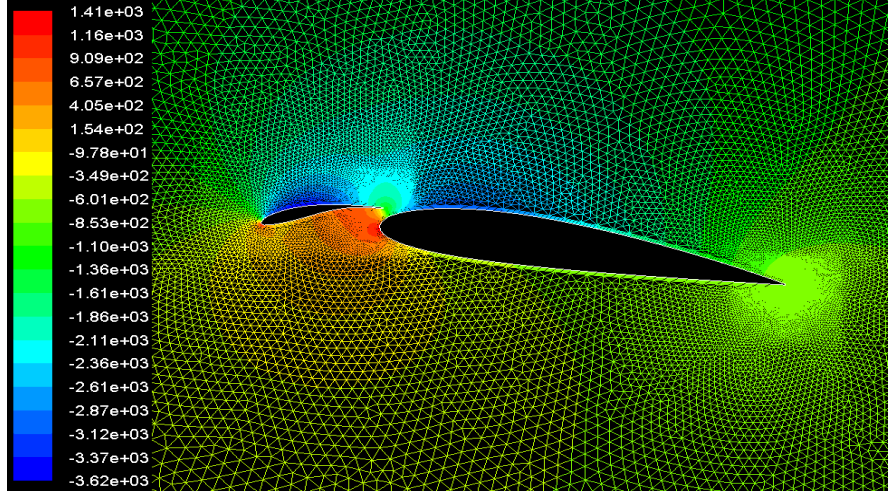
Statik basınç konturları, su ortamında 2.53×10^5 Re sayısında, kanat aralığı $h/c_1=0.165$ iken çalışılmaktadır.



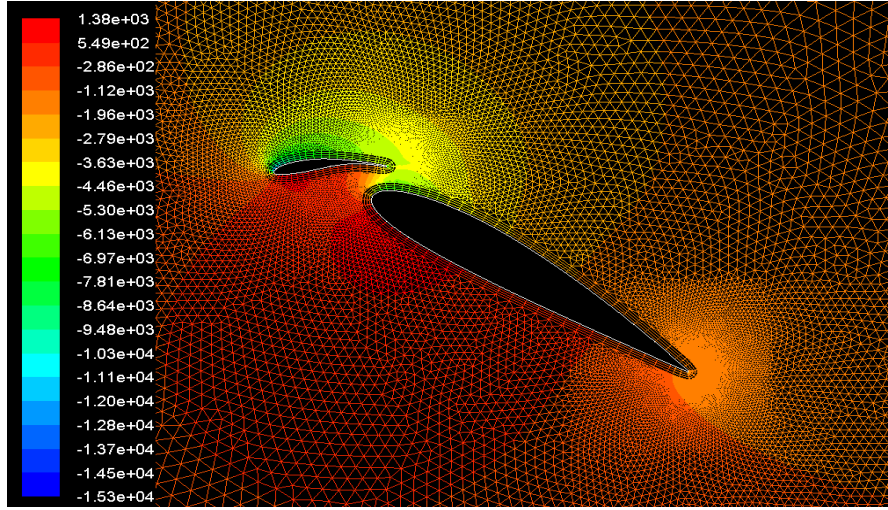
Şekil 4.47 : $\alpha = 0^0$ 'da ve $\delta = 19^0$ 'daki basınç konturu (Pa)($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

Kanat profilleri 0^0 hücum açısında slat açısı 19^0 iken, gelen rüzgarı ilk önce hücum kenarı karşılar ve yüksek basınç bölgesi oluşur. Şekil 4.47 'de görüldüğü gibi kanatın uç noktasında yüksek basınca maruz kalmaktadır. Kanatın uç kısmındaki hızın çok düşük olmasından dolayı burada basınç yüksektir. Fakat kanatların üst kısımlarında akışkanın hızın artması ile düşük basınç bölgeleri meydana gelmektedir. Yine aynı şekilde, alt kısımlarda da hızın düşük olması yüksek basınç bölgelerini oluşturmaktadır.

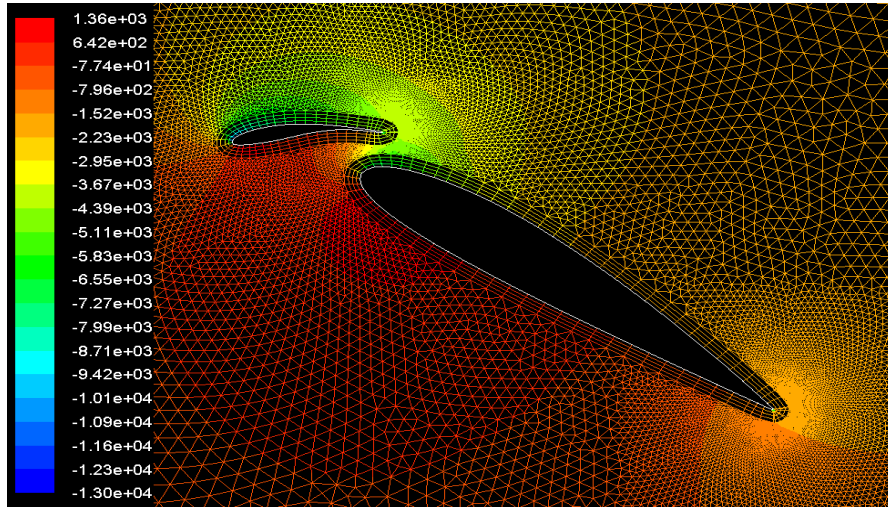
Hücum açısının artması ile Şekil 4.48'de ki 10^0 hücum açısında ve slat açısı 19^0 iken kanadın üstünde basınç düşüşünün arttığı ve alt kısımda basınç artışının olduğu görülmektedir. Hücum açısı tutunma açısına kadar arttırıldığında yani 33^0 hücum açısı ve slat açısı 37^0 iken Şekil 4.49'de de görüldüğü gibi kanatların hücum kenarının hemen üst noktasından başlayan basınç düşmesi görülmektedir ve alt kısımdaki basınç artışıyla birlikte kanadın alt ve üst kısmında basınç farkı maksimum seviyeye ulaşip maksimum kaldırma kuvveti elde edilmektedir.



Şekil 4.48: $\alpha = 10^{\circ}$ 'da ve $\delta = 19^{\circ}$ 'daki basınç konturu (Pa) ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)



Şekil 4.49: $\alpha = 33^{\circ}$ 'da ve $\delta = 37^{\circ}$ 'daki basınç konturu (Pa) ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

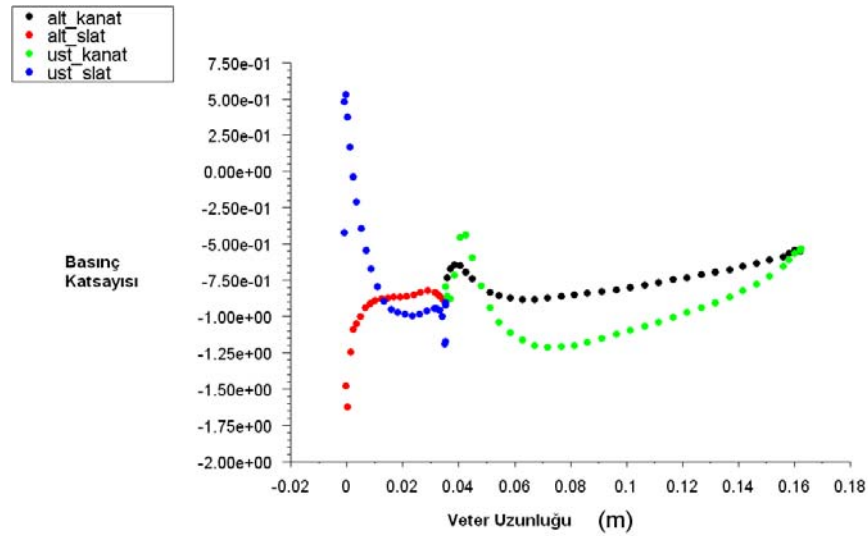


Şekil 4.50: $\alpha = 35^{\circ}$ 'da ve $\delta = 37^{\circ}$ 'daki basınç konturu (Pa) ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

Daha sonra tutunma kaybına uğrayan kanat profili, Şekil 4.50'deki üst kısımda düşük basınç alanı bulunmaktadır, fakat 35° hücum açılı konuma göre yani maksimum C_L değerinin olduğu açıdan sonra kanadın alt ve üst bölgesi arası basınç farkından daha azdır ve bu hücum açısından sonra kaldırma kuvveti giderek azalmaktadır.

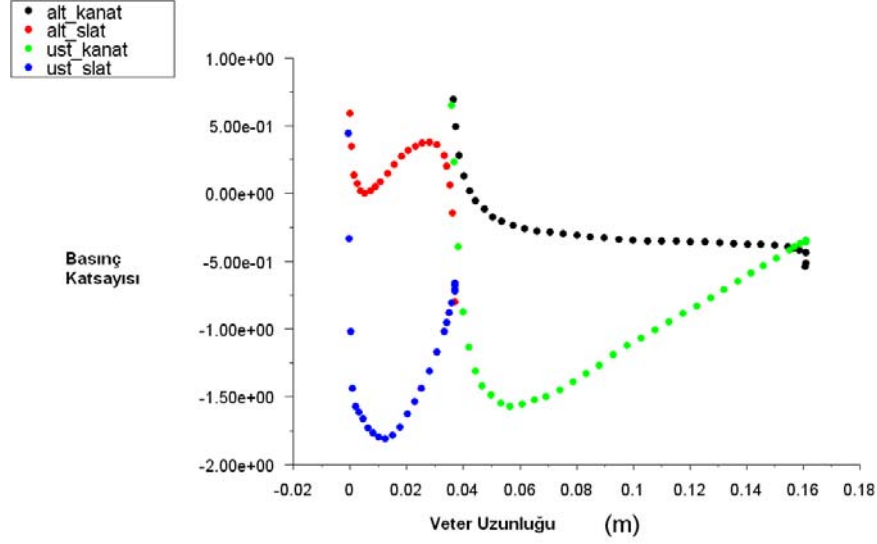
b. Slatlı kanat profilinin basınç katsayı dağılımları

Slatlı kanat profilinin basınç katsayı dağılımları kanat profili $h/c_1=0,165$ konumundayken basınç katsayısı dağılımları, su akışında 2.53×10^5 Re sayısında ve su ortamında maksimum C_L katsayısının olduğu, maksimum C_L/C_D oranının elde edildiği 0° , 10° , 33° , 35° hücum açılarında, hücum açılarında irdelendi. Şekiller incelendiğinde her kanat yüzeyi farklı renklerle gösterilmiştir. Şekillerde ki kırmızı alt slata, mavi renk üst slata, siyah renk alt ve yeşil renk ise üst kanata aittir.



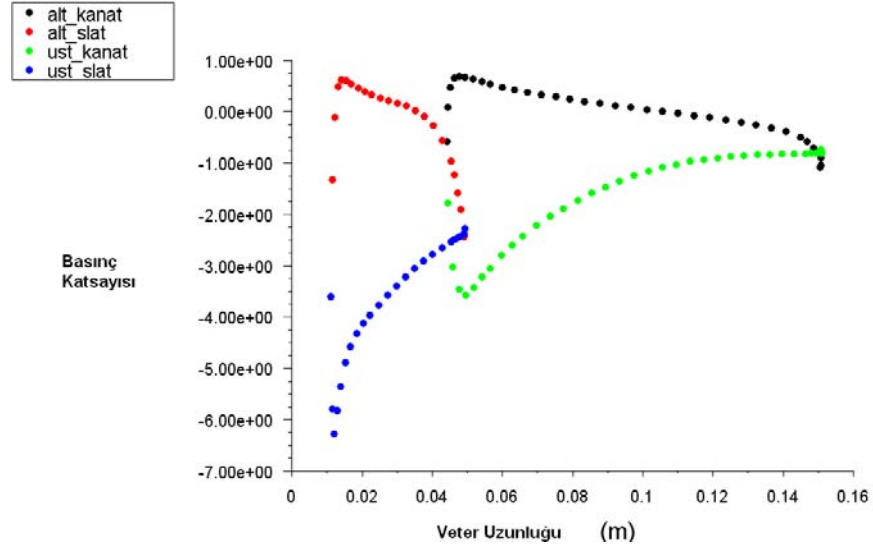
Şekil 4.51 : $\alpha = 0^{\circ}$ 'da ve $\delta = 19^{\circ}$ 'daki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

Şekil 4.51' da hava akışında 0° hücum açısında ve slat açısı 19° iken, kanadın hücum kenarında yüksek basınca maruz kaldığını ve firar kenarına doğru gidildiğinde, kanatların üst kısımlarında basıncın giderek arttığını görülmektedir. Kanatların üst kısımlarında akışkanın hızının artması düşük basınç bölgeleri, alt kısımlarda da hızın düşük olmasından dolayı yüksek basınç bölgeleri oluşmaktadır.

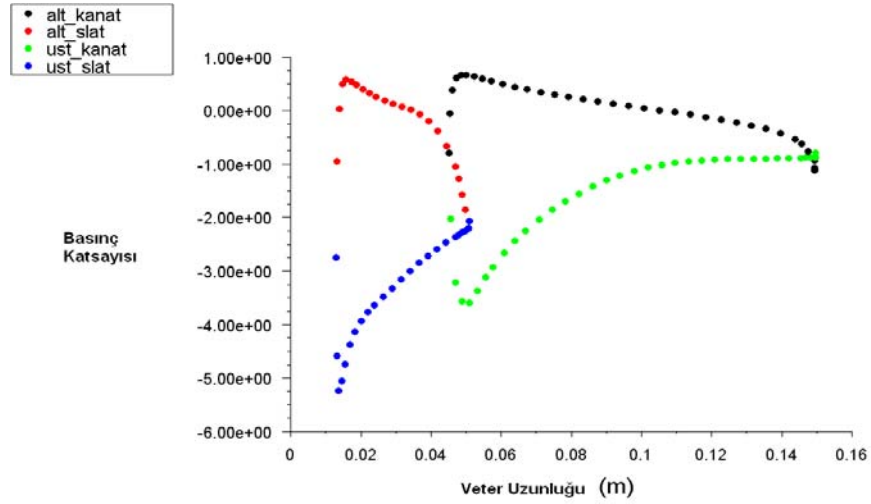


Şekil 4.52 : $\alpha = 10^\circ$ 'da ve $\delta = 19^\circ$ 'daki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

10° hücum açısına geçildiğinde Şekil 4.52'yi incelenecek olursa; slat ve kanadın üst bölgesinde hız alanları arttığından basınçta düşüş, alt bölgesinde hız alanları azaldığından basınçta büyük miktarda bir artış gözlemlenmektedir. Şekil 4.53'de tutunma kaybı açısı olan 33° hücum açısında, slat ve kanadın üst bölgelerinde hız alanı daha fazladır, basınç katsayılarının daha da azaldığını, alt bölgelerinde buna zıt olarak basınç katsayılarının daha da arttığını görülmektedir.



Şekil 4.53 : $\alpha = 33^\circ$ 'da ve $\delta = 37^\circ$ 'daki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)



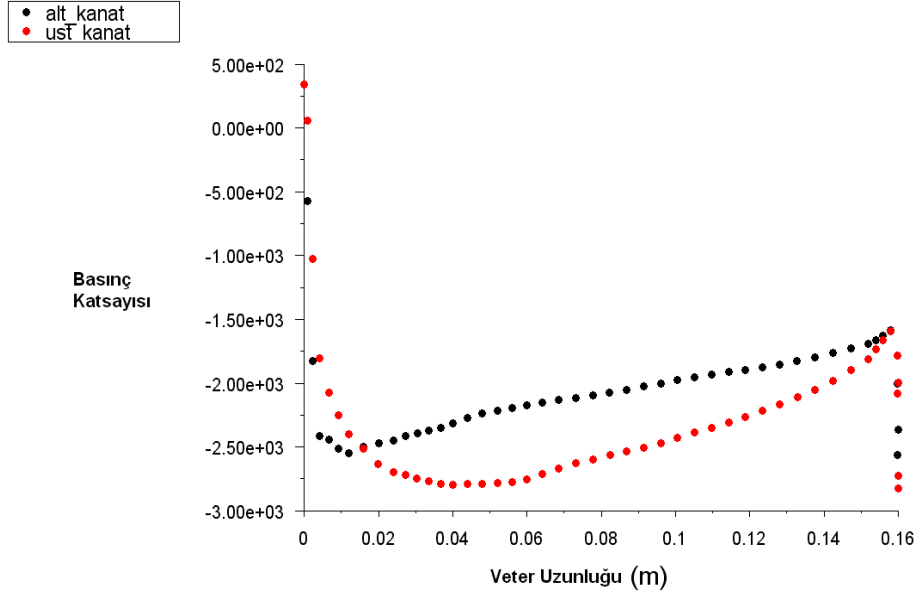
Şekil 4.54 : $\alpha = 35^\circ$ 'da ve $\delta = 37^\circ$ 'daki basınç dağılımı ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

Şekil 4.54'da tutunma kaybı açısından sonra incelenen 35° hücum açısındaki basınç katsayı dağılımı incelenmiştir. Şekil incelendiğinde, kanatların alt ve üst yüzeyleri arasındaki basınç katsayı farkının 33° hücum açısına göre biraz daha az olduğu görülmektedir.

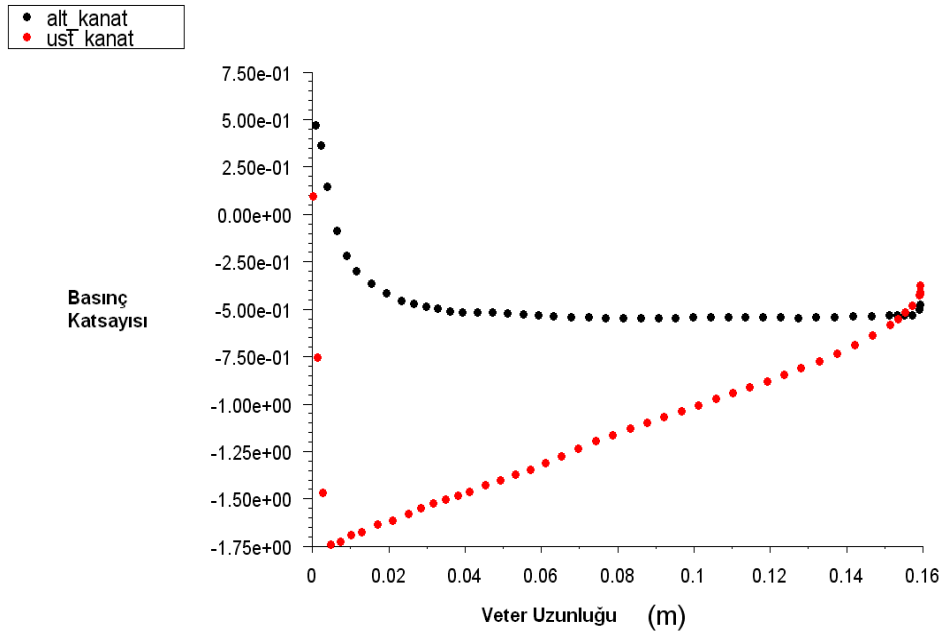
NACA 2415 Slatsız Kanat Profili

Naca 2415 kanat profilinin performansını incelemek amacı ile kullanılan slatın etkisini görmek amacı ile slatsız hali ile karşılaştırmalar yapıldı. Bu karşılaştırmayı, su ortamında 2.53×10^5 Re sayısında yine hesaplanan kritik noktalarda yani, C_L/C_D oranının maksimum olduğu 6° hücum açısında, kaldırma katsayısının maksimum olduğu 12° hücum açılarında incelendi.

0° hücum açısındaki performanslarını incelenirse, Şekil 4.55 'de uç kısmında hız değeri düşük olduğu için hem alt hem de üst kanat arsındaki basınç farkı negatif olmaktadır, fakat firar kenarına doğru gidildikçe kanatın üst kısmında hızın artması ile basınç düşerken, aynı zamanda alt kısımda hızın az olmasından dolayı basınç yüksektir. Şekilden açıkça görüldüğü gibi, NACA2415 kanat profiline ait basınç katsayı farkı, slatlı halde ki kanat profili basınç katsayı farkından çok düşüktür.

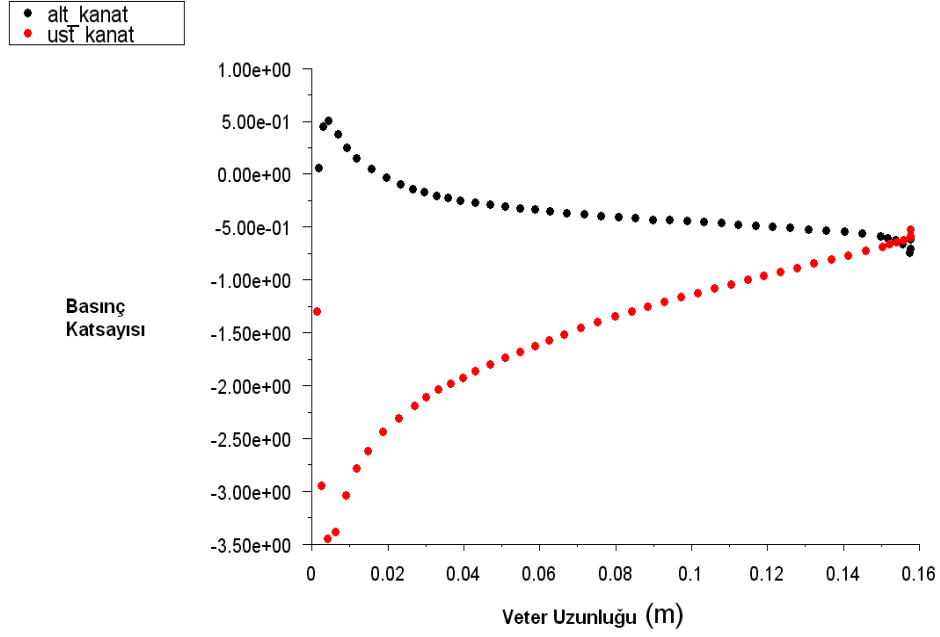


Şekil 4.55: $\alpha = 0^\circ$ 'da su ortamındaki basınç dağılımı ($Re=2.53 \times 10^5$)



Şekil 4.56: $\alpha = 6^\circ$ 'da su ortamındaki basınç dağılımı ($Re=2.53 \times 10^5$)

6° hücum açısına geçildiğinde Şekil 4.56'ü incelendiğinde, kanadın üst bölgesinde hız alanları arttığından basınçta düşüş, alt bölgesinde hız alanları azaldığından basınçta büyük miktarda bir artış gözlenmektedir.



Şekil 4.57: $\alpha = 10^\circ$ 'da su ortamındaki basınç dağılımı ($Re=2.53 \times 10^5$)

Şekil 4.57'de tutunma kaybı açısı olan 10° hücum açısında, kanadın üst bölgelerinde hız alanı daha fazladır, basınç katsayılarının daha da azaldığını, alt bölgelerinde buna zıt olarak basınç katsayılarının daha da arttığını görülmektedir.

Değerlendirilme yapıldığında düşük hücum açılarında slatsız kanat profilini basınç farklarının daha yüksek olduğu, buna bağlı olarak da bu basınç farkının artmasının kaldırma kuvvetine etki etmektedir. Fakat yüksek hücum açılarında basınç farkının slatlı kanatlarda daha da arttığı gözlenmektedir. Hücum açısındaki artışla slatlı kanadın performansının arttığı görülmektedir ve kaldırma katsayı artmaktadır.

4.1.2.2. Slatlı kanat profilinin aerodinamik kuvvet analizi

Kanatlar arası mesafenin $h/c_1=0.125$, $h/c_1=0.145$, $h/c_1=0.165$ ve $h/c_1=0.185$ olduğu durumlarda, su akışında 2.53×10^5 Re, sayılarında değişik hücum açılarında ve 19° sabit slat açısında aerodinamik analizler yapıldı. Bu analizin amacı optimum h/c_1 oranının belirlenmesi için yapıldı.

Çizelge 4.10: Farklı hücum açılarında ve $\delta_{sbt}=19^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.125$, $Re=2.53 \times 10^5$)

$h/c_1 = 0.125$			
Hücum Açısı	C_L	C_D	C_L/C_D
0	0,1357	0,0786	1,7257
6	0,7268	0,0825	8,8145
10	1,1953	0,1268	9,4238
12	1,3893	0,1447	9,6019
18	1,5035	0,3156	4,7635
24	1,5762	0,4157	3,7920
27	1,5579	0,5169	3,0142
30	1,3797	0,6047	2,2816

Çizelge 4.11: Farklı hücum açılarında ve $\delta_{sbt}=19^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.145$, $Re=2.53 \times 10^5$)

$h/c_1 = 0.145$			
Hücum Açısı	C_L	C_D	C_L/C_D
0	0,14165	0,0760	1,8647
6	0,74245	0,0805	9,2217
10	1,21240	0,1125	10,7750
12	1,41590	0,1378	10,2788
18	1,57921	0,2568	6,1493
24	1,64110	0,3778	4,3434
27	1,64790	0,4851	3,3970
30	1,45030	0,5765	2,5156

Çizelge 4.12: Farklı hücum açılarında ve $\delta_{sbt}=19^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

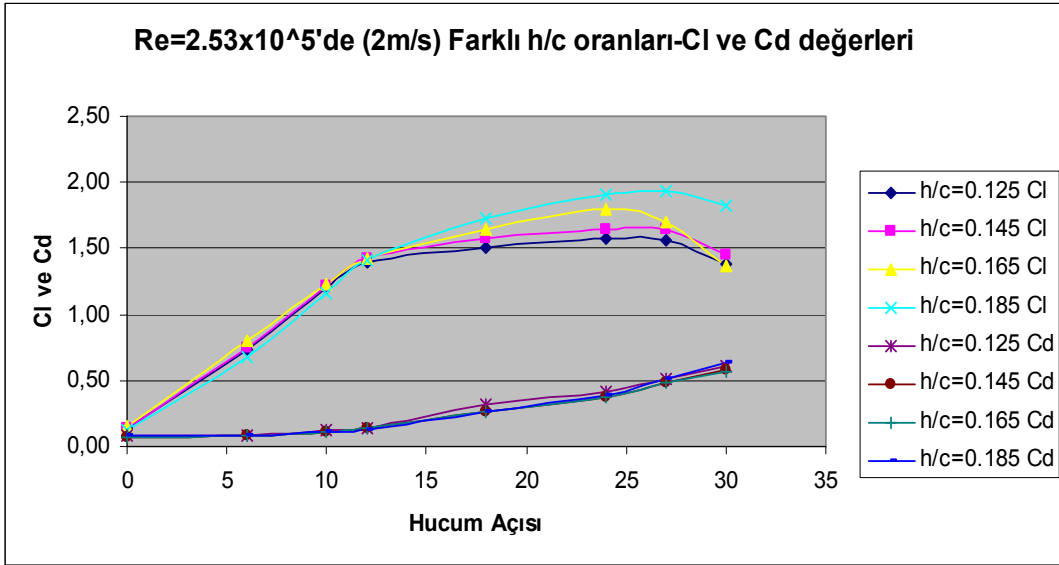
$h/c_1 = 0.165$			
Hücum Açısı	C_L	C_D	C_L/C_D
0	0,1553	0,0753	2,0613
6	0,8030	0,0786	10,2228
10	1,2302	0,1050	11,7207
12	1,4272	0,1376	10,3698
18	1,6485	0,2592	6,3613
24	1,8000	0,3794	4,7450
27	1,6928	0,4895	3,4581
30	1,3632	0,5712	2,3866

Çizelge 4.13: Farklı hücum açılarında ve $\delta_{sbt}=19^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.185$, $Re=2.53 \times 10^5$)

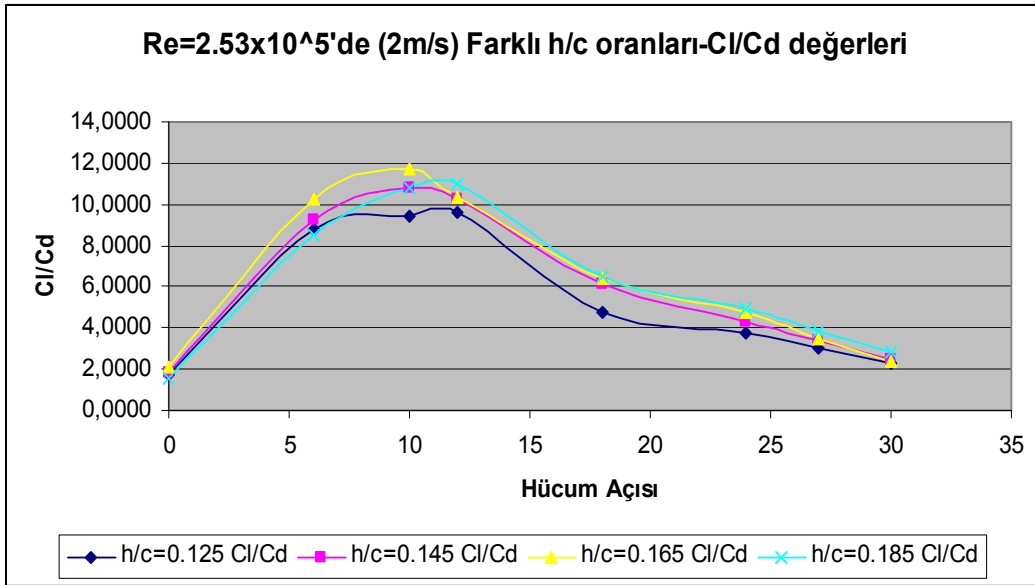
$h/c_1 = 0.185$			
Hücum Açısı	C_L	C_D	C_L/C_D
0	0,1211	0,0790	1,5313
6	0,6835	0,0804	8,5019
10	1,1662	0,1077	10,8252
12	1,4134	0,1288	10,9719
18	1,7266	0,2649	6,5189
24	1,9059	0,3838	4,9661
27	1,9388	0,5053	3,8372
30	1,8198	0,6332	2,8741

Yukarıda verilen çizelgelerdeki veriler, Şekil 4.58 ve 4.59'de ki gibi h/c_1 - C_L ve C_D ile C_L/C_D değerleri grafiklere geçirildi. Şekil 4.56'de farklı hücum açılarında C_L ve

C_D değerleri incelendi. Şekil incelendiğinde maksimum kaldırma kuvveti değeri 1,93 olarak 25° sabit slat açısında h/c_1 değeri 0.185'de iken elde edildi.



Şekil 4.58 : Farklı hücüm açılarında hava akışında $\delta_{sbt}=19^\circ$ 'daki farklı $h/c_1 - C_L$ ve C_D değerleri grafiği ($Re=2.53 \times 10^5$)



Şekil 4.59 : Farklı hücüm açılarında hava akışında $\delta_{sbt}=19^\circ$ 'daki farklı $h/c_1 - C_L/C_D$ değerleri grafiği ($Re=2.53 \times 10^5$)

Kanat profili dizayn edilirken genelde C_L/C_D oranının maksimum olduğu andaki hücüm açısı seçildi. Şekil 4.59 incelendiğinde maksimum C_L/C_D değeri h/c_1 değeri

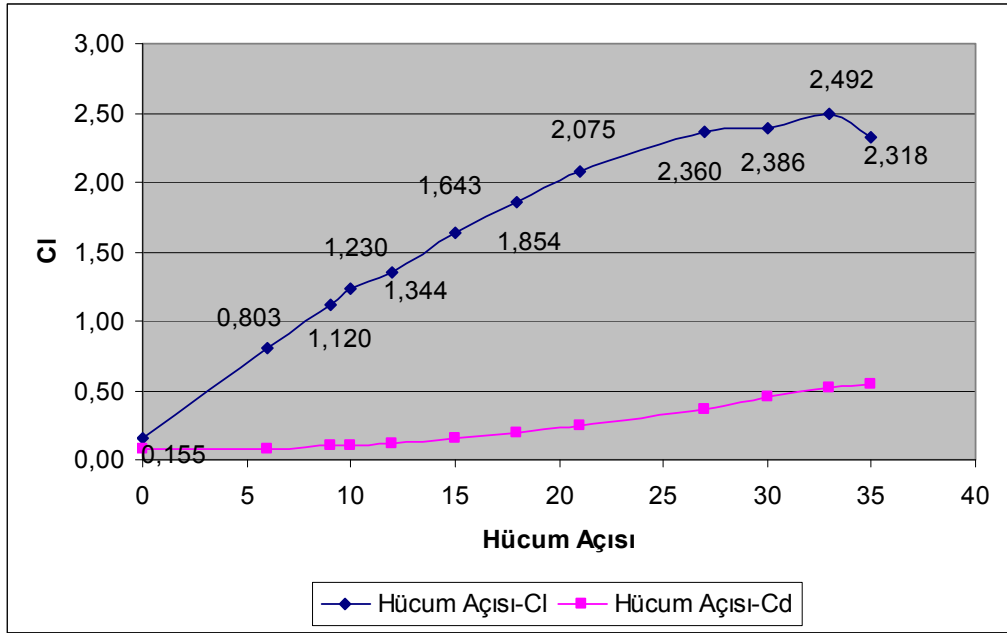
0.165'de 10^0 hücum açısında 11.72 olarak bulundu. Yani $h/c_{1,opt}$ değeri 0.165 olarak alındı.

Optimum h/c_1 oranı belirlendikten sonra diğer bir parametremiz olan slat açısı çalışmaları yapıldı. Bu çalışmada ise $h/c_{1,opt}$ değeri yani 0.165 sabit tutularak slatın kaldırma kuvveti ve sürükleme kuvvet katsayıları ve bunların birbirlerine oranı üzerindeki performansı incelendi. Slat 19^0 ve 38^0 arasında değiştirildi ve her hücum açısında ki optimum slat açıları belirlendi.

Çizelge 4.14: Farklı hücum açılarında ve optimum slat açısındaki aerodinamik katsayıları ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

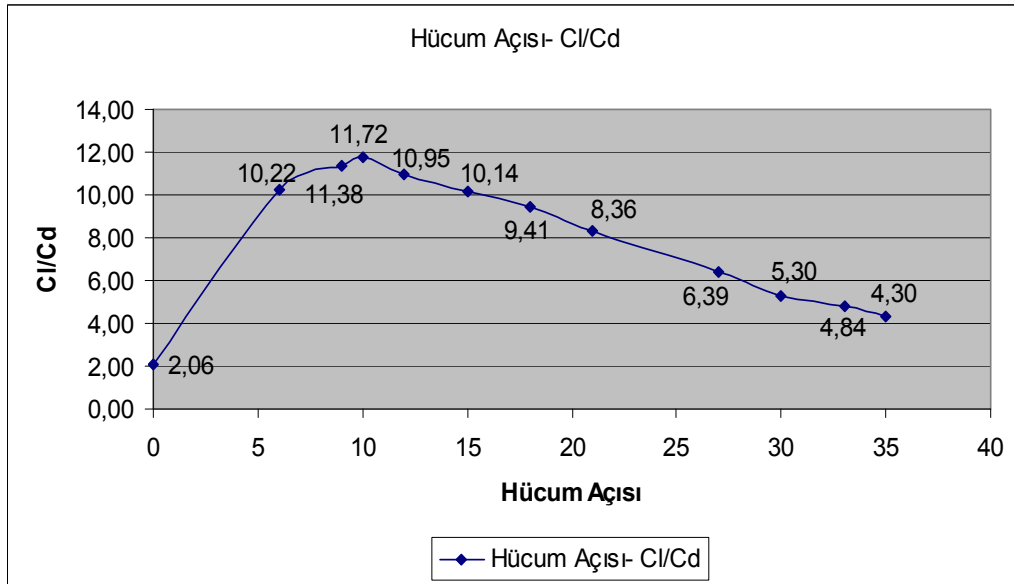
$h/c_1 = 0.165$				
<u>Hücum Açısı</u>	<u>Optimum Slat Açıları</u>	<u>C_L</u>	<u>C_D</u>	<u>C_L/C_D</u>
0	19	0,15531	0,07535	2,06129
6	19	0,80302	0,07855	10,22278
9	19	1,12030	0,09847	11,37707
10	19	1,23020	0,10496	11,72066
12	21	1,34440	0,12283	10,94521
15	25	1,64260	0,16206	10,13575
18	25	1,85430	0,19706	9,40982
21	32	2,07480	0,24825	8,35770
27	34	2,35980	0,36934	6,38923
30	32	2,38590	0,44981	5,30424
33	37	2,49230	0,51530	4,83660
35	37	2,31840	0,53897	4,30154

Yukarıda verilen çizelgelerdeki verileri kullanarak, Şekil 4.60 ki $h/c_1=0.165-C_L$ ve C_D değerleri grafiklere geçirildi. Şekil 4.60'de farklı hücum açılarında C_L ve C_D değerleri incelendi. Grafik incelendiğinde maksimum kaldırma kuvveti değeri 2.49 olarak 33^0 hücum açısında ve 37^0 slat açısında elde edildi.



Şekil 4.60: Farklı hücum açıları ve optimum slat açısındaki C_L ve C_D değerleri grafiği ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

Dizayn parametresi olan C_L/C_D oranının maksimum olduğu andaki hücum açısı Şekil 4.61 incelendiğinde, maksimum C_L/C_D değeri h/c_1 değeri 0.165'de 10^0 hücum açısında ve 19° slat açısında 11.72 olarak bulundu.

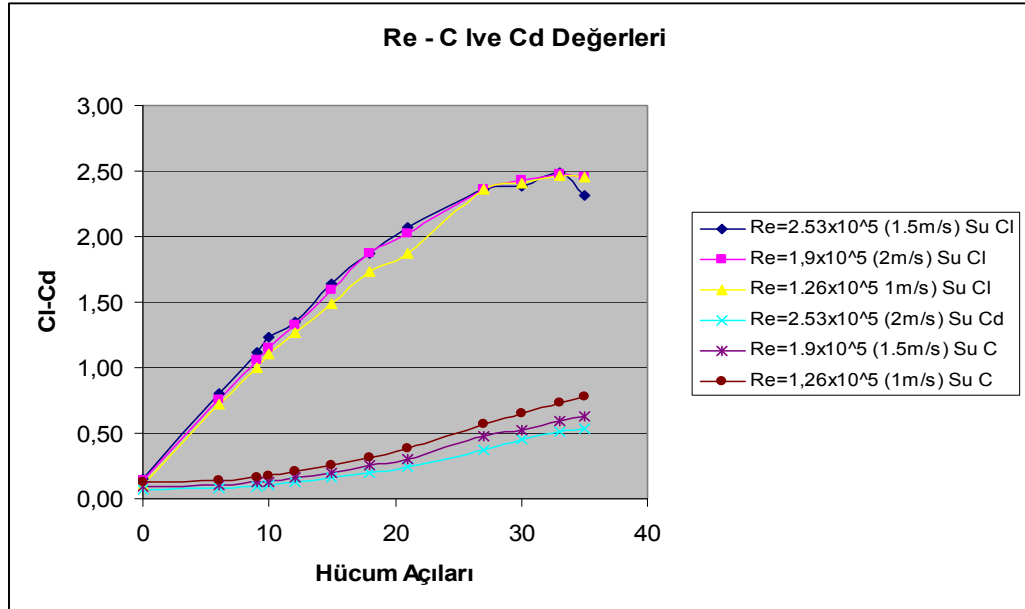


Şekil 4.61: Farklı hücum açıları ve optimum slat açısındaki C_L / C_D değerleri grafiği ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

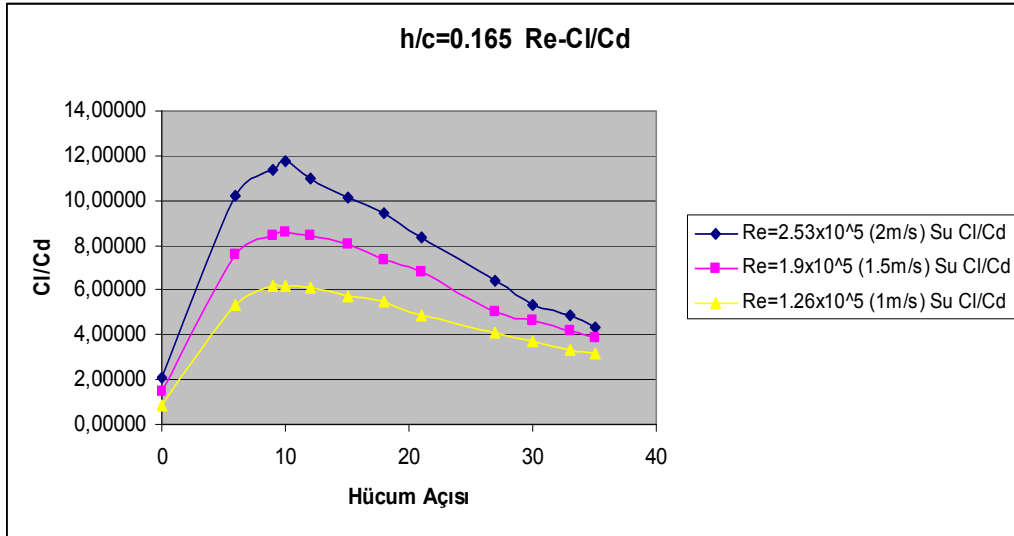
a. Değişik Re sayılarında, su ortamında elde edilen değerler

Re sayısının etkisi tutunma kaybını geciktirici tarzdadır. Bu bölümde de, slatlı kanat profilinin kanatlar arası $h/c_1=0.165$ olduğu durumda Re sayısı ve hücum açısındaki değişim ile aerodinamik performansların değişimi Şekil 4.62 ve Şekil 4.63'de incelenmektedir.

Su akışında, $1,26 \times 10^5$, $1,9 \times 10^5$ ve $2,53 \times 10^5$ Re sayılarında oluşan tutunma kaybı açıları 33° 'dir. Şekil 4.62 incelendiğinde maksimum kaldırma kuvveti $2,53 \times 10^5$ Re sayısında 33° hücum açısında 2.49' a kadar çıkmaktadır. Geç tutunma kaybına uğrayan kanat profilinin kaldırma kuvvetine olumlu yönde etkisini tekrar görüldü.



Şekil 4.62 : Farklı hücum açılarında ve optimum slat açısındaki, Re sayısı ile C_L ve C_D değerleri grafiği ($h/c_1=0.165$)



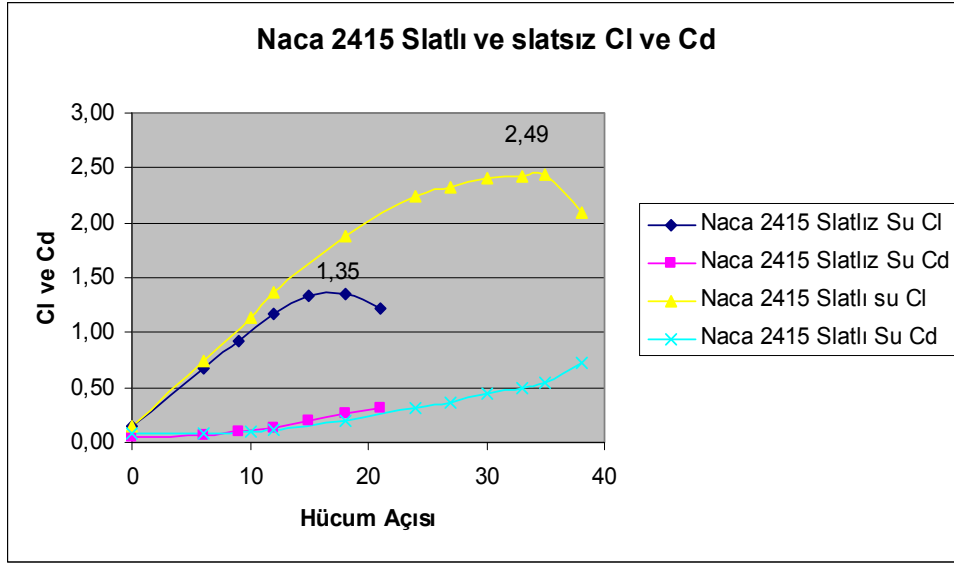
Şekil 4.63 : Farklı hücum açılarında ve optimum slat açısındaki, Re sayısı ile C_L/C_D değerleri grafiği ($h/c_1=0.165$)

C_L/C_D oranının incelendiği Şekil 4.63’de her hücum açısında en yüksek $2,53 \times 10^5$ Re sayısında 11.72 olduğu görülmekte, fakat düşük hücum açılarında oluşan C_L/C_D oranları arasındaki farkın, yüksek hücum açılarında doğru gidildikçe azalmakta olduğu görüldü.

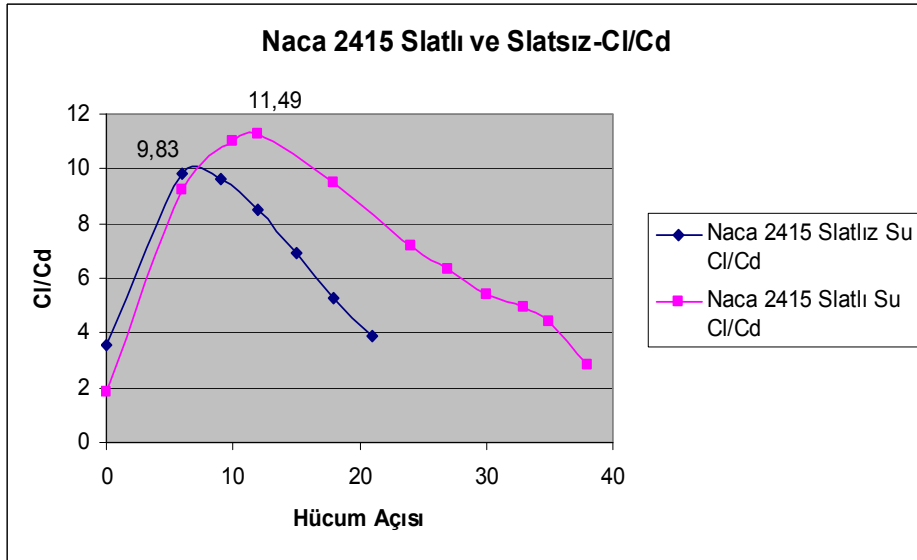
Çizelge 4.15 : Farklı Re sayılarında, su ortamında elde edilen aerodinamik katsayı değerleri ($h/c_1=0.165$)

$h/c_1=0.165$		
	Max C_L	Max C_L/C_D
$1,26 \times 10^5$	2,46	6,16
$1,9 \times 10^5$	2,47	8,62
$2,53 \times 10^5$	2,49	11,72

Yapılan çalışmanın gerekliliği ve performansını incelemek için sayısal çalışmada kullanılan NACA2415’in slatlı ve slatsız durumda ki C_L ve C_D değerleri Şekil 4.64’da görülmektedir. Şekil incelendiğinde, kanadın slatsız halinde maksimum kaldırma kuvveti 1.35 olarak bulundu. Slatlı NACA 2415 kanadı incelendiğinde ise bu değer 2.45 olarak elde edildi. Slatın kaldırma kuvvetine etkisi de yapılan sayısal çalışma ile kanıtlanmış oldu.



Şekil 4.64 : Slatlı ve slatsız NACA2415'in hava akışında farklı hücum açılarında C_L ve C_D değerleri grafiği ($Re=1 \times 10^5$)



Şekil 4.65 : Slatlı ve slatsız NACA2415'in hava akışında farklı hücum açılarında C_L/C_D değerleri grafiği ($Re=1 \times 10^5$)

Dizayn parametresi olan C_L/C_D oranın slatlı ve slatsız NACA2415 kanatın değerleri karşılaştırıldığında Şekil 4.65 bakılırsa, maksimum C_L/C_D değeri slatlı kanatta su akışında $2,53 \times 10^5$ Re sayısında 11,79 iken, slatsız kanatta da değer 9,83 olarak bulundu.

b. Su ortamında elde edilen kanat kesit açıları

FLUENT™ programı analizi ile elde edilen sonuçlara göre, kanat profili dizayn edilirken genelde C_L/C_D oranının maksimum olduğu andaki hücum açısı seçilir. Sonuçlar incelendiğinde bu değer $2,53 \times 10^5$ Re sayısında, $h/c_1=0,165$ konumlarında 10° hücum açısında olduğu bulundu.

Aşağıda Çizelge 4.16'da verilen su ortamında, sonuçlar incelendiğinde bu değer $2,53 \times 10^5$ Re sayısında, $h/c_1=0,165$ konumlarında 10° hücum açısında olduğu bulundu. Buna göre kanat üzerindeki diğer açılar da elde edildi.

Çizelge 4.16 : $\alpha = 10^\circ$ ve $\delta = 19^\circ$ 'daki kanat kesit açıları ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

$h/c_1=0.165$							
r (m)	r/R	λr	φ	$\alpha(0)$	$\Theta_p = \varphi - \alpha$	$\Theta_{p,o}$	$\Theta_T = \Theta_p - \Theta_{p,o}$
0,05	0,1	0,5	42,29	10	32,29	-2,46	34,75
0,1	0,2	1	30	10	20	-2,46	22,46
0,15	0,3	1,5	22,46	10	12,46	-2,46	14,92
0,2	0,4	2	17,73	10	7,73	-2,46	10,19
0,25	0,5	2,5	14,53	10	4,53	-2,46	6,99
0,3	0,6	3	12,29	10	2,29	-2,46	4,75
0,35	0,7	3,5	10,63	10	0,63	-2,46	3,09
0,4	0,8	4	9,36	10	-0,64	-2,46	1,82
0,45	0,9	4,5	8,35	10	-1,65	-2,46	0,81
0,5	1	5	7,54	10	-2,46	-2,46	0

4.1.2.3. Su ortamında elde edilen güç

Bu bölümde NACA2415 ve NACA22'li halinin $2,53 \times 10^5$ Re sayısında performansı incelendi. Elde edilen aerodinamik sonuçlar ile Çizelge 4.17 oluşturuldu.

Çizelge 4.17 : Slatlı ve slatsız NACA2415'in hava akışında elde edilen aerodinamik sonuçlar ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

Su Ortamında			
$h/c=0.165$			
$Re= 1 \times 10^5$ (12 m/s)	Uç Hız Oranı	$(C_L/C_D)_{max}$	$(C_L/C_D)_{max}$
	(λ)		Hücum Açısı
NACA 2415	5	9,83	6
NACA2415+NACA22	5	11,25	12

Yapılan bütün çalışmalarda C_L/C_{Dmax} 'ın öneminden bahsettik, güç hesabında da bu değer oldukça önemlidir. Eşitlik 3.9'da da görüleceği gibi C_p değeri için önemli bir parametredir. Bu değeri ne kadar artırırsak o kadar fazla güç elde edilir.

Çizelge 4.18 : Slatsız NACA2415 kanat profilinin hava ortamında Güç, İtke ve Tork değerleri ($Re=2.53 \times 10^5$)

$Re= 1 \times 10^5$ (12 m/s)	
Naca 2415	
Açısal Hız (Ω)	20 rad/sn = 191 rpm
Güç (P)	768,79 kW
Net Güç ($\eta_{mek} = 0.9, \eta_{jen} = 0.85$)	588,13 kW
İtke Kuvveti (T)	413,4 N
Tork (Q)	19,16 N.m

Çizelge 4.19 : Slatlı NACA2415 kanat profilinin hava ortamında Güç, İtke ve Tork değerleri ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

$Re= 2,53 \times 10^5$ (12 m/s)	
NACA 2415+NACA22	
Açısal Hız (Ω)	20 rad/sn = 191 rpm
Güç (P)	910,37 kW
Net Güç ($\eta_{mek} = 0.9, \eta_{jen} = 0.85$)	696,44 kW
İtke Kuvveti (T)	498,14 N
Tork (Q)	22,66 N.m

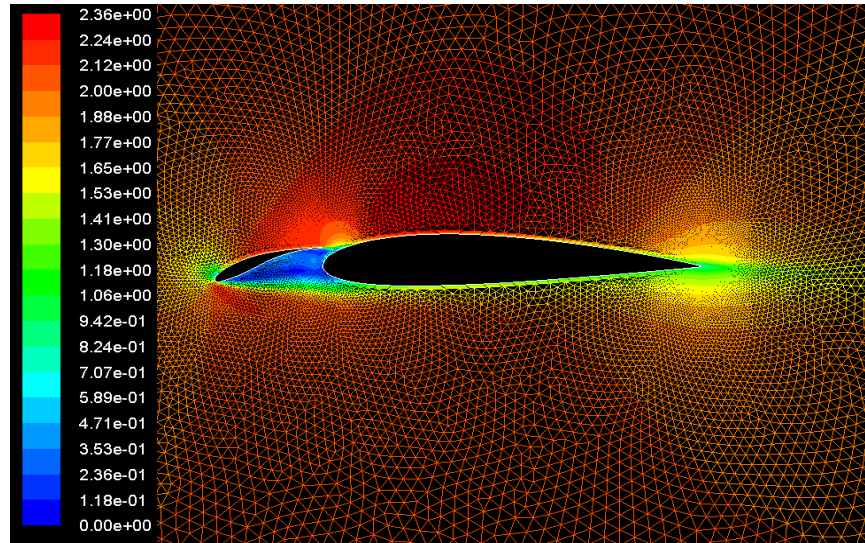
Çizelge 4.18 ve 4.19'de ki güç değerleri incelendiğinde NACA22 kanadı eklenmiş halde ki güç değerinin %15 kadar daha yüksek olduğunu görmektedir.

4.1.2.4. Kanat profilinin akış karakteristikleri

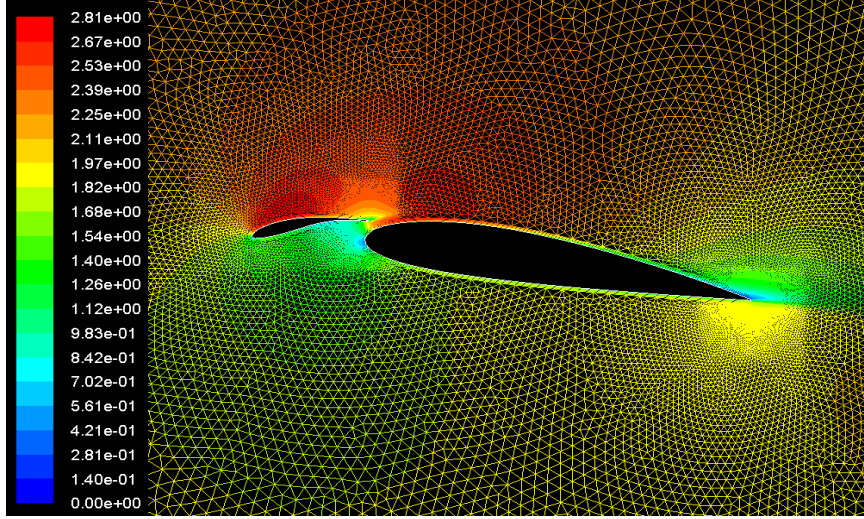
Bu bölümde kanat kesitinin akış karakteristikleri incelenmiş olup, kanat üzerindeki hız dağılımları, akım çizgileri oluşturma, türbülans şiddetleri ve vorteks kopma frekansları belirlendi.

a. Slatlı Kanat Profilinin Kanat Üzerinde Oluşan Hız Konturları

Her iki kanadı da incelerken alınan sonuçlarda ki kritik noktaların hız konturlarını incelendi. Bunlar kaldırma kuvvetinin maksimum olduğu, C_L/C_D oranının maksimum olduğu yerlerdir. Slatlı kanat için, su ortamında 2.53×10^5 Re sayısında 0° , 10° , 33° ve 35° hücum açlarındaki hız konturlarıdır. Daha sonra slatsız Naca 2415 kanat profili için, su ortamında 2.53×10^5 Re sayısında 0° , 6° , 18° hücum açlarında hız konturlarını incelendi.

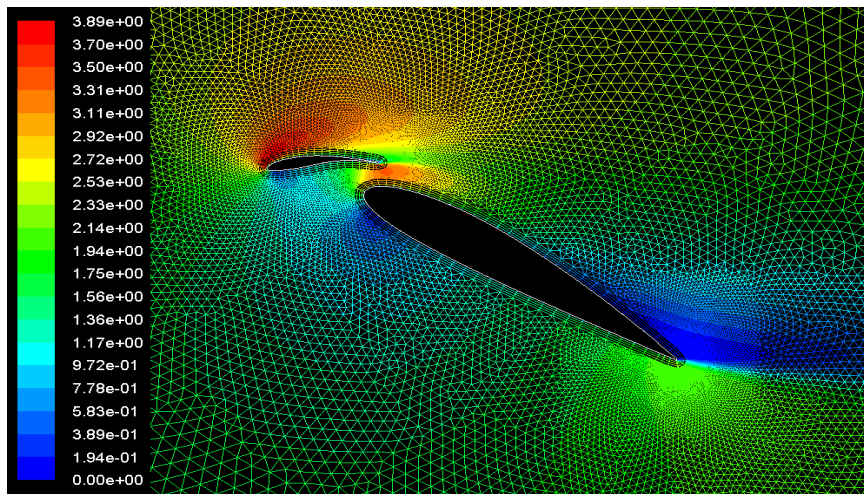


Şekil 4.66 : $\alpha = 0^\circ$ 'da ve $\delta = 19^\circ$ 'daki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

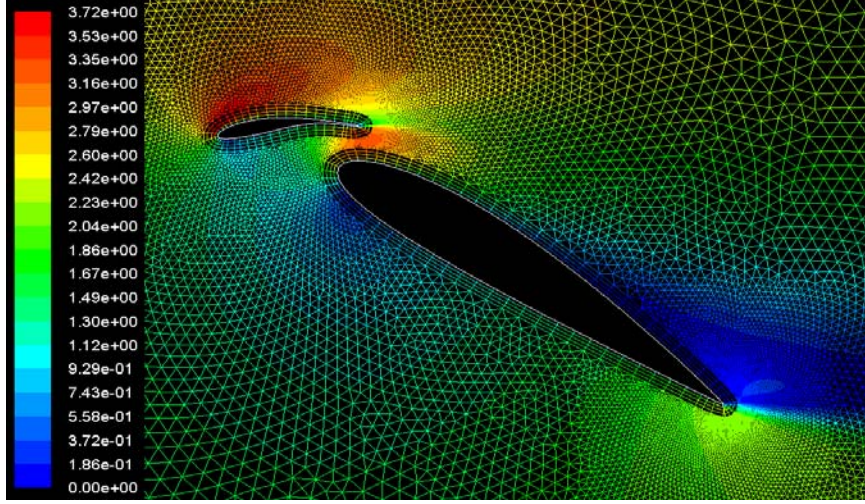


Şekil 4.67 : $\alpha = 10^{\circ}$ 'da ve $\delta = 19^{\circ}$ 'daki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

Su ortamındaki hız konturlarını incelenecek olursa, Şekil 4.66 de 0° hücum açısında 2.53×10^5 Re sayısında yani 2 m/s hızda maksimum hızın 2.36 m/s'ye çıktığını görmektedir. Kanadın alt kısmında ve slatın belirli yerlerinde hızın oldukça düştüğü hatta bazı bölgelerde 0 m/s kadar inmektedir. C_L/C_D katsayısının maksimum olduğu Şekil 4.67 de 10° hücum açısında bu hız 2.81 m/s ye, C_L (kaldırma kuvveti)'nin maksimum olduğu Şekil 4.68 'da 33° hücum açısına geldiğinde de ise bu hız 3.89 m/s'ye kadar çıkmaktadır. Bu da hücum açısının artması ile hızlarında arttığını göstermektedir. Fakat yüksek hücum açılarında kanattan ayrılmalar meydana geldiği için kaldırma kuvvetinde azalmalar meydana gelmektedir. Fakat tutunma açısından sonra Şekil 4.69'da 35° hücum açısında incelendiğinde 3.72 m/s' ye düştüğü görülmektedir.



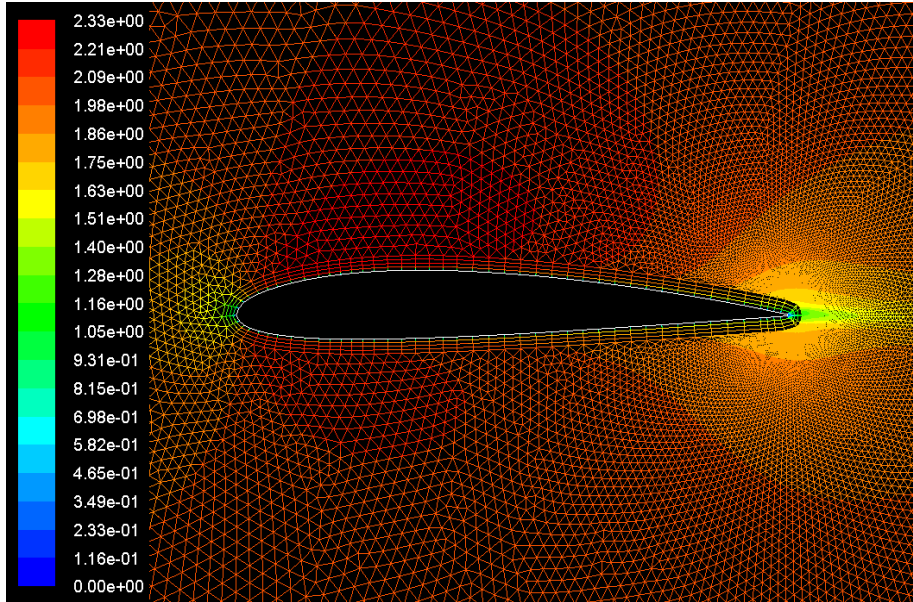
Şekil 4.68 : $\alpha = 33^{\circ}$ 'da ve $\delta = 37^{\circ}$ 'deki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)



Şekil 4.69 : $\alpha = 35^\circ$ 'da ve $\delta = 37^\circ$ 'deki hız konturu ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

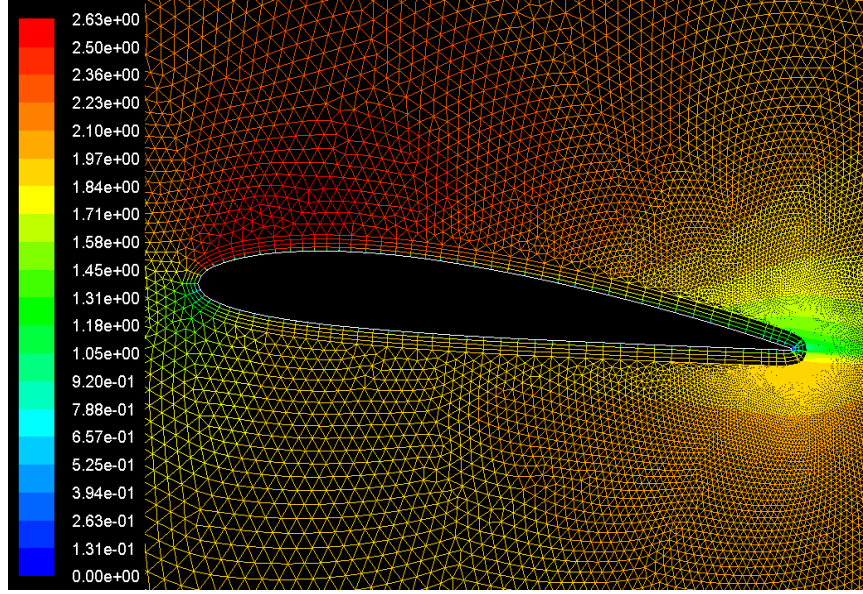
2415 Slatsız Kanadının hız konturları

Naca 2415 kanat profilinin performansını incelemek amacı ile kullandığımız slatın etkisini görmek amacı ile slatsız hali ile karşılaştırmalar yapıldı. Bu karşılaştırmayı, su ortamında 2.53×10^5 Re sayısında yine hesaplanan kritik noktalarda yani, C_L/C_D oranının maksimum olduğu 6° hücum açısında, kaldırma katsayısının maksimum olduğu 18° hücum açısında incelendi.

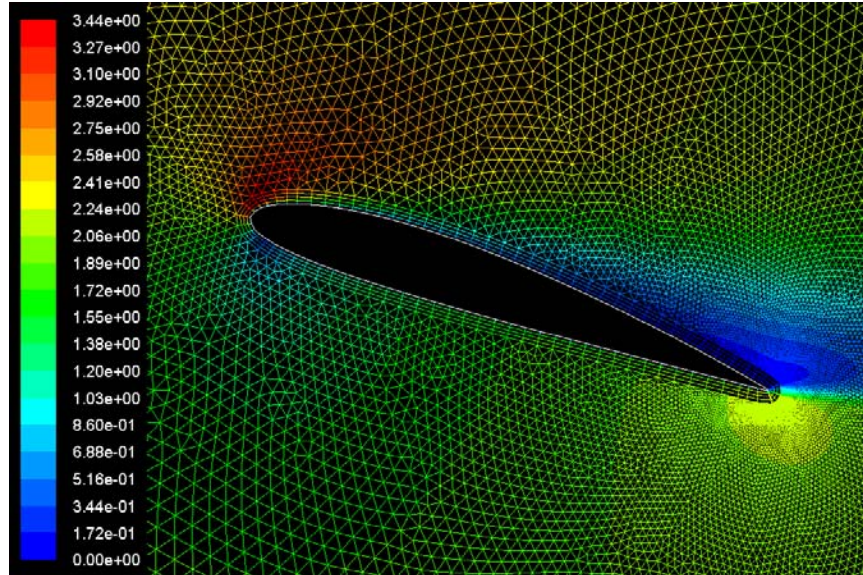


Şekil 4.70 : $\alpha = 0^\circ$ 'daki hız konturu ($Re=2.53 \times 10^5$)

Slatlı kanatta 0° hücum açısında max hız değeri 2.35 m/s iken Şekil 4.70' de görüldüğü gibi 2.33 m/s'dir. Bu değer az olmasının nedeni slatın akış yönünü kanadın üst kısmına doğru yönlendirerek hızın artması ve akışın düzenli olmasını sağlamak olarak yorumlanabilir. Hücum açısı arttıkça hem performans hem de hızlar atmaktadır. Şekil 4.71 ve Şekil 4.72 incelediğinde slatsız kanatta yine hızların biraz daha düşük olduğunu görülmektedir.



Şekil 4.71 : $\alpha = 6^\circ$ 'daki hız konturu ($Re=2.53 \times 10^5$)



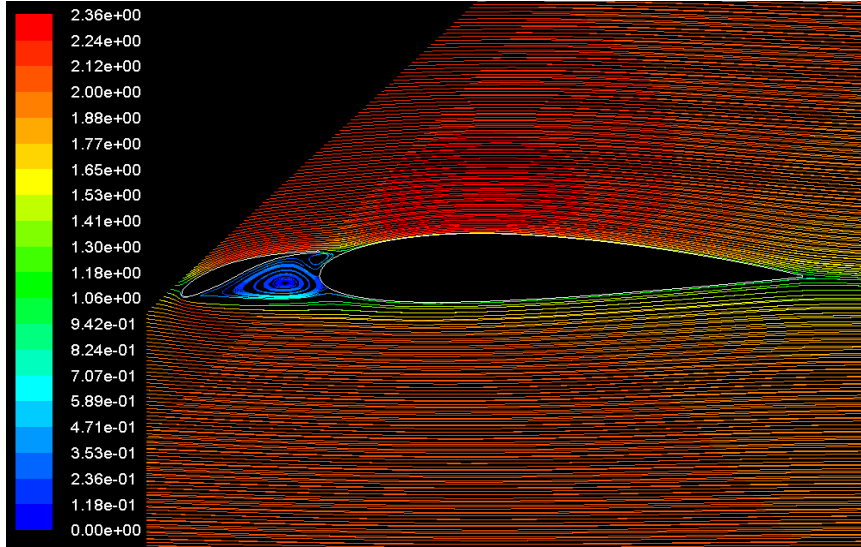
Şekil 4.72 : $\alpha = 18^\circ$ 'deki hız konturu ($Re=2.53 \times 10^5$)

Performanslar karşılaştırıldığında hava akışında ki gibi, tutunma açısında yani C_L 'nin maksimum olukları açılarda slatlı kanadın üst kısmındaki hız slatsız

kanada göre daha fazladır ve yine kanadın alt kısmında slatlı kanatta hızın 0'a kadar düştüğü fakat slatsız kanat profilinde bu değer daha yüksektir. Bu durum slatlı kanatlarda akışın daha kontrollü olduğunu ve basınç farkını da artırarak kaldırma kuvvetinin daha yüksek olmasına neden olmaktadır.

b. Slatlı kanat profili üzerinde oluşan akım çizgileri

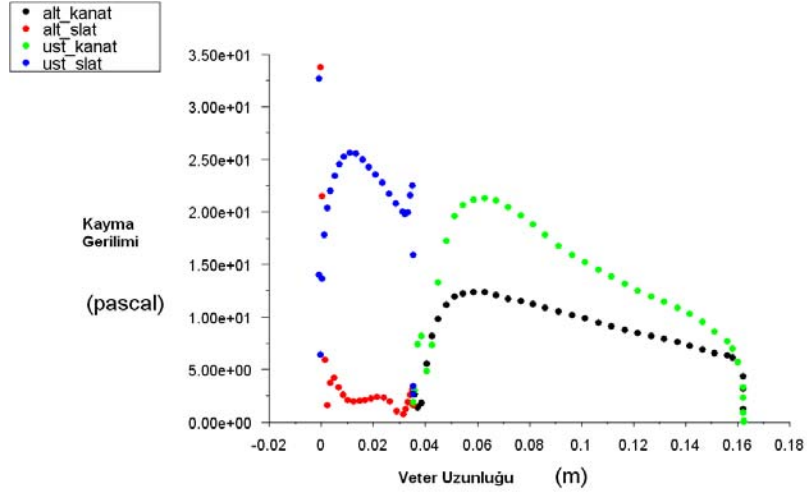
Slatlı kanat profili su ortamında $h/c_{1,opt} = 0,165$ konumundayken, su akışında 2.53×10^5 Re sayısında 0° , 12° , 33° ve 35° hücum açılarında akım çizgileri irdelendi. Ayrıca NACA2415 kanat profili için, su akışında 2.53×10^5 Re sayısında 0° , 6° , 18° ve 21° hücum açılarında akım çizgileri irdelendi ve slatlı kanat profili ile karşılaştırıldı.



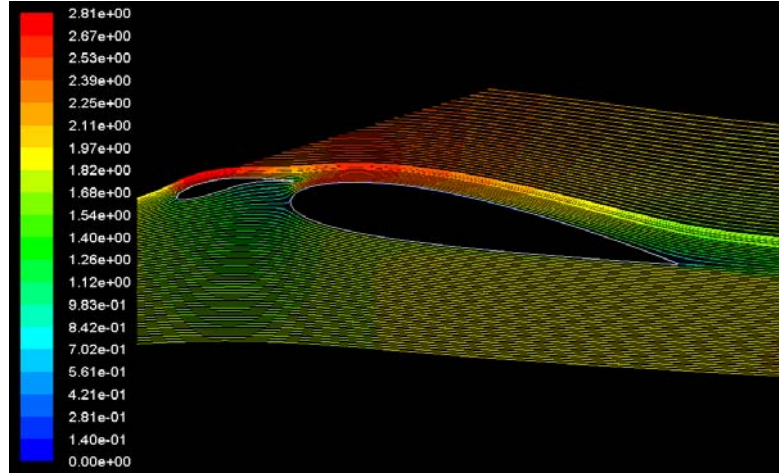
Şekil 4.73 : $\alpha = 0^\circ$ 'da ve $\delta = 19^\circ$ 'daki akış çizgileri ($h/c_1 = 0.165$, $Re = 2.53 \times 10^5$)

Şekil 4.73'da su ortamındaki 0° hücum açısında; slat ile kanat arasındaki boşluktan dolayı bir laminar ayrılma kabarcığının oluştuğunu görülmektedir. Bu da daha önce bahsettiğimiz gibi daha sonra kanada tekrar yapışacaktır.

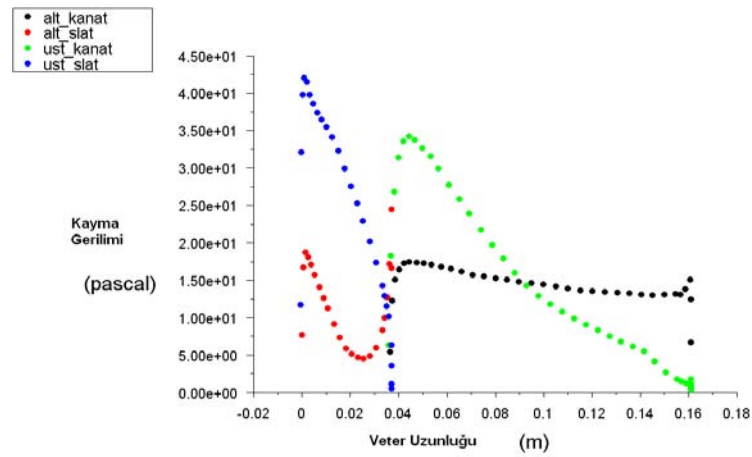
Şekil 4.74'de 0° hücum açısındaki cidar kayma gerilmesi grafiğini incelediğimizde, bu ayrılma kabarcığının oluştuğu slatın alt kısmında cidar kayma gerilmesi grafikte sıfır noktasındadır.



Şekil 4.74 : $\alpha=0^0$ 'da ve $\delta=19^0$ 'daki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

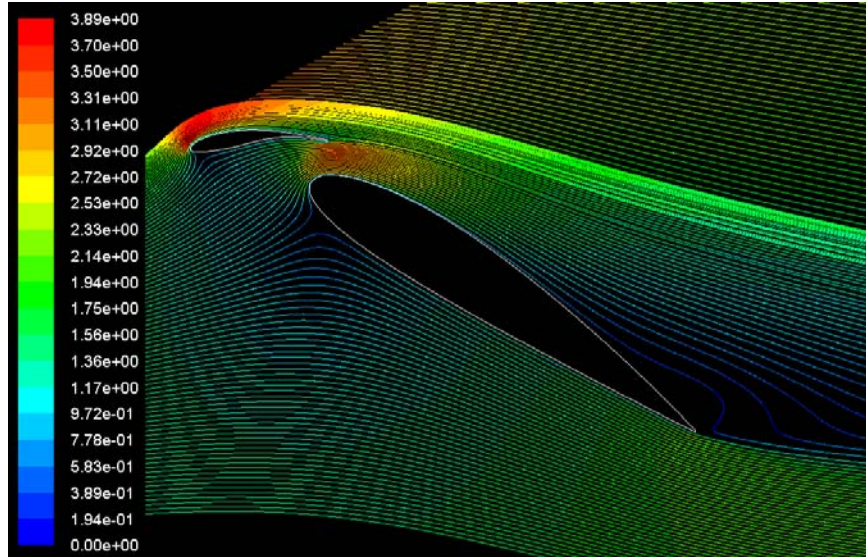


Şekil 4.75 : $\alpha=10^0$ 'da ve $\delta=19^0$ 'daki akış çizgileri ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

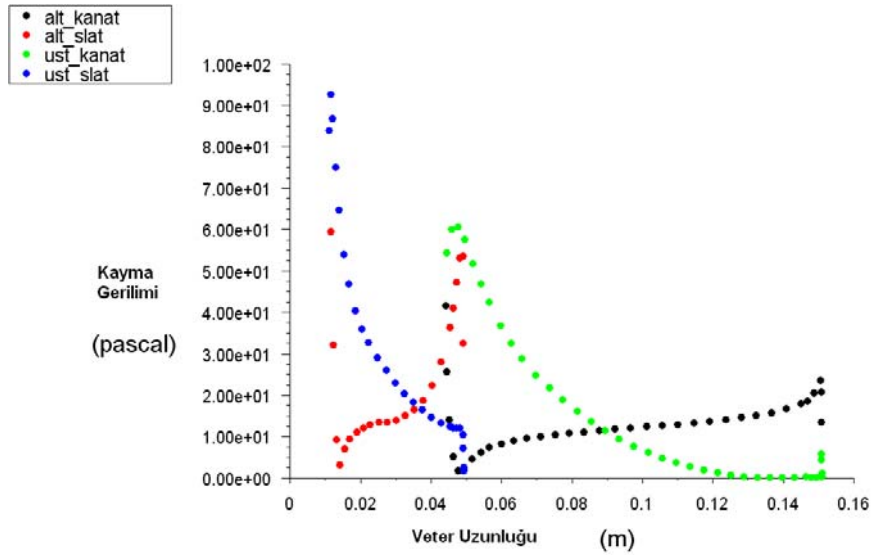


Şekil 4.76 : $\alpha=10^0$ 'da ve $\delta=19^0$ 'daki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

10^0 hücum açısında Şekil 4.75'de ayrılma kabarcığının kanatlar arasından kanatın üst kısmından firar kenarına doğru giderek yüzeye yapışmaya başladığını görülmektedir. Şekil 4.76'da 10^0 hücum açısındaki cidar kayma gerilmesinden laminer ayrılma kabarcığının firar kenarında doğru kaydığını ve çok daha azaldığını görüldü.



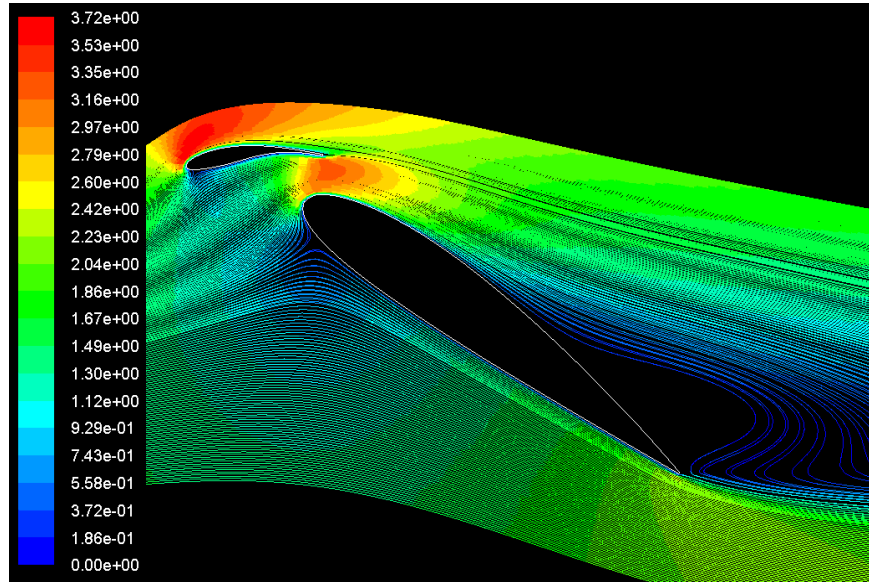
Şekil 4.77 : $\alpha = 33^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'daki akış çizgileri ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)



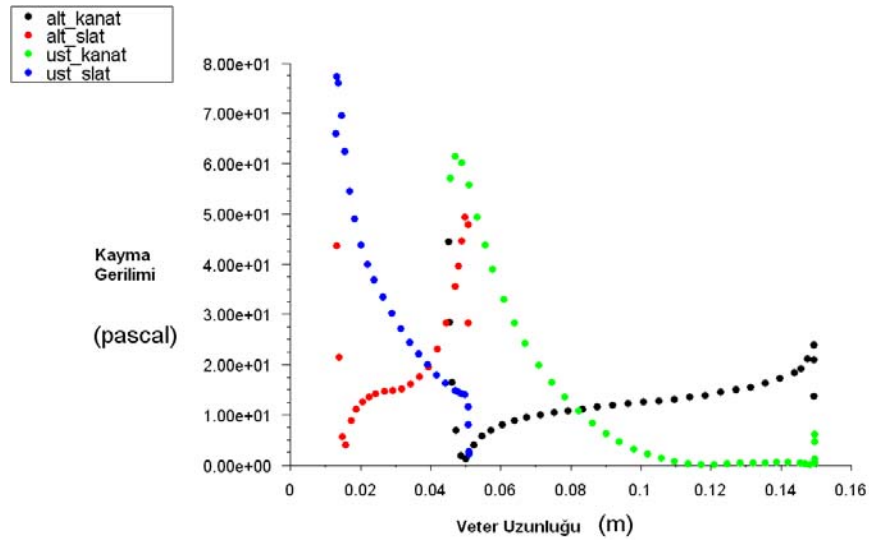
Şekil 4.78 : $\alpha = 33^0$ 'da ve $\delta = 37^0$ 'daki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

Tutunma açısında Şekil 4.77 'da da görüldüğü gibi 33^0 hücum açısında firar kenarında türbülansa geçerek kanatlardan ayrılmaya başlamıştır. Şekil 4.78'deki

cidar kayma gerilimi grafiği incelendiğinde firar kenarına yakın bölgesinde kanadın $\frac{1}{4}$ 'lük kısmında kayma gerilimi 0'dır ve türbülans ayrılmalar başlamaktadır. Tutunma açısından sonra 33° hücum açısından sonra Şekil 4.79'ye bakarsak eğer, türbülanslı bölgenin arttığını ve slatın yani hücum kenarına doğru iyice kaydığını görüldü. Bu da sürüklenme katsayısının çok fazla artmasına ve kaldırma katsayısını düşüşüne neden olacaktır. Şekil 4.80'de cidar kayma gerilimine bakılacak olursak, slatın orta kısımlarından itibaren kayma geriliminin 0'a yaklaştığı ve daha sonra 0 olduğu görülmektedir.



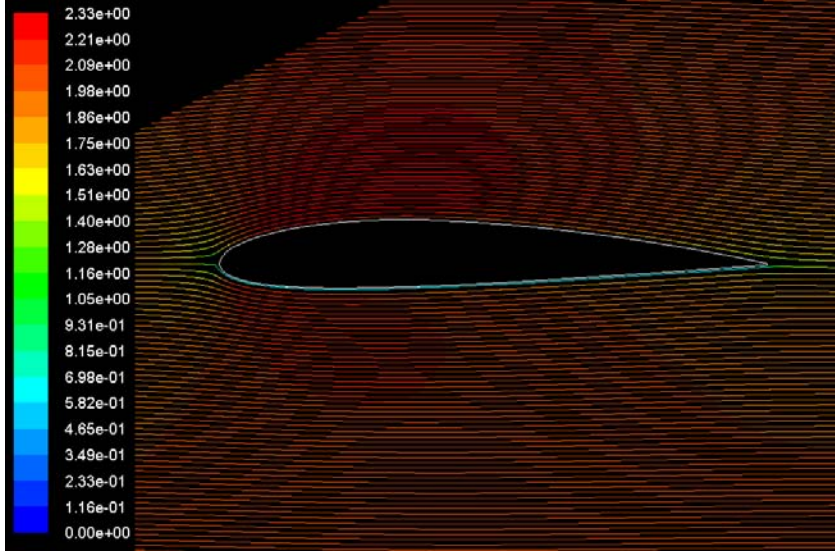
Şekil 4.79 : $\alpha = 35^\circ$ 'da ve $\delta = 37^\circ$ 'daki akış çizimleri ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)



Şekil 4.80 : $\alpha = 35^\circ$ 'da ve $\delta = 37^\circ$ 'daki cidar kayma gerilimi ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

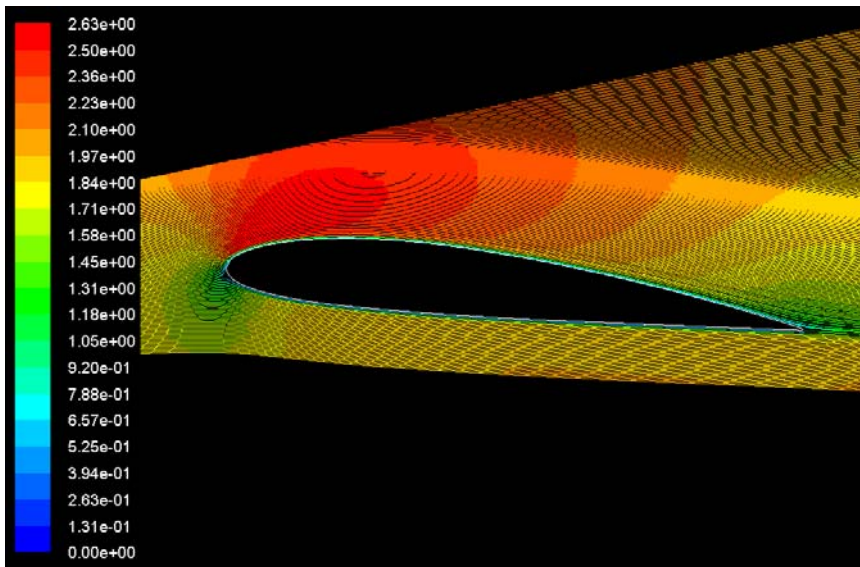
NACA2415 kanadının akış çizgileri ;

NACA2415 kanat profilinde, Şekil 4.81' de su ortamlarında 2.53×10^5 Re sayısında 0° hücum açılarında laminer ayrılma kabarcığının ve kuyrukta türbülansa geçiş ayrılmalarının su ortamındaki gibi olmadığı görüldü.



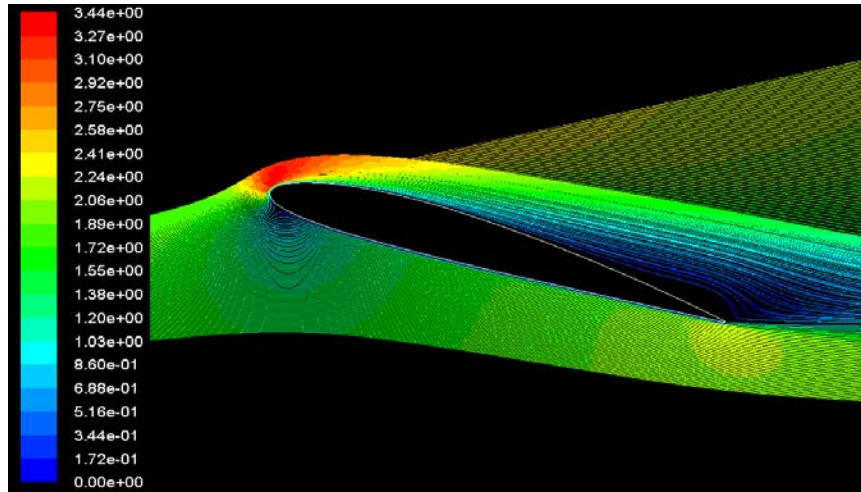
Şekil 4.81 : $\alpha = 0^\circ$ 'daki akış çizgileri ($Re = 2.53 \times 10^5$)

6° hücum açısında Şekil 4.82'de su ortamındaki NACA2415 kanat profilinin akım çizgileri görülmektedir. Kanat profilinin firar kenarında akış ayrılması çok az da olsa görülmektedir.

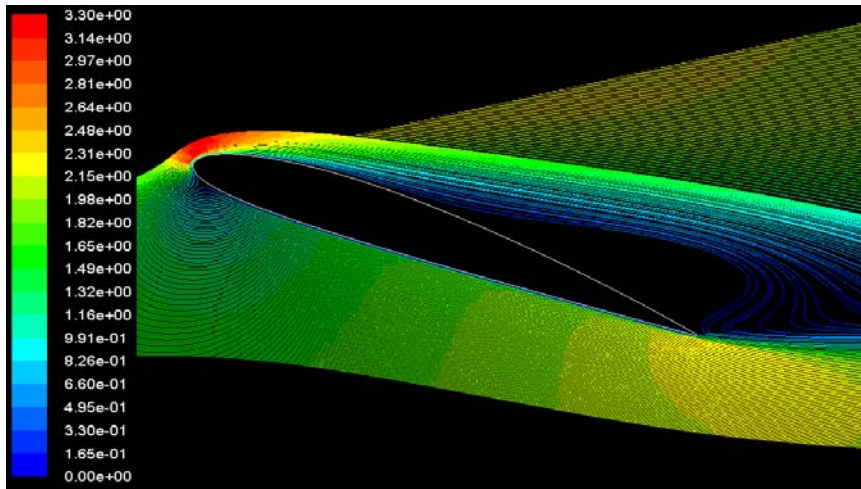


Şekil 4.82 : $\alpha = 6^\circ$ 'daki akış çizgileri ($Re = 2.53 \times 10^5$)

NACA 2415'in tutunma açısı olan ve Şekil 4.83'da görülen 18° hücum açısındaki akım çizgileri incelendiğinde, kanadın firar kenarında yavaş yavaş türbülans ayrılmaları oluşmaya başlamaktadır. Bu da sürükleme kuvvetinin artmasına neden olmaktadır. Tutunma açısından sonra 21° hücum açısını incelenecek olursa, Şekil 4.84'de de türbülans akımları firar kenarından artık hücum kenarına doğru kaymaktadır ve kanat profili arkasında geniş bir türbülanslı bölgeler oluşmaktadır.



Şekil 4.83 : $\alpha = 18^\circ$ 'deki akış çizgileri ($Re=2.53 \times 10^5$)

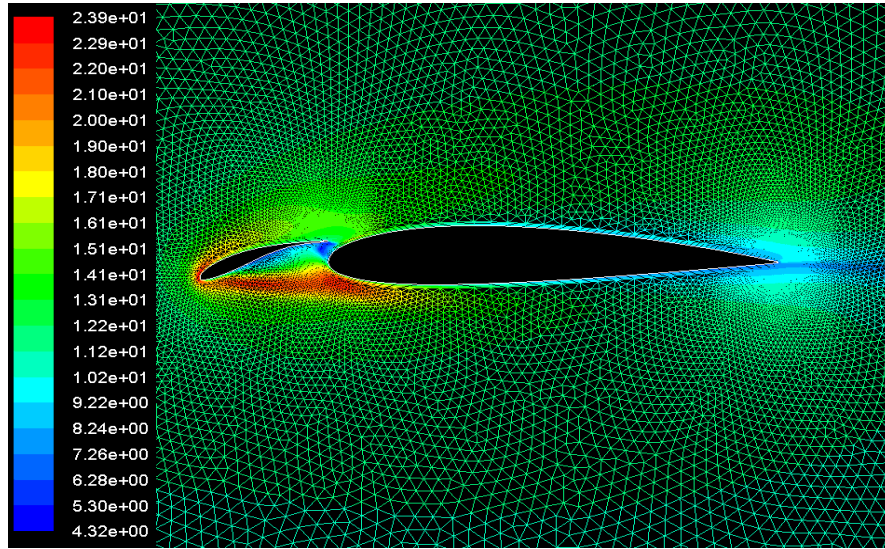


Şekil 4.84 : $\alpha = 21^\circ$ 'deki akış çizgileri ($Re=2.53 \times 10^5$)

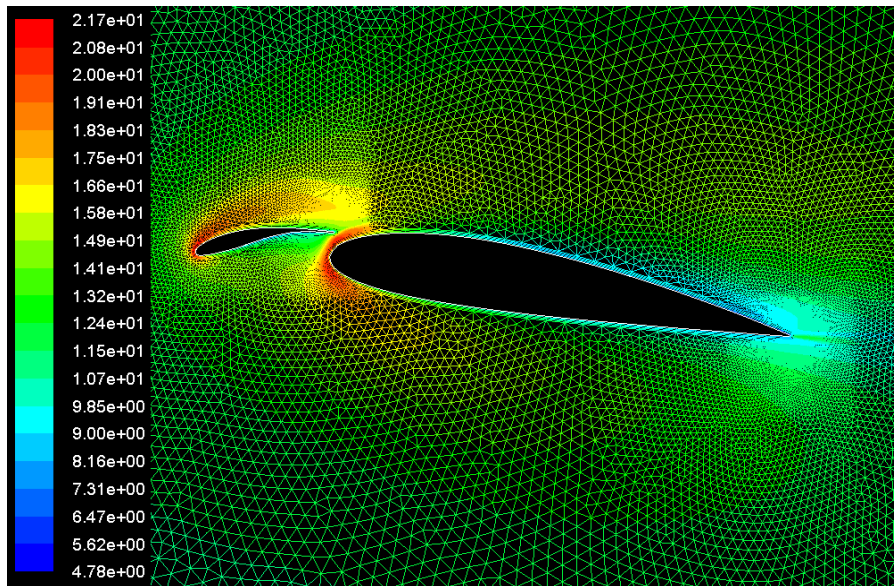
Slatlı ve slatsız kanat profilleri incelendiğinde türbülansa geçiş akışları slatsız kanatta 18° hücum açısında meydana gelirken, slatlı kanatta bu açı 33° hücum açısına kadar çıkarıldı ve bu hücum açısındaki artış ve tutunma açısındaki artış bize kaldırma kuvvetinde de oldukça fazla bir artış sağladı.

c. Slatlı kanat profilinin kanat üzerinde oluşan türbülans şiddetleri

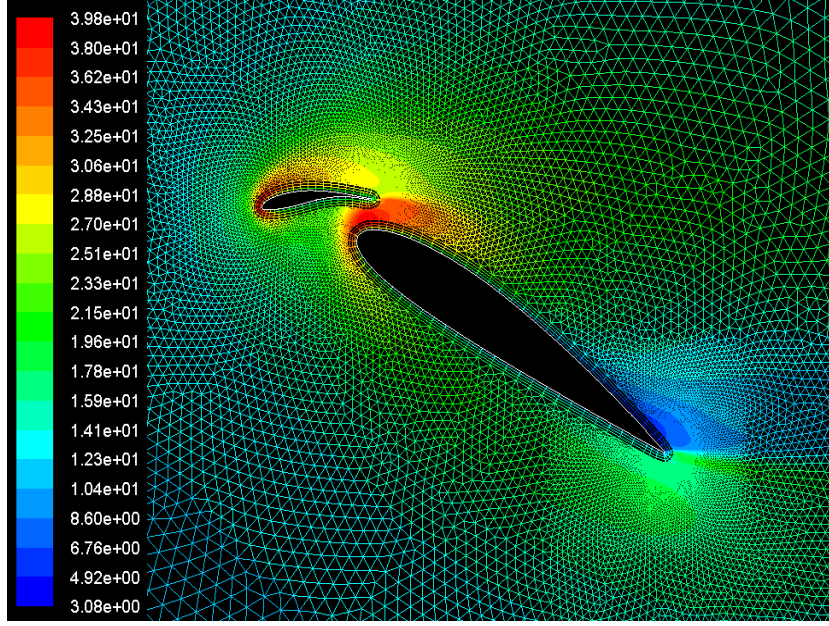
Su ortamında Şekil 4.85 incelendiğinde 0° hücum açısında slatla ile kanat arsında kalan kısımda kırmızı renk ile belli olan yerde türbülans şiddetinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu bölgede türbülans şiddeti %23.9 civarındadır. 10° hücum açısında Şekil 4.86'a baktığımızda kanadın firar kenarında türbülans şiddetinin arttığı görülmektedir. 10° hücum açısındaki türbülans şiddeti %21.7 civarındadır ve 0° hücum açısındaki türbülans şiddetindeki değerden daha az bir yüzdededir.



Şekil 4.85 : $\alpha = 0^\circ$ 'da ve $\delta = 19^\circ$ 'daki türbülans şiddeti ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

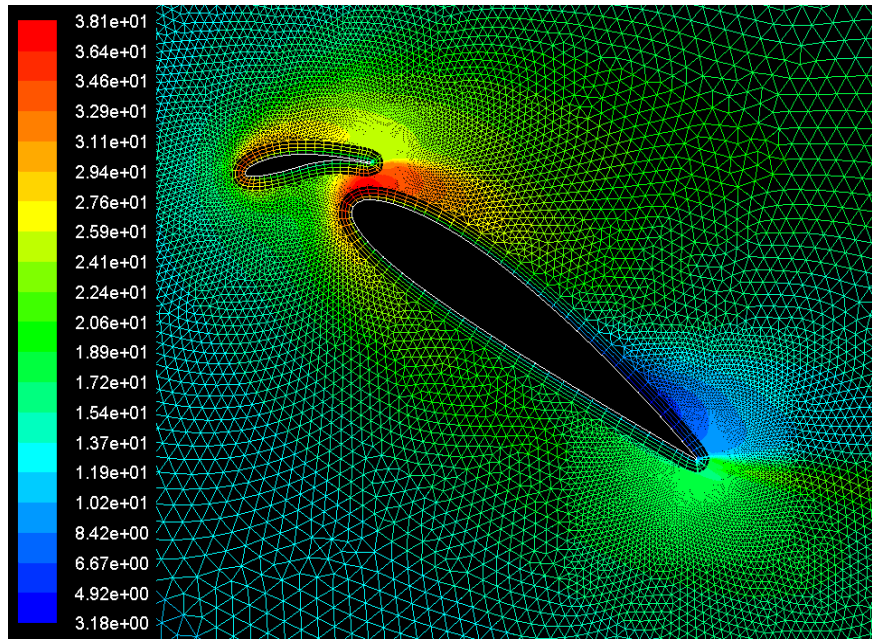


Şekil 4.86 : $\alpha = 10^\circ$ 'da ve $\delta = 19^\circ$ 'daki türbülans şiddeti ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)



Şekil 4.87 : $\alpha = 33^\circ$ 'da ve $\delta = 37^\circ$ 'deki türbülans şiddeti ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

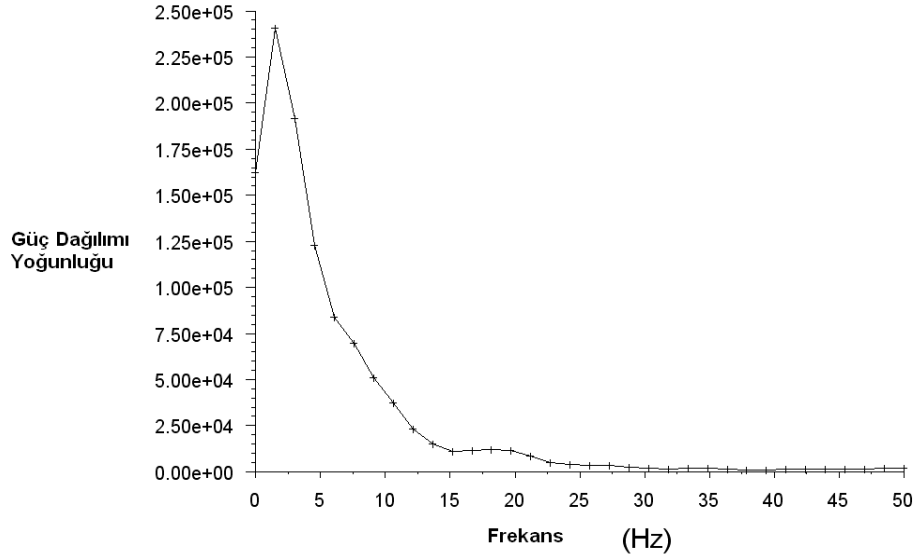
Şekil 4.87' de kanadın firar kenarı akış bölgesinde yüksek türbülans bölgesi görülmekte olup şiddeti %39.8 olarak elde edilmiştir. Tutunma açısından sonra 35° hücum açısından sonra Şekil 4.88'da görüldüğü gibi daha da yoğunlaşarak türbülans şiddeti %38.1 olarak elde edildi ve türbülanslı bölgenin arttığını ve slatın yani hücum kenarına doğru iyice kaydığını gördü.



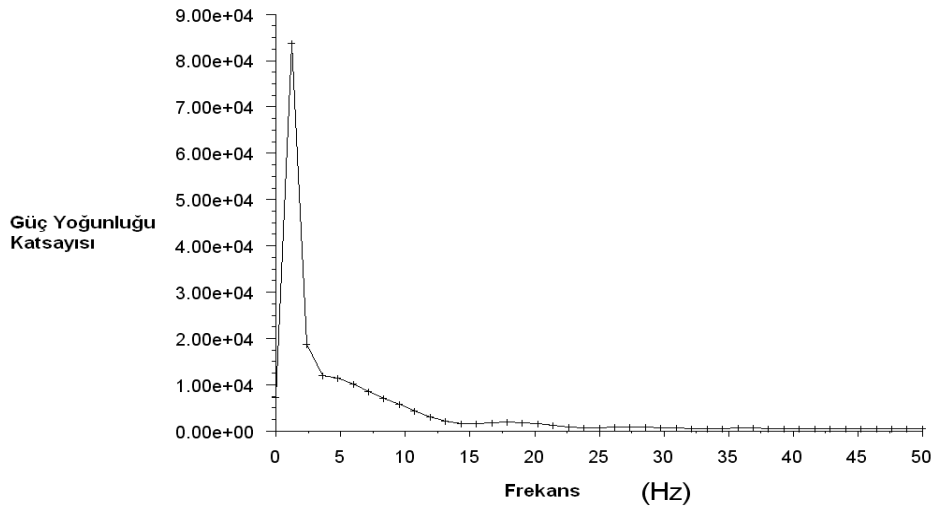
Şekil 4.88 : $\alpha = 35^\circ$ 'da ve $\delta = 37^\circ$ 'daki türbülans şiddeti ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

d. Slatlı kanat profilinin kanat üzerinde oluşan vorteks kopma frekansları

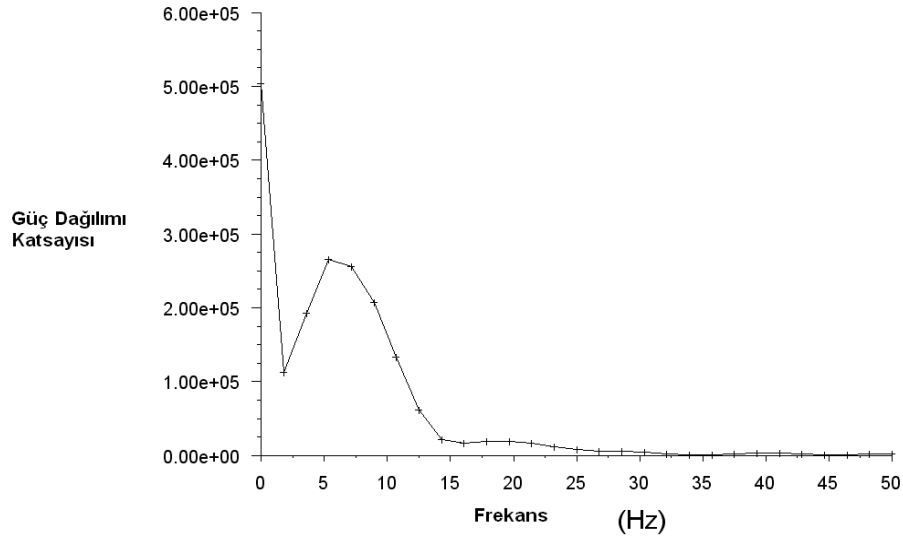
Bu bölümde incelediğimiz kanat profili olan slatlı kanat profili için su ortamında 2.53×10^5 Re sayısında 0° , 10° ve tutunma açısı olan 33° hücum açısında vorteks kopma frekansları incelenmektedir.



Şekil 4.89 : $\alpha = 0^\circ$ 'da ve $\delta = 19^\circ$ 'daki vorteks kopma frekansı (Hz) ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)



Şekil 4.90 : $\alpha = 10^\circ$ 'da ve $\delta = 19^\circ$ 'daki vorteks kopma frekansı (Hz) ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)



Şekil 4.91 : $\alpha = 33^\circ$ 'da ve $\delta = 37^\circ$ 'deki vorteks kopma frekansı (Hz) ($h/c_1=0.165$, $Re=2.53 \times 10^5$)

0° hücum açısında Şekil 4.89' de elde edilen vorteks kopma frekansı 2,5Hz ve Strouhal sayısı 0.030 iken, Şekil 4.90'da maksimum C_L/C_D oranının elde edildiği 10° hücum açısında vorteks kopma frekansı 0° hücum açısındaki değerden daha düşük olan 1.5Hz frekansındadır ve Strouhal sayısı 0.010 olarak görüldü. Şekil 4.91'de tutunma kaybı açısı olan 33° hücum açısında vorteks kopma frekansı 5.5Hz ve Strouhal sayısı 0.045'dür. Hücum açısının artmasıyla girdap oluşumunun da arttığını görülmektedir. 0° hücum açısında laminer ayrılma kabarcığının olmasından dolayı yüksek olan frekans, optimum hücum açısı olan 10° hücum açısında slatın akışı düzenli hale getirmesinden dolayı daha az , fakat açının artmasıyla kanat yüzeyinden kopmalar ve girdap oluşumu arttıkça frekansında arttığı görülmektedir.

4.1.3. Hava ve su ortamındaki sonuçların irdelenmesi

Bu bölümde daha önceden hem hava hem de su ortamında yapmış olduğumuz sayısal çalışmaların sonuçlarının irdelendi. Bu değerler parametrelerimiz olan kanatlar arası aralık $h/c_{1,opt}$ değeri, hücum açıları, slat açıları kaldırma ve sürüklenme katsayılarıdır.

Hava ve su ortamında farklı kanat ve slat aralıkları çalışmaları sonucunda, iki ortam içinde $h/c_{1,opt}=0.165$ olarak hesaplandı. Bu hesaplamalar sırasında slat açısı sabit olarak çalışıldı. Çizelge 4.20 ve 4.21 incelendiğinde Bu değerler

Çizelge 4.20 ve 4.21 görüleceği gibi daha öncede bahsettiğimiz her iki ortamda da dizayn parametremiz olan C_L/C_D maksimum olduğu durumda ki kanat aralığıdır.

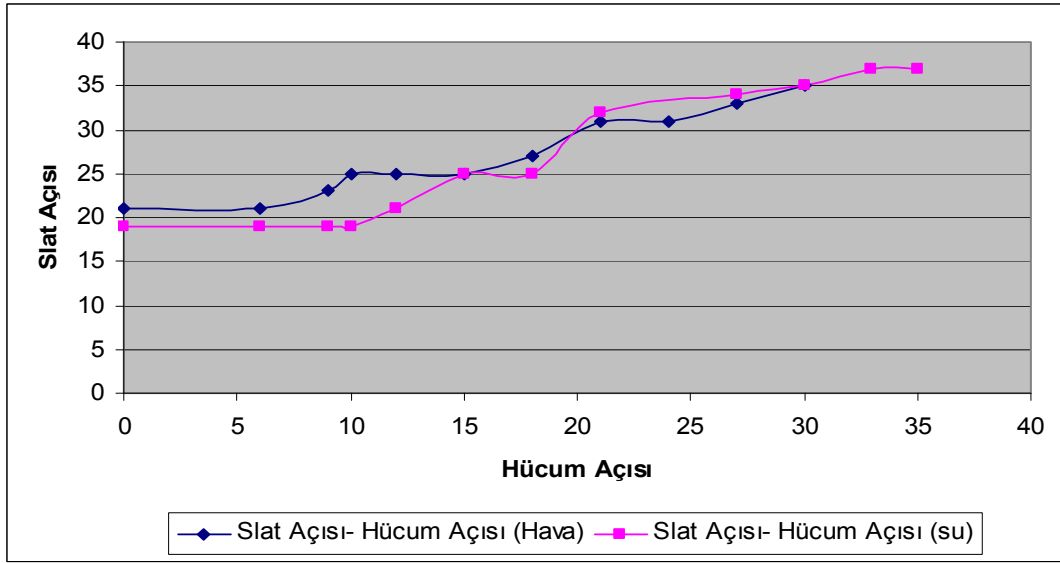
Çizelge 4.20: Farklı h/c_1 oranlarında ve $\delta_{sbt}=25^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($Re=1 \times 10^5$)

h/c_1	Maksimum C_L	Maksimum Cl/Cd	Max C_L/C_D Slat Açısı	Max C_L/C_D Hücüm Açısı
0,125	1,747	21,229	25	12
0,145	2,015	24,218	25	12
0,165	2,132	25,710	25	12
0,185	2,168	24,810	25	12

Çizelge 4.21: Farklı h/c_1 oranlarında ve $\delta_{sbt}=19^0$ 'daki aerodinamik katsayıları ($Re=2.53 \times 10^5$)

h/c_1	Maksimum C_L	Maksimum Cl/Cd	Max C_L/C_D Slat Açısı	Max C_L/C_D Slat Açısı
0,125	1,576	9,602	19	12
0,145	1,648	10,775	19	10
0,165	1,800	11,721	19	10
0,185	1,939	10,972	19	12

Yapılan aerodinamik kuvvet analizi çalışmalarında, slatın etkisi ile her iki akışkanda da slatsız hallerine göre daha yüksek performans gösterdi. Bu da slatın aerodinamik kuvvetler üzerindeki etkisini açıkça gösterdi. Hem su hem de hava ortamında Şekil 4.92' da görülen hücüm açısının artması ile slatın açısı da arttığı ve artan hücüm açıları ile kaldırma kuvve tininde arttığı görüldü.



Şekil 4.92: Farklı hücum açılarındaki optimum slat açıları grafiği (h/c₁=0.165)

Aşağıdaki çizelgede daha önce sabit tutulan slat açısını değiştirerek h/c_{1,opt} değerindeki hava ve su ortamındaki maksimum kaldırma kuvveti C_L ve C_L/C_D değerleri ve bu değerlerin elde edildiği hücum ve slat açıları görülmektedir.

Çizelge 4.22: Hava ve su ortamındaki maksimum aerodinamik katsayı değerlerinde ve açıları

<i>h/c₁=0.165</i>	<i>Maksimum C_L</i>	<i>Maksimum C_L/C_D</i>	<i>Max C_L/C_D Slat Açısı</i>	<i>Max C_L/C_D Hücum Açısı</i>
<i>Hava</i>	2,464	26,243	25	12
<i>Su</i>	2,492	11,721	19	10

Slatlı ve slatsız kanatlarda, performans karşılaştırılması için yapılan çalışma sonucunda, hava ve su ortamında kaldırma kuvveti C_L ve C_L/C_D değerlerinde artış olduğu görüldü.

Her iki ortamda da hücum açısının artması ile basınç farklarının arttığı ve buna bağlı olarak kanadın üst kısımlarında akışın hızlandığı düşük basınç bölgelerinin oluşması ve alt kısımda hızın düşük olmasından dolayı yüksek basınç bölgeleri oluşarak kaldırma kuvvetinin hücum açısı ile artmaktadır. Bu artış tutunma açıları kadar devam ettiği daha bu açılardan sonra düşmeye başladığı görüldü.

Hava ve su ortamındaki kaldırma kuvvetindeki fark, iki ortam arasındaki tutunma açısından kaynaklanmaktadır. Hava ortamındaki tutunma açısı 27° hücum açısında gerçekleşirken su ortamında bu değer 33° hücum açısına kadar çıkmaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi tutunma açısındaki artış aerodinamik performansının artmasına sebep olmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllardaki aerodinamik araştırmalar; akış kontrolü, laminer ayrılma kabarcığı kontrolü ve daha yüksek taşıma kuvveti/sürükleme kuvveti oranı gibi konular üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu konularda çalışmak için aerodinamik deney olanaklarının kısıtlı ve çok pahalı olmasından dolayı kanat etrafındaki akışlar HAD çerçevesinde yaygın olarak incelenmektedir. Türbülansa geçiş akışlarına mini, mikro ve insansız hava araçlarının uçuşlarında, rüzgar türbini kanatları üzerindeki akışlarda, model uçaklarda karşılaşılr. Re sayısı düşük olduğu için elde edilebilecek en yüksek taşıma ve tutunma kaybı açısı da düşer. Bu tür hava araçlarında türbülansa geçiş akışları ve laminer akım ayrılması ile karşılaşıldığından akışın kontrolü ve hava aracından elde edilebilecek en yüksek taşıma önem kazanmaktadır. Ayrıca ülkemizin bulunduğu coğrafyada jeopolitik öneminden dolayı çok kapsamlı sivil ve askeri ihtiyaçları nedeniyle son yıllarda gerek insansız hava araçları alanında, gerekse ülkemizin enerji ihtiyacından dolayı alternatif enerji kaynağı olan rüzgar enerjisi konusundaki özgün çalışmalar desteklenmektedir.

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında şu anda dünyada kullanmakta olan kanat profillerinin performansını slat ekleyerek arttırmaktır. Slatın etkisi ile kanatlar üzerindeki kaldırma kuvveti arttırmak ve standart kanatlara göre daha da geliştirmektir. Rüzgar türbinlerinin 7 m/s hızın altında çalışmamaktadır. Performansın artması ile bu hızı daha aşağılara çekilebileceği görüldü. Bu hızın daha aşağılara çekilmesi ile rüzgar alanlarını arttırmak ve yıl içerisinde daha fazla esme süresi arttırmak mümkündür. Bu da geri dönüşüm sürelerinin kısalması anlamına gelmektedir. Daha sonra bu kanat profili farklı bir yenilenebilir enerji kaynağı olan Hidrokinetik türbinler için su ortamında denenerek performansı incelendi.

İlk olarak, sayısal çözümlemede kullanmak için kanat ve slat tipimizi belirlendi. Naca 2415 profili laminer ve konveksiyonal akışta kullanım için yaygın olması, laminer akışta uçakların hızını arttırmak için kullanılması ve bu kanat tipi laminer akışı korumak, akışı daha fazla bir % ile kanatta tutarak kontrollü bir akış sağlamasından dolayı seçildi. NACA22 profilinin slat olarak kullanılmasının

nedeni NACA2415 kanat profili taşıma katsayısını arttırmak ve kanat üzerindeki akım ayrılmasını kontrol etmek için NACA2415 kanat profiline NACA22 hücum kenarı slatı olarak eklendi. Hücum kenarı slatının kanat profili seçimi ise Weick ve Sanders'in [35] değişik profiller ve veter boyları ile azami taşımanın değişimi ile ilgili çalışmaları üzerine belirlendi. Bu çalışmanın sonucunda yüksek kamburluklu NACA22 kanat profilinin daha fazla taşıma katsayısına sahip olduğu görüldü. Slatın boyu ve kalınlığı, rüzgar tüneline test edildiğinde esnemeyecek kadar mukavim olması gerektiğinden azami taşıma katsayısını en az etkileyecek şekilde ideal veter boyu esas kanat profilinin (NACA2415) veter boyunun %30'u yani 38.1 mm alındı.

Daha sonra, boyutsal analiz ve kanat benzeşimi yapıldı. Yapılan boyutsuzlaştırma sonucu slatlı NACA2415 kanat profili için hava ve su koşullarında, farklı kanat arası mesafesi (h/c_1), hücum ve slat açıları ve Reynolds sayısı parametreler olarak belirlendi. Ağ sayısı sayısal çalışmalarda önemli bir yere sahiptir. Ağ sayısının belirlenmesi çalışılacak olan parametrelerden bağımsız olması açısından oldukça önemlidir. Slatlı kanat profili 0.127 oranında küçültülerek GAMBIT™ programında belirli şartlar altında hücre sayısı 55000 olarak belirlendi ve daha sonra belirlenen ağ yapısında kanat profilinin FLUENT™ programında sayısal çözümü yapıldı. Belirlenen parametreler ışığında sayısal çözümler yapıldı ve belirlenen kanat profiline ait basınç konturları, basınç katsayı dağılımları, aerodinamik kuvvetleri, hız konturları, akım çizgileri, türbülans şiddeti konturları ve vorteks kopma frekansları elde edildi. Performansın incelenmesi için slatsız NACA2415 kanat profili ile karşılaştırdı. Hava ortamında yapılan çalışmalar, literatürde daha önce hava ortamında deneysel olarak hesaplanmış sonuçlar ile karşılaştırılarak çalışmanın doğru ilerlediğini görüldü.

İkinci olarak, her iki kanadın, hava ve su ortamında basınç dağılımlarını incelerken alınan sonuçlarda ki kritik noktaların değerlerini incelendi. Yapılan sayısal çalışmada görülmektedir ki hücum açısı arttıkça basınç farkı da artmaktadır. Artan bu basınç farkı ile de kaldırma kuvveti de artmaktadır. Fakat tutunma açısından sonra basınç farklarında bir düşüş olduğu gözlenmektedir. Slatsız kanat incelediğinde yine hücum açısının artması ile basınç farkı artmaktadır. İki kanat için değerlendirilme yapıldığında ise yüksek hücum

açılarında basınç farkının slatlı kanatlarda daha da arttığı gözlenmektedir. Hücum açısındaki artış ile slatlı kanadın performansının arttığı görülmektedir ve kaldırma katsayı artmaktadır.

Slatlı kanat profilinin hava ortamında 1×10^5 Re sayısında, su ortamında ise $2,53 \times 10^5$ Re sayısında çalışıldı. Kanat arası mesafesi belirlemek için, $h/c_1=0.125$, 0.145 , 0.165 ve 0.185 değerlerinde çalışıldı. Yapılan çalışmalar sonucunda hem hava hem de su ortamında C_L/C_D değerinin maksimum olduğu değerde, $h/c_{opt}=0,165$ olarak belirlendi. Bu aralık belirlenirken su ortamında slat açısı 19° , hava ortamında ise 25° 'de sabit tutuldu. Belirlenen $h/c_{1,opt}$ değerinde farklı hücum açılarında slat açısı değiştirildi. Hava ortamında $h/c_{opt}=0,165$ 'de, 1×10^5 Re sayısında, C_L/C_D değerinin maksimum olduğu değerde ki hücum açısı 12° ve 25° slat açısında $26,24$ olarak elde edildi. C_L değerinin maksimum olduğu açı ise 27° ve slat açısı 33° 'de 2.46 olarak bulundu. Bu değerler, su ortamında $h/c_{opt}=0,165$ 'de, $2,53 \times 10^5$ Re sayısında, C_L/C_D değerinin maksimum olduğu değerde ki hücum açısı 10° ve 19° slat açısında iken $11,72$ olarak elde edildi. C_L değerinin maksimum olduğu açı ise 33° ve slat açısı 37° 'de 2.49 olarak bulundu. Slatlı kanat profilinde ise, hava ortamında maksimum kaldırma kuvveti katsayısı 12° derece hücum açısında 1.0266 'dir. Su ortamında ise maksimum kaldırma kuvveti katsayısı 18° hücum açısında 1.351 olarak elde edildi. Hava ortamda maksimum C_L/C_D oranın 6° hücum açısında 21.16 ve su ortamda ise maksimum C_L/C_D oranı 9.833 ile 6° hücum açısında elde edildi Her iki ortamda da slatlı kanatların performansının daha iyi olduğu görüldü. Buradan çıkaracağımız diğer bir sonuç ise, tutunma kaybı açılarındaki değişimdir. Tutunma kaybı açısı ne kadar yüksek ise kaldırma kuvveti de o kadar yüksek olmaktadır.

Parametrelerimizden olan Re sayısının aerodinamik performans üzerindeki etkilerini incelemek için, su ortamında 2.53×10^5 Re, $1,9 \times 10^5$ Re, $1,26 \times 10^5$ Re sayılarında denendi. Sonuçlar incelendiğinde Re sayısının artması ile kaldırma kuvvetinin de arttığı görüldü gözlemlendi.

Tüm bu aerodinamik katsayılar belirlendikten sonra kanat dizayn parametresi olan, C_L/C_D maksimum olduğu hücum açılarındaki kanat kesit açıları belirlendi. Belirlenen bu kanat kesit açılarına göre yapılan güç hesaplamalarında hava ortamında slatlı kanat profilinde, açısal hız (Ω) 1146 rpm ve net güç

($\eta_{mek} = 0.9, \eta_{jen} = 0.85$) 233,5 kW , slatlı kanat profilinde ise net güç 256,8 kW olarak elde edilerek %10'luk bir artış hesaplandı. Su ortamında slatsız kanat profilinde, açısal hız (Ω) 191rpm ve net güç ($\eta_{mek} = 0.9, \eta_{jen} = 0.85$) 588,13 kW iken slatlı kanat profilinde ise net güç 696,44 kW olarak elde edilerek %15'lik bir artış hesaplandı.

Üçüncü olarak , kanat üzerinde oluşan hızılar incelendi. Hava ve su ortamında, slat ile kanat arasındaki boşluktan dolayı oluşan laminer ayrılma kabarcığı ile düşük hız alanları oluşturan kanat profilinin hücum açısı arttıkça bu düşük hız etkisi azalmaktadır. Bu da slatın akış üzerindeki etkisini ve akışı düzenli hale getirdiğini göstermektedir. Düşük hücum açılarındaki etkili olan yüksek hız alanı kanadın orta bölgelerinde oluşmakta iken, hücum açısı artması yüksek hız alanı hücum kenarına doğru kaymıştır. Kanat alt ve üst yüzeyleri arasında hız farkını kanatın kamburlu yapısı ile arttırarak kaldırmaya olan etkisini de arttırmıştır. Slatlı kanat profilinde hava ortamında 1×10^5 Re sayısında (12 m/s) , maksimum hıza 26,1 m/s ile 27° hücum açısında, slatsız kanatta ise maksimum hıza 20,8 m/s ile 12° hücum açısında ulaşmıştır. Slatlı kanat profilinde su ortamında $2,53 \times 10^5$ Re sayısında (2 m/s), maksimum hıza 3,89 m/s ile 33° hücum açısında, slatsız kanatta ise maksimum hıza (3,44 m/s) 18° hücum açısında ulaştı.

Daha sonra, kanat profillerinde meydana gelen laminer ayrılma kabarcığı ve daha sonra oluşan türbülansa geçiş akışlarını (ayrılma) görebilmek için kanat üzerine akım çizgileri gönderildi. 0° hücum açısında slat ile kanat arasındaki boşluktan dolayı laminer ayrılma kabarcığı meydana geldi ve hücum açısının artmasıyla birlikte tekrar yüzeye yapışarak etkisinin ortadan katılığı görüldü. Kanadın slatsız halinde kanatta herhangi bir laminer ayrılma kabarcığı oluşmamaktadır. Her iki kanat ve ortamda da hücum açısının artması ile kanattan ayrılmalar başlamıştır. Hücum açısının artması ile birlikte ayrılmalar hücum kenarına doğru kaymaktadır. Slatlı kanat profili su ortamında havaya ortamına göre daha geç akış ayrılmasına uğradığı görüldü.

Türbülans şiddeti konturları ile kanat profili üzerinde oluşan kritik türbülanslı bölgeler elde edildi ve türbülansın yoğun olduğu yerlerde ayrılmaların oluştuğu belirlendi. Hücum açısının artması ile türbülans şiddetlerinde arttığı gözlemlendi.

Hava ortamında maksimum türbülans şiddeti 27^0 hücum açısında % 43,3, su ortamında 33^0 hücum açısında % 38,1 olarak elde edildi.

Son olarak, gönderilen akış çizgileri ve türbülans şiddetlerinin yoğun olduğu yerlere yerleştirilen mikrofonlar (alıcı) ile slatlı kanat profili üstünde meydana gelen vorteks (girdap) kopma frekansları incelendi. Kanattan ayrılmalar hücum açısının artması ile girdaplar boyları giderek artmakta ve periyodik olarak kanadın üstünden koparak iz bölgesine doğru yayılmaktadır. Hem hava hem de su ortamında 0^0 hücum açısında slat ile kanat arasında olan boşluktan meydana gelen laminer ayrılma kabarcığından dolayı vorteks kopma frekansı yüksektir. Hava ortamında 2Hz su ortamında ise 2,5Hz olarak elde edildi. Daha sonra hava ortamında 12^0 ve 27^0 hücum açılarında, su ortamında ise 10^0 ve 33^0 hücum açılarında incelendi. Hava ortamında sırası ile 1Hz ve 2,5Hz, su ortamında ise 1,5Hz ve 5,5Hz olarak elde edildi. 0^0 hücum açısındaki laminer ayrılma kabarcığından dolayı yüksek olan vorteks kopma frekansı hücum açısının artması ile akışın düzenli hale gelmesinden dolayı azalma gösterdi. Fakat artan hücum açısı ile birlikte vorteks kopma frekanslarında artmalar meydana geldiği görüldü.

Sonuç olarak slatlı kanatlar slatsız kanatlara göre daha iyi performans sağladığı yapılan çalışmalarla gösterildi. Slatlı kanatlarda oluşan yüksek basınç farkı ve hızlardan dolayı kaldırma kuvvetinde artış gözlemlendi. Elde edilen aerodinamik sonuçlar doğrultusunda yapılan hesaplamalar ile slatlı kanat profilinin slatsız profilde göre daha düşük hızlarda aynı güç miktarını elde edebileceği görüldü. Bu sonuçlar doğrultusunda, hızın daha aşağılara çekilerek rüzgar alanlarını arttırılabileceği ve yıl içerisinde daha fazla esme süresi sağlayarak geri dönüşüm süresini hızlandırılabilineceği gibi su ortamındaki yapılan çalışmalar ile performansının arttığı görüldü.

5.2. Öneriler

Yapılan sayısal çalışma ile elde edilen sonuçlar altında düşük hızlarda akışlarda kanat profilleri etrafındaki akış kontrolü ile ilgili olarak gelecekte yapılacak çalışmalara yönelik bir takım öneriler getirilecek olursak;

Yeni geliştirilen türbülansa geçiş modelleri kullanılarak düşük Re sayılı akış modellemesi üzerine detaylı ve değişik kanat profilleri ile benzeşimler yapılarak yeni sayısal çalışmalar yapılabilir.

Deneysel imkanların olması durumunda düşük Re sayılı akışlarda hem flaplı hem de slatlı kanat profillerinin aerodinamik performansı ayrıntılı bir şekilde incelenerek kıyaslama yapılabilir.

Yeni parametreler denenerek daha önce yapılan çalışmalarla kıyaslanarak performans karşılaştırmaları yapılabilir.

Sayısal sonuçlar, iki boyutlu ve hareketsiz kanat profillerinden elde edildi. Ancak, gerçek koşullarda, rüzgar türbinlerindeki kanatlar hareket halindeyken dönme olayından kanatta eğilmeler meydana gelmektedir. ,planlanacak çalışmalar ile oluşabilecek eğilmeler de dikkate alınarak programın geliştirilmesi ve uygulamaya daha yakın sonuçlar vermesi sağlanabilir.

KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] Şen, Ç., Gökçeada'nın elektrik enerjisi ihtiyacının rüzgar enerjisi ile Karşılanması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, (2003).
- [2] Özgener, Ö., "DEU MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ FEN ve MÜHENDİSLİK DERGİSİ" Cilt:4 Sayı:3 sh. 159- 173 Ekim 2002
- [3] USHIYAMA,I. ve NAGAI,H., 1988, "Optimum Design Configurations and Performance of Savonius Rotors" Wind Engineering Vol. 12 (1), 59-75.
- [4] NEWMAN, B.G., 1974, "Measurements on Savonius Rotor with Variable Gap, Proceedings of the University of Sherbrook Conference on Wind Energy", Sherbrooke, Quebec, 116s, Canada
- [5] MODI, V.J. ve FERNANDO, M.S.U.K.,1989, "On The Performance of The Savonius Wind Turbine", Journal of Solar Energy Engineering, Vol.111, 71-81.
- [6] AĞÇAY, M. ,2008, Türkiye'nin Elektrik Enerjisi Arz Talep Dengesinin Tespiti, Üretim Projeksiyonuna Yönelik Rüzgar Elektrik Santrali Tasarımı RES'in Kurulum Maliyetlerinin ve Üretim Parametrelerinin Analizinin Matlab&Simulink İle Yazılan Programda Yapılması, Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, Emo, İstanbul
- [7] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. ve Bossanyi, E., Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Ltd., Wets Sussex, 2001.
- [8] DeWind, 2004. D4-Series Brochure,
http://www.dewin.de/en/produkte/d4_index.htm
- [9] Güney, İ., Nogay, S. ve Taskın, S., Rüzgar Türbinlerinde Kontrol ve Güvenlik Sistemleri Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi,137-144, 2001.
- [10] Özgür M.A., 2002. Kütahya'da Seçilen Bir Konumda Rüzgar Verileriyle Elektrik Enerjisi Üretim Potansiyelinin Bulunması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

- [11] Patel, M.R., "Wind and Solar Power Systems" CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington, 1999)
- [12] Malkoç, Y., Türkiye Rüzgar Enerjisi İhtiyacının Karşılanmasında Rüzgar Enerjisinin Yeri, IV. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 23-24 Kasım 2007 Kayseri
- [13] Özerdem, B. 2003; "Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi Uygulamalarının Gelişimi ve Geleceği", İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü, Makine Mühendisleri Odası, İzmir
- [14] Durak, M., "2009 Yılı Sonu İtibarı ile Dünya'da ve Ülkemizde Rüzgar Elektrik Santral (RES) Projelerinin Son Durumu" Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Ankara, 2009.
- [15] "Renewable Energy Resources ; Opportunities and Constraints to 2020 " , WEC (World Energy Council).
- [16] Shan, H., Jiang, L., Liu, C., Direct numerical simulation of flow separation around a NACA0012 airfoil, Computers and Fluids, 34, 1096-1114, 2005.
- [17] Hamdani, H., Sun, M., Aerodynamic forces and flow structures of an airfoil in some unsteady motions at small Reynolds number, Acta Mechanica, 145, 173-187, 2000.
- [18] Genç, M.S., Kaynak, Ü., Lock, G., Flow over an aerofoil without and with leading edge slat at a transitional Reynolds number, Pro.Ins Mech.Eng, Part G- Journal of Aerospace Engineering, in press.
- [19] Genç, M.S., Lock, G., Kaynak, Ü., 2008 An experimental and computational study of low Re number transitional flows over an aerofoil with leading edge slat, 8. AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO 2008), Anchorage, Alaska, USA, 14-19 September
- [20] Wright M. W., Franzen D., Hemati H., and Sandor M. "Qualification and Reliability Testing of a Microchip Laser System for Space Applications, JPL, California Institute Of Technology.

- [21] Tang D., Dowell E.H., Aerodynamic flow control of an airfoil with small trailing-edge strips, *Journal of Aircraft*, 43, 6, 2006.
- [22] Jang, C.S., Ross, J.C., Cummings R. M., Numerical investigation of an airfoil with a Gurney flap, *Aircraft Design*, 1, 75-88, 1998.
- [23] Reckzeh, D., Aerodynamic design of the high-lift-wing for a Megaliner aircraft, *Aerospace Science and Technology*, 7, 107-119, 2003.
- [24] M. Serdar Genç, G. Özışık, N.Kahraman, "Investigation of Aerodynamics Performance of NACA0012 Aerofoil with Plain Flap" *Isı Bilimi ve Tekniği-Journal of Thermal Science and Technology*, 28 (1), pp. 1-8, 2008.
- [25] Shan, H., Jiang, L., Liu, C., Love, M., Maines, B., Numerical study of passive and active flow separation control over a NACA0012 airfoil, *Computers and Fluids*, 37, 975-992, 2008.
- [26] Huang, L., Optimization of blowing and suction control on NACA0012 airfoil using genetic algorithm with diversity control, PhD Thesis, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA, 2004.
- [27] Huang, L., Huang, P.G., LeBeau, R.P., Numerical study of blowing and suction control mechanism on NACA0012 airfoil, *Journal of Aircraft*, 41(1), 1005-1013, 2004.
- [28] Munday, D., Jacoby J., Active control of separation on a wing with oscillating camber, *AIAA Journal of Aircraft*, 39(1), 187-189, 2002.
- [29] Bahaj, A., Molland, A., Chaplin, J., and Batten, W.(2007b). "Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank". *Renewable Energy*, 32(3):407– 426.
- [30] Radespiel, R., Windte, J., Scholz, U., Numerical and experimental flow analysis of moving airfoils with laminar separation bubbles, *AIAA Journal*, 45(6), 1346-1356, 2007.

- [31] Brian K., Developments in ducted water current turbines, Sustainable Energy Centre, University of South Australia, Mawson Lakes, SA 5095, Australia, 2005.
- [32] Myers, L., Bahaj, A.S., Wake studies of a 1/30th scale horizontal axis marine current turbine, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, UK, 2006.
- [33] Manwell, J.F., McGovan J.G. ve Rogers A.L., 2002. Wind Energy Explained, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex.
- [34] Lyon, C.A., Broeren, A.P., Giguere, P., Gopalarathnam, A., Selig, M.S., Department of Aerospace Engineering, University of Illinois, Urbana, Illinois, USA, www.ae.uiuc.edu/~selig/uiuc_isat/isat_5bulletin.html, 2008.
- [35] Weick, F.E., Sanders, R., Wind-tunnel tests on combinations of a wing with fixed auxiliary aerofoils having various chords and profiles. Washington, D.C: 1934, NACA-TR-472.
- [36] Bose, B.K., Power electronics and motor drives: advances and trends, Kindle edition, 2006.
- [37] Migita, S.A., Effects of low reynolds number on yhe aerodynamics of micro-air vehicles, Hawaii University at Manoa Honolulu, HI 96822.
- [38] *Uzol, Nilay Sezer, 2009,*” Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Üç-Boyutlu Karmaşık Akış Problemlerinin Yüksek Başarımlı Hesaplamaları”, Makine Mühendisliği Bölümü ,TOBB, Ankara.
- [39] Do, T., Chen, L., Tu, J., Numerical study of the effect of trailing edge bluntness on highly turbulent hydrofoil flow, ANZIAM J. 47 (EMAC2005), pp. C822-C839, 2007.