



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**NACA 4415 RÜZGÂR TÜRBİNİ KANAT**  
**PROFİLİNDE FİRAR KENARI ETKİSİNİN**  
**İNCELENMESİ**

**Enis DİLMAÇ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ağustos-2019**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Enis DİLMAÇ tarafından hazırlanan “NACA 4415 Rüzgâr Türbini Kanat Profilinde Firar Kenarı Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 21/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

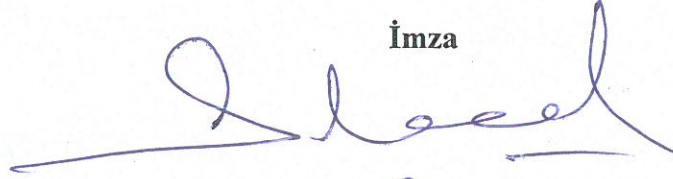
### Jüri Üyeleri

**Başkan**  
Prof.Dr. Saim KOÇAK

**Danışman**  
Dr.Öğr.Üyesi Faruk KÖSE

**Üye**  
Prof.Dr. Ali KAHRAMAN

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK  
LEE Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Enis DİLMAÇ

Tarih: 21.08.2019

**ÖZET****YÜKSEK LİSANS TEZİ****NACA 4415 RÜZGÂR TÜRBİNİ KANAT PROFİLİNDE FIRAR KENARI  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ****Enis DİLMAÇ****Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Faruk KÖSE****2019, 99 Sayfa****Jüri  
Prof. Dr. Saim KOÇAK  
Prof. Dr. Ali KAHRAMAN  
Dr. Öğr. Üyesi Faruk KÖSE**

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr enerjisinin önemli bir yeri vardır. Rüzgâr enerjisi; fosil yakıtların oluşturduğu asit yağmurlarına ve atmosferik kirlenmeye neden olmayan temiz, bedava ve tükenmeyen bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisinin eldesinde türbin kanadı ve kanat profilinin önemi oldukça büyüktür. Bu sebeple bu çalışmada NACA 4415 kanat profilinin firar kenarı kalınlaştırılarak, bunun türbin performansına etkisi incelenmiştir. Öncelikle QBlade programında NACA 4415 kanat profilinin çıkış kenarı simetrik olacak şekilde % 1, % 2, % 4, % 7 ve % 10 oranlarında, veter çizgisinin sadece altında veya üstünde olacak şekilde de % 0.5, % 1, % 2, % 3.5, % 4 ve % 5 oranlarında kalınlaştırılmış ve en verimli küt firar kenarlı kanat profili belirlenmiştir. Yapılan bu aerodinamik analizlere göre 10° hücum açısında orijinal kanat profilinin alt bölgesinde % 2 oranında kalınlaştırma yapılarak kanat profilinin aerodinamik verimi % 5 oranında artırılmıştır. Yani, orijinal kanat profilinin verilen hücum açısında  $C_l/C_d$  oranı 57 iken; firar kenarı alt çizgide % 2 oranında kalınlaştırılmış kanat profilinin  $C_l/C_d$  oranı 60 olarak elde edilmiştir. Böylece kanat profilinin çıkış kenarı kalınlaştırılarak aerodinamik verim artırılmıştır. Optimum küt firar kenarlı kanat profili elde edildikten sonra Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile ve 124,000 Reynolds sayısında ve 0°, 2°, 4°, 6°, 8°, 10°, 12°, 14°, 16° ve 18° hücum açılarında türetilmiş kanat profilin ve orijinal kanat profilinin analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen 2D analiz sonuçlarına göre türetilmiş kanat profilinin  $C_l$  değerlerinin orijinal NACA 4415 kanat profili değerlerine göre yüksek çıktığı görülürken,  $C_d$  değerlerinin benzer çıktığı görülmüştür. Türetilmiş kanat profilinin üretimi gerçekleştirilmiş ve bir rüzgâr tüneline testleri gerçekleştirilmiştir. Bu test sonuçları ile gerçekleştirilmiş 2D HAD analiz sonuçlarının benzer olduğu görülmüştür. Bu çalışmada her iki kanat profili ile 1.44 m rotor çapına sahip kanatlar modellenmiştir. Kanatların, nominal rüzgâr hızı 10 m/s olacak şekilde 3D HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlere göre NACA 4415 kanat profilinden 4.42 Nm tork elde edilirken; türetilmiş kanat profilinden aynı şartlarda 5.12 Nm tork elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Aerodinamik, HAD, Küt firar kenarlı kanat profili, Rüzgâr Türbini, Yatay eksenli rüzgâr türbini.

**ABSTRACT****MS THESIS****INVESTIGATION OF THE TRAILING EDGE EFFECT AT THE NACA 4415  
WIND TURBINE AIRFOIL****Enis DİLMAÇ****Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Mechanical Engineering****Advisor: Assist. Prof. Dr. Faruk KÖSE****2019, 99 Pages****Jury  
Prof. Dr. Saim KOÇAK  
Prof. Dr. Ali KAHRAMAN  
Assist. Prof. Dr. Faruk KÖSE**

Among renewable energy sources, wind energy has an important place. Wind energy; is a clean, free and inexhaustible source of energy that does not cause acid rains and atmospheric pollution caused by fossil fuels. The importance of the wing and the wing profile is very important in the production of wind energy. Therefore, in this study, the trailing edge of NACA 4415 wing profile was thickened and its effect was investigated. Firstly, in the QBlade program, the trailing edge of the NACA 4415 wing profile is symmetrical 1 %, 2 %, 4 %, 7 % and 10 %, just below or above the chord line, 0.5 %, 1 %, 2 %, 3.5 %, 4 % and 5% thickened and the most efficient blunt trailing edge wing profile was determined. With this aerodynamic analysis, we have obtained the aerodynamic efficiency for the original airfoil profile has increased % 5 when angle of attack is  $10^\circ$  and the lower exceeding edge thickness is % 2 greater than normal shape. Namely, at the given angle of attack, the normal airfoil shape has  $C_l/C_d$  is 57 but thickened airfoil has 60 Lift over Drag ratio. Thus, the aerodynamic efficiency increased with thickening of the airfoil. After we have reached the optimum blunt trailing edge for the airfoil, the modified airfoil was analysed at 124,000 Reynolds numbers and with angle of attack:  $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $14^\circ$ ,  $16^\circ$  and  $18^\circ$  on CFD. According to 2D analysis results, modified airfoil  $C_l$  values were higher than original NACA 4415 airfoil values,  $C_d$  values were found to be similar. The modified airfoil was produced. With a wind-tunnel, the modified airfoil has been analysed in an experiment. The results of the experiment has shown us the results of these tests and 2D CFD analysis were similar. Furthermore, the CFD results and experimental results verify each other. In this study, wings with a rotor diameter of 1.44 m were modelled with both airfoil profiles. 3D CFD analyses were carried out with a nominal wind speed of 10 m/s. According to the analysis, NACA 4415 wing profile obtained 4.42 Nm torque; 5.12 Nm torque was obtained from the modified wing profile.

**Keywords:** Aerodynamic, Blunt trailing edge wing profile, CFD, Horizontal axis wind turbine, Wind turbine.

## ÖNSÖZ

Rüzgâr türbinlerindeki gelişmeler ve karşılaşılan zorluklardan dolayı son yıllardaki aerodinamik araştırmalar kanatların verimini artırmaya yönelik konular üzerinde yoğunlaşmaktadır. Ülkemizde ve dünyada geleneksel olarak enerji üreten türbinlerde çoğunlukla standart kanat profilleri kullanılmaktadır. Bu nedenle yüksek performans verebilecek rüzgâr türbini kanat profili ortaya koymak ve ortaya konulan bu profiller kullanılarak rüzgâr türbinlerinin performanslarının artırılması çok önemlidir. Bu çalışmada rüzgâr türbini kanatlarının verimini artırmaya yönelik kanat profilinin çıkış kenarı kalınlaştırılmıştır.

Rüzgâr türbini kanatlarının aerodinamik tasarımlarında ve kanat üzerindeki akışın incelenmesinde yüksek doğruluğu nedeniyle Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi son yıllarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada da HAD yöntemi kullanılarak küt firar kenarlı kanat profilinin üzerindeki akışlar incelenmiştir.

Bu tez çalışması boyunca beni yönlendiren ve desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Faruk Köse 'ye teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde büyük emekleri olan, her zaman maddi ve manevi destekleri ile yanımda olan anne ve babama, çalışmalarımnda manevi desteğini ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen eşim Zeynep Dilmaç'a, kızım Erva Dilmaç'a ve oğlum Ali Kemal Dilmaç'a teşekkür ederim.



Enis DİLMAÇ  
KONYA-2019

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>ÇİZELGELER LİSTESİ .....</b>	<b>xi</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ .....</b>	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları .....	2
1.1.1. Güneş enerjisi .....	2
1.1.2. Rüzgâr enerjisi .....	3
1.1.3. Rüzgârın oluşumu .....	4
1.2. Rüzgâr Enerjisi Kullanımının Tarihsel Gelişimi .....	4
1.3. Rüzgâr Türbinleri .....	8
1.3.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT) .....	8
1.3.1.1. Rüzgârı önden alan yatay eksenli rüzgâr türbinleri .....	10
1.3.1.2. Rüzgârı arkadan alan yatay eksenli rüzgâr türbinleri .....	10
1.3.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT) .....	10
1.3.2.1. Darrieus dikey eksenli rüzgâr türbinleri .....	11
1.3.2.2. Savonius dikey eksenli rüzgâr türbinleri .....	12
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>14</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>21</b>
3.1. Kanat Profilleri .....	21
3.1.1. NACA profilleri .....	21
3.1.2. Kanat profili özellikleri .....	22
3.1.2.1. NACA 4415 kanat profili özellikleri .....	23
3.2. Küt Firar Kenarlı Kanat Profilleri .....	24
3.2.1. Küt firar kenarlı profilin elde edilmesi .....	25
3.3. Aerodinamik Kuvvetler ve Kavramlar .....	26
3.3.1. Düşük Reynolds sayısı aerodinamiği .....	33
3.3.2. Laminer ayrılma kabarcığı .....	35
3.4. HAD İle Kanat Profili Analizi .....	39
3.4.1. Hesaplamalı yaklaşımlara bakış (Ansys, 2015) .....	39
3.4.2. RANS hesaplamalı yaklaşımın çözümleme modelleri .....	39
3.4.3. RANS denklemleri .....	40

3.4.3.1. Türbülans benzeşim modelleri.....	41
3.4.3.1.1. $k$ - $\epsilon$ türbülans modeli .....	42
3.4.3.1.2. SST $k$ - $\omega$ türbülans modeli.....	44
<b>4. KÜT FİRAR KENARLI KANAT PROFİLİNİN ELDE EDİLMESİ .....</b>	<b>46</b>
4.1. NACA 4415 Kanat Profili Üzerindeki Akışın QBlade Programı İle Doğrulanması .....	46
4.2. Küt Firar Kenarlı Kanat Profilinin QBlade Programı İle Elde Edilmesi .....	51
<b>5. HAD İLE KÜT FİRAR KENARLI KANAT PROFİLİNİN AERODİNAMİK AÇIDAN İNCELENMESİ .....</b>	<b>56</b>
5.1. Küt Firar Kenarlı ve NACA 4415 Kanatların Elde Edilmesi .....	56
5.2. Kanat Profillerin (2D) HAD İle İncelenmesi .....	60
5.2.1. Akış bölgesinin oluşturulması .....	60
5.2.2. Sayısal ağ oluşturulması .....	60
5.2.3. Sınır şartlarının oluşturulması.....	63
5.2.3.1. İçeri akış ve dışarı akış sınır şartları .....	64
5.2.3.2. Diğer sınır şartları .....	65
5.2.4. Analiz sonuçların incelenmesi .....	67
5.3 Üç Boyutlu Kanatların (3D) HAD İle İncelenmesi .....	72
5.3.1. Akış bölgesinin oluşturulması .....	72
5.3.2. Sayısal ağ oluşturulması .....	72
5.3.3. Sınır şartlarının belirlenmesi.....	74
5.3.4. Analiz sonuçların incelenmesi .....	74
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>77</b>
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>85</b>
7.1. Sonuçlar .....	85
7.2. Öneriler .....	85
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>87</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>92</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>99</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\alpha$	: hücum açısı (°)
$\alpha_b$	: kanat bağlama açısı(°)
$\alpha_s$	: tutunma kaybı açısı (°)
$\alpha_T$	: tasarım hücum açısı (°)
B	: pala sayısı
$\beta$	: basınç noktalarının veter (kiriş) çizgisi ile yaptığı açı (°)
c	: veter (kiriş) uzunluğu (m)
$C_D(C_d)$	: sürüklenme katsayısı
$C_f$	: yüzey sürtünme katsayısı
$C_L(C_l)$	: kaldırma katsayısı
$C_M$	: moment katsayısı
$C_P$	: güç katsayısı
$C_p$	: basınç katsayısı
$C_x$	: aksenal kuvvet katsayısı
$C_y$	: normal kuvvet katsayısı
E	: dissipasyon oranı
$F_D$	: sürüklenme kuvveti (N)
$F_L$	: kaldırma kuvveti (N)
g	: yer çekimi ivmesi (m/s <sup>2</sup> )
$G_b$	: türbülans kinetik enerjisi
$g_i$	: i yönündeki yerçekimi ivmesi (m/s <sup>2</sup> )
$G_k$	: türbülans kinetik enerjisi
h	: manometre su yüksekliği(m)
$k_L$	: laminer kinetik enerji
l	: basınç noktaları arasındaki uzaklık (m)
$\ell_{max}$	: maksimum kamburluk
M	: moment (N.m)
$\eta$	: türbülans viskozitesi
$\lambda$	: uç hız oranı
P	: güç (Watt)
p	: akışkanın statik basıncı (Pa)
$p_0$	: açık hava basıncı (Pa)
$P_{basınç}$	: basınç (Pa)
$P_{ort}$	: ortalama basınç (Pa)
$\rho_{hava}$	: havanın yoğunluğu (kg/ m <sup>3</sup> )
$\rho_{su}$	: suyun yoğunluğu (kg/ m <sup>3</sup> )
R	: kanat yarıçapı (m)
r	: rotor radyal mesafesi(m)
Re	: Reynolds sayısı
S	: ortalama gerilme oranı
$\delta$	: kalınlık oranı
T	: tork (Nm)
t	: kalınlık(m)
$t_{max}$	: maksimum kalınlık(m)
T/S	: Tollmien /Schlichting dalgaları

$\tau$	: kayma gerilmesi (N/m <sup>2</sup> )
$u$	: x yönündeki akış hızı (m/s)
$U$	: bağıl rüzgâr hızı (m/s)
$U_{\infty}$	: serbest akış hızı (m/s)
$\mu$	: dinamik viskozite (kg/m s)
$\mu_t$	: türbülans viskozitesi
$\nu$	: kinematik viskozite (m <sup>2</sup> /s)
$v$	: y yönündeki akış hızı (m/s)
$V$	: bağıl rüzgâr hızı (m/s)
$V_{\infty}$	: serbest akış hızı (m/s)
$V_b$	: bileşke hız(m/s)
$V_{\phi}$	: çevresel hız (m/s)
$Y_M$	: yayılma etkisi
$\gamma$	: kamburluk oranı
$\omega$	: yayılma oranı
$w$	: açısal hız(rad/s)
$\sigma_k$	: k türbülans Prandtl sayısı
$\sigma_{\epsilon}$	: $\epsilon$ için türbülans Prandtl sayısı

### Kısaltmalar

AoA	Hücum açısı
DERT	Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini
DNS	Doğrudan Sayısal Simülasyon
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LES	Büyük Eddy Simülasyonu
NACA	Amerikan Ulusal Aerodinamik Tavsiye Komitesi
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
NS	Navier-Stokes
PIV	Parçacık Akış Görüntüleme Yöntemi
RANS	Reynold Ortalamalı Navier-Stokes
RT	Rüzgâr Türbini
YERT	Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini

## ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1. 1. Bazı yatay ve düşey eksenli rüzgâr türbin tipleri ve kullanım amaçları (Walker ve ark., 1997) .....	10
Çizelge 2. 1. Düşük Mach sayılarında yapılan deney ve analizlerde elde edilen tork değerleri (Chao, 2007) .....	17
Çizelge 4. 1 Türetilmiş Kanat Profillerinin İsimlendirilmesi .....	52
Çizelge 5. 2. Modellenen Kanadın Tasarım Parametreleri .....	57
Çizelge 5. 3. Modellenen Kanadın Tasarım Parametreleri .....	59
Çizelge 5. 4. NACA 4415 ve Küt Firar Kenarlı Kanatların Tork Değerleri.....	76



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1. İlk rüzgâr türbini Brush rüzgâr türbini (Spera, 1994; Kaya, 2019) .....	5
Şekil 1. 2. Paul La Cour rüzgâr türbini (Righter, 1996; Kaya, 2019) .....	7
Şekil 1. 3. (a) Önden rüzgâr alan yatay eksenli türbin, (b) Arkadan rüzgâr alan yatay eksenli türbin (Önder, 2006) .....	9
Şekil 1. 4. Darrieus tipi rüzgâr türbini (Derya, 2010) .....	12
Şekil 1. 5. Savonius tipi rüzgâr türbini (Derya, 2010) .....	12
Şekil 2. 1. S821 kanat profili ve türetilmiş küt firar kenarlı (flatback) kanat profilleri (Van Dam ve ark., 2008) .....	15
Şekil 2. 2. TR-4000-0050 küt firar kenarlı (flatback) kanat profilinin kaldırma ve sürüklenme katsayıları (Van Dam ve ark., 2008) .....	15
Şekil 2. 3. TR-4000-0100 küt firar kenarlı (flatback) kanat profilinin kaldırma ve sürüklenme katsayıları (Van Dam ve ark., 2008) .....	15
Şekil 2. 4. TR-4000-0200 küt firar kenarlı (flatback) kanat profilinin kaldırma ve sürüklenme katsayıları (Van Dam ve ark., 2008) .....	16
Şekil 2. 5. S821 asıl kanat profili ve türetilmiş kanat profili (Chao, 2007) .....	17
Şekil 2. 6. Duman akış görselleştirmesi ile $Re=75,000$ ve hücum açısı= $14^\circ$ de AF 300 kanat profili (Ronit ve ark., 2011) .....	19
Şekil 2. 7. Duman akış görselleştirmesi ile $Re=205,000$ ve hücum açısı= $14^\circ$ de AF 300 kanat profili (Ronit ve ark., 2011) .....	20
Şekil 3. 1. Bazı modern kanat profilleri (Manwell ve ark., 2000) .....	21
Şekil 3. 2. Kanat profili (Yükselen, 2017) .....	23
Şekil 3. 3. NACA 4415 kanat profili .....	24
Şekil 3. 4. Sürüklenme etkisini azaltma tekniği(soldan); ayırıcı levha, havalandırma boşluğu, tırtıklı firar kenarı (Tanner, 1973) .....	24
Şekil 3. 5. Yuvarlak firar kenarı (Nash ve ark., 1966) .....	25
Şekil 3. 6. Taban boşluğu (Nash ve ark., 1966) .....	25
Şekil 3. 7. Delikli taban boşluğu (Nash, 1967) .....	25
Şekil 3. 8. Türetilen küt firar kenarlı kanat profili .....	26
Şekil 3. 9. Kaldırma, sürüklenme kuvvetleri ve moment (Erişen ve ark., 2014) .....	27
Şekil 3. 10. Polar grafikler (Katz ve ark., 1991) .....	28
Şekil 3. 11. Tasarım hücum açısı (King, 2001) .....	29
Şekil 3. 12. Kanat kesitinin üç farklı akış davranışı (King, 2001) .....	30
Şekil 3. 13. Örnek bir tutunma kaybı olayı (King, 2001) .....	30
Şekil 3. 14. Küçük hücum açısına sahip bir kanat profili etrafındaki basınç dağılımı (Cengiz, 2010) .....	31
Şekil 3. 15. Basınç katsayısının veter uzunluğu boyunca değişimi (Cengiz, 2010) .....	32
Şekil 3. 16. Bir kanat profili üzerinde oluşan sınır tabaka ve iz bölgesi (Genç, 2009) ..	35
Şekil 3. 17. Eğrisel bir yüzey üzerinde hız profilleri (Auld ve ark., 2008) .....	35
Şekil 3. 18. Laminer ayrılma kabarcığı (Katz ve ark., 1991) .....	36
Şekil 3. 19. Kanat profil etrafında değişik bölgelerde oluşan laminer ayrılmalar (Auld ve ark., 2008) .....	37
Şekil 3. 20. Düz levha üzerindeki akışta doğal türbülansa geçiş (Genç, 2009; White, 1991) .....	38
Şekil 3. 21. Atlamalı ve laminer ayrılmış türbülansa geçişler (Genç, 2009; Süzen, 2005) .....	38
Şekil 4. 1. NACA 4415 kanat profilinin $Re=1,000,000$ de teorik ve deneysel olarak incelenmesi (Hoffmann ve ark., 1996) .....	47

Şekil 4. 2. NACA 4415 kanat profilinin Qbalde ile $Re=1,000,000$ de analizi .....	47
Şekil 4. 3. NACA 4415 kanat profilinin farklı $Re$ sayılarında deneysel olarak incelenmesi (Hoffmann ve ark., 1996) .....	48
Şekil 4. 4. NACA 4415 kanat profilinin farklı $Re$ sayılarında Qblade ile analizi .....	48
Şekil 4. 5. NACA 4415 kanat profilinin $Re=700,000-600,000$ sayılarında deneysel olarak incelenmesi (Saliveros, 1988).....	49
Şekil 4. 6. NACA 4415 kanat profilinin $Re=600,000$ için Qblade ile analizi .....	50
Şekil 4. 7. NACA 4415 kanat profilinin $Re=700,000$ için Qblade ile analizi .....	50
Şekil 4. 8. NACA 4415, üst çizgiden ve alt çizgiden kalınlaştırılmış küt firar kenarlı kanat profillerinin kıyaslanması.....	53
Şekil 4. 9. NACA 4415, simetrik olarak kalınlaştırılmış ve alt çizgiden % 2 oranında kalınlaştırılmış küt firar kenarlı kanat profillerinin kıyaslanması .....	54
Şekil 4. 10. NACA 4415 kanat profilinden türetilmiş alt çizgiden % 2 oranında kalınlaştırılmış küt firar kenarlı kanat profilinin $C_1$ ve $C_d$ grafikleri .....	54
Şekil 4. 11. Türetilmiş küt firar kenarlı kanat profili.....	55
Şekil 5. 1. Türetilmiş kanadın 3 boyutlu küt firar kenarının görünümü .....	57
Şekil 5. 2. NACA 4415 3 boyutlu kanadın görünümü.....	58
Şekil 5. 3. Kanat profili ve akış bölgesi .....	60
Şekil 5. 4. Oluşturulan ağ yapısının uzaktan görünümü .....	61
Şekil 5. 5. Oluşturulan ağ yapısının profil çevresindeki görünümü(üst: NACA 4415; alt: türetilmiş profil).....	62
Şekil 5. 6. 2D çözümün ağdan bağımsızlık çalışması.....	63
Şekil 5. 7. Akış alanı sınır şartları.....	67
Şekil 5. 8.Kanat profilleri etrafında $0^\circ$ ve $6^\circ$ hücum açılarındaki basınç dağılımı .....	68
Şekil 5. 9.Kanat profilleri etrafında $0^\circ$ ve $6^\circ$ hücum açılarındaki hava hızları.....	68
Şekil 5. 10.Kanat profilleri etrafında $0^\circ$ ve $6^\circ$ hücum açılarındaki basınç dağılımı .....	69
Şekil 5. 11.Kanat profilleri etrafında $10^\circ$ ve $4^\circ$ hücum açılarındaki hava hızları.....	70
Şekil 5. 12. Kanat profillerinin $C_1$ - hücum açısı grafiği.....	70
Şekil 5. 13. Kanat profillerinin $C_d$ - hücum açısı grafiği .....	71
Şekil 5. 14. Kanat profillerinin $C_1/C_d$ - hücum açısı grafiği.....	71
Şekil 5. 15. Üç boyutlu HAD analizi için akış bölgesinin oluşturulması .....	72
Şekil 5. 16. 3D çözümün ağdan bağımsızlık çalışması.....	73
Şekil 5. 17. Hücre kalitesinin kanatlara doğru iyileştirilmesi.....	73
Şekil 5. 18. Akış bölgesi ve kanatların gösterimi .....	74
Şekil 5. 19. Örnek bir HAD analizi için akış bölgesindeki debi değerleri .....	74
Şekil 5. 20. NACA 4415 ve küt firar kenarlı kanatların hız vektörleri.....	75
Şekil 6. 1. Türetilmiş NACA 4415 kanat profilinin parçaları ve basınç noktaları .....	77
Şekil 6. 2.Kanat profilinin deney seti üzerindeki bağlantısı .....	78
Şekil 6. 3.Kanat profili üzerindeki basınç noktalarının gösterimi .....	79
Şekil 6. 4.Küt firar kenarlı kanat profilinin $C_1$ -hücum açısının deneysel sonuçları.....	80
Şekil 6. 5.Küt firar kenarlı kanat profilinin $C_d$ -hücum açısının deneysel sonuçları .....	81
Şekil 6. 6.Küt firar kenarlı kanat profilinin $C_1$ -hücum açısının deneysel ve HAD ile karşılaştırılması.....	81
Şekil 6. 7.Küt firar kenarlı kanat profilinin $C_d$ -hücum açısının deneysel ve HAD ile karşılaştırılması .....	82

## 1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ve insanlığın artan konfor talepleri gün geçtikçe enerji ihtiyacını farklı boyutlara taşımaktadır. Öte yandan dünya nüfusu gün geçtikçe artmaktadır. Tükenir olarak nitelendirilen enerji kaynaklarının yakın gelecekte büyük bir bölümünün tükeneceği beklenmektedir. Bu durum alternatif enerji kaynakları üzerindeki eğilimi artırmaktadır.

Son dönemlerde insanoğlu enerji gereksiniminin büyük çoğunluğunu fosil kaynaklarda karşılamaktadır. Fosil kaynaklar belli miktardaki rezervlerinin olması sürdürülebilir değildir. Bu sebeple yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi ve talepler artmıştır. Fosil yakıtların enerji üretirken çevreye zarar veriyor olması bilim dünyasını farklı enerji kaynaklarını araştırmaya sevk etmektedir.

Doğal enerji kaynaklarının çevreye zarar vermeyecek ve verimli bir şekilde kullanılmıyor olması yaşadığımız yer küre için oldukça büyük bir problemdir. İnsanoğlu için, içinde yaşadığı çevre ve gereksinimlerini karşılamak için kullandığı enerji çok önemlidir. Enerji üretiminin ve tüketiminin yaşadığımız çevreye zarar verme potansiyelinden dolayı bu iki konunun, problemlerin çözümünde beraber ele alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu sebeple ülkemizin büyük bir potansiyele sahip olduğu yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesi hem çevre kirliliğinin azalması hem de ülke ekonomisine olacak olan katkısı bakımından önemlidir (Özgür, 2006).

Gelişmiş toplumlar, enerji gereksinimleri için maliyet ve çevre şartlarını göz önünde bulundurarak yeni ve yenilenebilir kaynaklar aramaya yönelmişlerdir. Özellikle 1973 petrol krizi ve meydana gelen iki nükleer reaktör kazası bu tür enerji kaynaklarına olan ilginin artmasına neden olmuştur. Bu enerji türleri; güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle, biyogaz ve dalga enerjisi olarak sayılabilir. Bugün için bu enerji türleri enerji ihtiyacını tam ve ekonomik olarak karşılayacak durumda değildir. Ancak gelişen teknoloji ve azalan maliyetler, gelecek için yapılan enerji varsayımlarında bu enerjilere büyük ölçüde yer vermektedir (Canpolat, 2013).

Bu çalışmada rüzgâr enerjisinin daha verimli kullanılmasına yönelik olarak sistem elemanlarından olan kanatların verimini artırılması araştırılarak bir nebze de olsa temiz bir çevre ve yenilenebilir enerjinin kullanımına destek sağlanmaya çalışılmıştır.

## 1.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Bir asırdan kısa bir süre içerisinde fosil yakıtlar yaşadığımız çevreye ve canlılara büyük zararlar verdi. Çok uzun sürelerde meydana gelen kömür, doğalgaz ve petrol gibi kaynaklar insanlığın konforu ve ihtiyacı için kullanılırken, atıklarıyla da yaşadığımız çevreyi tüketmeye başladı. Fosil yakıtlar sadece yakın çevremize zarar vermekle kalmadı, atmosfere de oldukça büyük zararlar verdi. Geldiğimiz noktada fosil yakıtlar iklim değişikliğine yol açabilecek duruma gelmiştir (Özcan, 2011). Konvansiyonel yakıtların kullanılması ile ortaya çıkan zararlı gazlar ve nükleer enerjiye karşı gösterilen tepkiler bilim insanlarını, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirmeye yöneltmiştir. Türkiye tükettiği enerjinin yaklaşık % 70.3 'lük kısmını dışarıdan ithal etmektedir (Köse ve Kaya, 2012, Anonim, 2012a).

Günümüzde en çok tercih edilen fosil yakıtlar, sınırlı bir kaynağa sahip ve yenilenemeyen enerji kaynaklarıdır. Hâlbuki yenilenebilen enerji kaynakları, kısıtlı kaynaklara sahip değildir. Sürekli kendini yenileyebilen enerji kaynaklarıdır. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve jeotermal enerjisi gibi doğal kaynaklara sahip enerji türleri hem yenilenebilir hem de çevreye zarar vermiyor olmalarından dolayı temiz enerji kaynaklarıdır.

Yenilenebilir enerji kaynağı; enerji kaynağından alınan enerjiye eşit oranda veya kaynağın tükenme hızından daha çabuk bir şekilde kendini yenileyebilmesi ile tanımlanır. Örneğin, güneşten elde edilen enerji ile çalışan bir teknoloji bu enerjiyi tüketir, fakat tüketilen enerji toplam güneş enerjisinin yanında çok küçük kalır (Canpolat, 2013).

Bu çalışma kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisi incelenmiştir. Bu sebeple rüzgâr enerjisi ve onun kaynağı olan güneş enerjisi kapsamlı olarak ele alınacaktır.

### 1.1.1. Güneş enerjisi

Bütün enerji türlerinin asıl kaynağı güneştir. Kullandığımız enerji kaynaklarının büyük bir bölümü birincil enerji kaynaklarıdır. İnsanoğlunu enerjiye olan ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Bu durum da enerji açığını sürekli olarak artırmaktadır. Eldeki enerji kaynaklarının hızla tükeniyor olması, insanoğlunu daha uzun ömürlü enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Bu kaynaklardan en önemlilerinden bir tanesi de güneş

enerjisidir. Güneş enerjisini elde etmek için yüksek teknoloji gerektirmez ve çok daha kolay elde edilebilir durumdadır. Bu sebeple güneş enerjisi birçok alanda kullanılmaktadır. Konutlarda, sanayide, tarımda, ısı enerjisi uygulamalarında ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Güneş enerjisi uygulamalarında düşük sıcaklık, orta sıcaklık ve yüksek sıcaklıklarda kullanılmaktadır. Sıcak su üretimi için düşük sıcaklık uygulamaları kullanılırken, endüstriyel proses ısılarının karşılanmasında orta sıcaklık uygulamaları (odaklı kolektörler) yaygın olarak kullanılır. Buhar ihtiyacı ve elektrik enerjisi üretimi için ise endüstriyel yüksek sıcaklık güneş enerjisi uygulamaları kullanılır (Güven ve ark., 2004).

### 1.1.2. Rüzgâr enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisi, teknolojisi hızla gelişen ve yaygınlaşan bir enerji kaynağı olarak ön plana çıkmaktadır. Rüzgâr enerjisi sistemleri; sıfır emisyonu olan, ham madde sıkıntısı olmayan, sürekli ve sonsuz bir enerji kaynağıdır. Türkiye'nin sahip olduğu coğrafik yapısı; kıyı şeritleri, dağ-vadi yapılarından dolayı oldukça büyük bir rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olduğu söylenebilir (Özgür, 2006).

Rüzgâr atmosferde bol ve serbest olarak bulunan, kararlı, güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisi çevrime uğramış güneş enerjisidir. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin çok küçük bir kısmı rüzgâr enerjisine çevrilebilmektedir. Bu enerji yerel coğrafi farklılık ve homojen olmayan ısınmaya bağlı olarak zamansal ve yöresel değişiklikler gösterir. Rüzgârın hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı biçimde artar. Rüzgârın yönü, günlük hava şartlarına ve iklim özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (Büyükmert, 2006).

Rüzgâr potansiyelinden yararlanabilmek için rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin kanat yapıları verimi etkileyen önemli unsurlarından birisidir. İlerleyen bölümlerde verimi artırma yöntemlerine daha detaylı yer verilecektir. Rüzgâr türbini kanat verimini, kanat profiline yapısı etkiler; bu sebeple kanat profilleri rüzgâr türbinleri için oldukça kritik bir öneme sahiptir (Martin, 2008). Optimum kanat profili için gerçekleştirilen çalışmalar, rüzgâr türbinlerindeki enerji üretim maliyetini azalttığını göstermiştir (Erişen ve ark., 2014).



### 1.1.3. Rüzgârın oluşumu

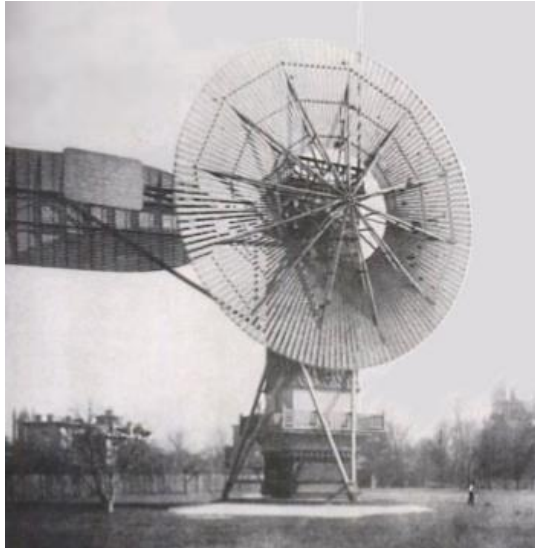
Güneşten gelen enerji atmosfer, kara parçaları ve su farklı özgül ısılarına sahip oldukları için farklı sıcaklıklara sebep olur. Bu sıcaklık dağılımında coğrafi ve çevresel faktörler de etkilidir. Yer kürede açığa çıkan bu sıcaklık farklılıkları, basınç farklılıklarına yol açar bu da rüzgârın oluşmasına neden olur (Petersen ve ark., 1998). Rüzgâr yüksek basınç bölgelerinden alçak basınç bölgelerine doğru hareket eder. Yeryüzünde oluşan hava kütlesi hareketleri, yerkürenin hareketinden kaynaklanan “Coriolis” kuvveti ve yeryüzü ile akışkan hava kütlesi arasındaki sürtünme kuvvetinden etkilenirler (Petersen ve ark., 1998; Yerebakan, 2001).

Dünyanın 0 enlemi yani ekvator yeryüzünün diğer bölgelerine oranla güneş tarafından daha fazla ısıtılır bu ısınmanın sonucu sıcaklığı artan hava atmosferde 10 km yüksekliğe kadar çıkar buradan güney ve kuzey kutuplarına doğru hareket eder. Eğer dünya kendi eksenini etrafında dönmeseydi bu sıcak hava kütlesi kuzey ve güney kutuplarına doğru hareket eder ve tekrar ekvatora dönerdi fakat dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesiyle bu hava hareketi dünyanın tümüne doğru yayılır ve yerel rüzgârları oluşturur (Wiley, 1997).

Dünyadaki tüm enerji kaynakları (gelgit ve jeotermal enerji) hariç hepsi güneş kaynaklıdır. Güneşten dünyaya gelen enerji miktarı saatte yaklaşık olarak 145,000,000,000,000 kWh tir. Bu büyük enerjinin yüzde 1-2 si rüzgâr enerjisine çevrilir, bu enerji dünyadaki toplam fosil yakıt enerjisinin 50-100 katı büyüklüğünde bir enerjidir (Wiley, 1997).

### 1.2. Rüzgâr Enerjisi Kullanımının Tarihsel Gelişimi

Rüzgâr, insanlık tarihinde önemli bir rol oynamıştır. Rüzgâr gücü binlerce yıl insanlık tarafından kullanılmış olup kayıtlı tarihin başlarından bu yana, gemilerin hareketinde, tahıl öğütmede ve su pompalamada kullanıldığına rastlanmaktadır. İlk yel değirmeni, Eski Babil uygarlığı tarafından M.Ö. 2000 yıllarının başında bir pervane ile dönme hareketi oluşturmak için inşa edilmiştir. M.S. 10. Yüzyılda, bugünkü İran ve Afganistan’ın bulunduğu coğrafyada yaklaşık 5 m uzunluğunda ve 10 m yüksekliğinde yel değirmenleri, tahıl öğütmek amacıyla kullanılmıştır (Wind Power, 2003).



Şekil 1. 1. İlk rüzgâr türbini Brush rüzgâr türbini (Spera, 1994; Kaya, 2019)

Rüzgâr makinalarının çalışmasıyla ilgili en eski yazılı kaynak 12. yüzyıla dayanmaktadır. Bu zamanlarda yel değirmenleri yine tahıl işlemek amacıyla kullanılmış olup birkaç yüzyıl sonra yel değirmenleri su pompalama amacıyla da kullanılmıştır. İlk yatay eksenli yel değirmenleri 1150 yılında İngiltere’de, 1180’de Fransa’da, 1190’da Floransa’da, 1222’de Almanya’da, 1259’da Danimarka’da görülmüştür. Bu hızlı gelişme büyük olasılıkla Haçlı Seferlerinden etkilenmiş olup, Avrupa’nın birçok bölgesine İran’dan yel değirmenleri hakkında bilgi taşınmıştır. Hollandalılar yel değirmenlerinin temel tasarımı üzerinde çalışarak pervaneli tip kanatlar ve rüzgârdan daha çok yararlanabilmek için yel değirmenlerinin yönünü değiştirmek üzere birçok yol geliştirmişlerdir. Yel değirmenleri, 17. yüzyılla birlikte Hollanda’nın dünyanın en gelişmiş ülkelerinden biri olmasına katkı sağlamıştır. Rüzgâr hızından elektrik üreten ilk sistem Danimarkalı Dane Poul La Cour tarafından gerçekleştirilmiş olup, La Cour bazı teorik formülasyonları elde etmek için ilk defa rüzgâr tüneline kullanmış ve meteoroloji öğrenimi almıştır. Danimarkalı mühendisler I. ve II. Dünya Savaşı boyunca teknolojiyi geliştirmişler ve rüzgâr teknolojisini kullanarak enerji darboğazının üstesinden gelmişlerdir (Wind Power, 2003).

1200-1900 yılları arasında yel değirmenleri Avrupa’da oldukça ön plandaydı. 1800’lü yıllara gelindiğinde, Fransa’da 20,000 kadar küçük boyutlu yel değirmeni bulunmaktaydı. Aynı yıllarda Hollanda’da endüstrinin kullandığı enerjinin % 90 ’ı rüzgâr enerjisinden elde edilmekteydi. 1904 yılında Almanya’da 18,000 yel değirmeni kurulmuştu. Bunun sonucunda sanayinin enerji ihtiyacının % 11 ’i rüzgâr enerjisinden sağlanmaktaydı (Özgür, 2006).

1920 yıllarının sonlarına gelindiğinde, Amerikalılar küçük boyutlu yel değirmenlerini kırsal alanlarda, elektrik üretimi için kullanmışlardır. 1930 yıllarından sonra güç hatlarının kırsal alanlara elektrik ulaşımı sağlandığında, yel değirmenleri nispeten daha az kullanılıyordu. Fakat batı bölgelerindeki bazı büyük çiftliklerde yel değirmenleri hâlâ kullanılmaktaydı. 1920 ile 1930 yılları arasında Amerika'da 600,000 'e yakın yel değirmeni bulunuyordu. Halen Amerikan yel değirmenleri zirai olarak dünyanın birçok yerinde kullanılmaktadır. (Ackerman ve ark., 2002).

İkinci Dünya Savaşından sonra petrol fiyatlarının düşmesiyle, rüzgâr türbinlerine olan ilgi azalmış 1970'lerde petrol fiyatlarının aşırı yükselişi ile dünya çapında rüzgâr türbinlerine ilgi tekrar artmıştır. 1970'lerdeki petrol ambargolarını takiben, rüzgâr türbini jeneratörlerinin nasıl daha kullanışlı ve daha verimli hale getirilebilir sorusunun cevabı aranmıştır. Bu yaklaşımların birçoğu rüzgâr çiftliklerinin Amerika ve Avrupa şebekeleri için yararlı olacağını göstermiştir. 1970'lerden itibaren rüzgâr teknolojisi adım adım gelişmiş, 1990'ların sonunda rüzgâr enerjisi en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olarak yeniden ortaya çıkmıştır (Özgür, 2006).

Rüzgâr türbininden elektrik enerjisi üretilen ilk türbini, 1981 yılında Paul la Cour ve Danimarka Askov Folk High School bilim insanları oluşturdu. Danimarka hükümetinin desteğiyle de test amaçlı bir rüzgâr santrali kurdular (Özgener, 2002). Danimarka 'da 1918 yılında güçleri 20-30 KW arasında olan 120 adet rüzgâr türbini bulunmaktaydı (Cengiz, 2010).



Şekil 1. 2. Paul La Cour rüzgâr türbini (Righter, 1996; Kaya, 2019)

1990'ların başında, başta Danimarka ve Almanya olmak üzere pek çok Avrupa ülkesinde rüzgâr enerjisi ile ilgili üreticiler boy göstermeye başladı. Küresel ısınma ve nükleer enerji ile ilgili endişeler rüzgâr enerjisiyle ilgili yüksek bir talep oluşmasına neden oldu. Son 25 yıldır, en büyük ticari rüzgâr türbinlerinin kapasitesi 50 KW 'dan 2 MW 'a yükseldi. Aynı zamanda 5 MW 'lık olanları da tasarım aşamasında. Başta Avrupa olmak üzere, dünya çapında toplam rüzgâr enerjisi üretiminin kapasitesi 2001 yılında 20,000 MW 'a kadar çıktı. Dizayn standartları ve makinelerin prosedür belgeleri saptandıkça 1970 ve 1980 'lerdeki güç ve güvenilirliğin çok daha üzerine çıkıldı. Öyle ki, rüzgâr enerjisi üretiminin maliyeti geleneksel yöntemlerle rekabet edebilecek düzeylere düştü (Derya, 2010).

Rüzgâr enerjisi, Türkiye için tarihsel ve ekonomik gelişme açısından büyük rol oynamıştır. Anadolu'daki eski bulgular Eski Troya uygarlığına kadar gitmekte olup ilk yel değirmeninin ne zaman kurulduğuna dair herhangi bir ize rastlanmamaktadır. M.S. 1389 tarihli bir askeri haritaya göre İzmir Körfezi boyunca yel değirmenleri görülmektedir. 1960-1961 yılları arasında tarımın güçlü hale gelmesinin temelinde yel değirmenleri rol oynamış olup bu tarihler arasında 749 adet yel değirmeni bulunmaktadır. Bunların 718 'i su pompalamada, 41 tanesi elektrik üretiminde kullanılmıştır. 1966-1967 ve 1978-1979 yılları arasındaki sırasıyla 309-894 yel

değirmeninden 2-23 tanesi elektrik üretiminde kullanılmış olup bunların kapasiteleri 1 kW 'tan düşüktür (Hanağasıoğlu, 1999).

### 1.3. Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri, rüzgârdan aldıkları döndürme etkisini kanatlara aktarırlar ve bunun sonucunda elektrik enerjisi elde edilir. Havanın yoğunluğu az olduğu için elde edilecek elektrik enerjisi rüzgâr hızı ile daha çok artmakta veya azalmaktadır. Rüzgâr hızı yükseklikle doğru orantılı iken, rüzgâr gücü ise rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılıdır. Rüzgâr santrali kurulmadan önce, kurulum yapılacak bölgede en az bir yıl boyunca rüzgâr ölçümlerinin yapılması gerekmektedir. Rüzgâr hızı bölgenin coğrafik özelliklerine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Rüzgârdan elde edilecek olan enerji potansiyeli, rüzgâr hızına göre değişiklik göstermektedir. Bu yüzden belli bir bölgede, rüzgârdan üretilecek elektrik enerjisinin planlanan üretim miktarı belirlenirken, yıllık ortalama rüzgâr hızı, “Weibull dağılımı” ile hesaplanmış rüzgâr hızı dağılımının kullanılması daha uygundur (Daradeli, 2001). Fakat bu çalışmada türbin tasarımı sırasında ortalama rüzgâr hızı kullanılmıştır (Önder, 2006).

Rüzgâr türbinleri ana milin dönüş eksenine göre gruplara ayrılır:

- Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT)
- Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT)

#### 1.3.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT)

Bu türbin kanatlarının dönme eksenleri yüzeye paraleldir. Bu türbinler günümüzde en çok kullanılan rüzgâr türbin çeşitlerindedir. En iyi verimi elde etmek için kanatların dönme eksenlerinin rüzgâra dik olması gerekmektedir (Önder, 2006).

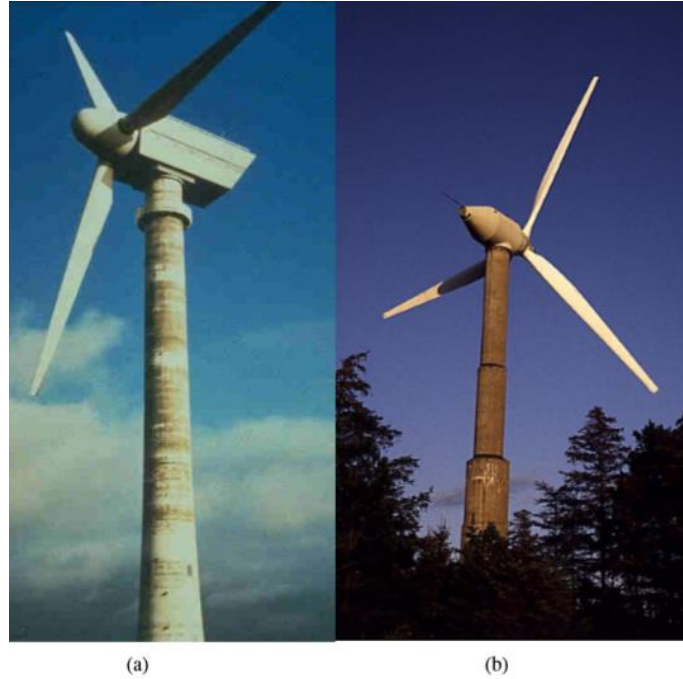
Rüzgâr türbinlerinde kanatların kuleye bağlanma şekli önemlidir. İki çeşit bağlanma şekli mevcuttur. Birincisi rüzgâr, kanada önden geliyorsa buna “rüzgârı karşıdan alan”, ikincisi ise kulenin ekseninin arkasında, yani rüzgârın doğrultusu üzerinde bulunuyorsa buna “rüzgârı arkadan alan” türbin denilir.

Rüzgârı arkadan alan türbinler, turbülans problemlerinden dolayı çok tercih edilmezler. Rüzgârı arkadan alan rüzgâr türbinlerinin bazı avantajları da bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi de rotor rüzgârı karşılarken ek bir mekanizmaya ihtiyaç

duyulmamaktadır. Güçlü rüzgârlarda kanatların eğilerek yüzey alanını düşürmesine olanak tanınmasıdır.

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin verimli kullanılması için birçok avantajı bulunmaktadır. YERT 'lerin kanatları rüzgârın geliş açısına göre ayarlanmasını sağlayabilmektedir. Böylece türbin, en verimli rüzgâr yönü ve şiddetine göre konumlanarak en iyi gücü şafta aktarabilir. Bazı bölgelerde, yüksekliğin her on metrelik artışında rüzgâr hızı % 20 oranında artmaktadır. Bu rüzgâr türbinleri yüksek kulelerin kullanımı için uygundur. Bu sayede orman gibi bölgelerde kullanılabilir. Ayrıca bu rüzgâr türbinlerinin üretimi daha yaygın ve ekonomiktir (Cengiz, 2010).

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin bazı dezavantajları da mevcuttur. Yere yakın bölgelerde türbülansın etkisinden dolayı bu rüzgâr türbinlerinin kısa kulelerde kullanılması önerilmez. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri laminar akışta verimli çalışır. Büyük boyutlu rüzgâr türbinlerinin taşınması problem teşkil etmektedir. Uzun kule ve kanatların taşınabilmesi için uygun yol ve aracın olması gerekmektedir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin talebi, arzdan yüksektir. Rüzgâr türbini fiyatları 2004 ve 2006 yılları arasında yaklaşık olarak % 60 oranında artmıştır. Buna rağmen 2006 yılı sonuna gelindiğinde, büyük üreticilerin birçoğu rüzgâr türbin teslimatları için 2 yıl sonrasına gün vermektedir (Cengiz, 2010).



**Şekil 1. 3.** (a) Önden rüzgâr alan yatay eksenli türbin, (b) Arkadan rüzgâr alan yatay eksenli türbin (Önder, 2006)

### 1.3.1.1. Rüzgârı önden alan yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Bu türbinlerde kanatlar kulenin önünde olacak şekilde bağlanırlar. Rüzgârı arkadan alan türbinlere göre daha çok tercih edilirler. Çünkü bu türbinlerde rüzgârın etkisini azaltacak herhangi bir etmen bulunmamaktadır. Kulenin rüzgâra olan etkisini azaltmak için kanatlar kuleye göre açılı durmaktadırlar. Kulenin yapısı silindirik de olsa rüzgârın etkisini azaltabilmektedir. Bundan dolayı kanatların sert malzemeden yapılması ve kuleye göre biraz uzakta konumlandırılması daha uygun olmaktadır (Önder, 2006).

### 1.3.1.2. Rüzgârı arkadan alan yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Bu türbinlerde kanatlar kulenin arkasında olacak şekilde bağlanırlar. Fakat türbin kanatlara gelen rüzgârı belli oranda etkilediği için kullanımı yaygın değildir (Çelik, 2001).

### 1.3.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT)

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerindeki kanatlar, rüzgârdan aldıkları hareketi jeneratöre dikey olarak iletirler. Bu iletim yönü rüzgâr akış yönüne göre dikeydir. Dikey eksenli türbinlerde bulunan kanatlar iç bükey ve dış bükey yüzeylere sahiptirler. Kanatlardaki bu özellikten dolayı dönme hareketi meydana gelir. Bu rüzgâr türbinlerinin çalışma mantıkları oldukça basittir. Bu rüzgâr türbinleri, yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre verimleri daha düşüktür (Çelik, 2001).

Çizelge 1.1 'de dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 1. 1.** Bazı yatay ve düşey eksenli rüzgâr türbin tipleri ve kullanım amaçları (Walker ve ark., 1997)

Rotor Tipi	Kanat Uç Hız Oranı ( $\lambda$ )	Güç Katsayısı ( $C_p$ )	Kullanım Amaçları
Pervane	3-10	0.42-0.57	Elektrik Üretimi
Darrieus	5-6	0.4	Elektrik Üretimi
Cyclogiro	3-4	0.45	Elektrik Üret. veya Su Pomp.
Fan	1	0.3	Su Pompalama
Çok Kanatlı	3-4	0.35	Elektrik Üret. veya Su Pomp.
Yelken Kanatlı	4	0.35	Elektrik Üret. veya Su Pomp.

Savonious	1	0.15	Su Pompalama
Hollanda	2-3	0.17	Elektrik Üret. veya Su Pomp.

Dikey eksenli türbin tasarımları arasında en çok Darrieus ve Savonius rüzgâr türbinleri öne çıkmaktadır (Cengiz, 2010).

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin hareketli parçaları yere yakın olduğundan dolayı bakımı ve onarımı kolaydır. Yatay eksenli rotorlarda olduğu gibi rüzgâra karşı dönmesi gerekmektedir; bu yüzden yön bulma mekanizması kullanılmaması, dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin avantajları arasında sayılabilir (Cengiz, 2010).

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin dezavantajları ise; kanatlarının rüzgârla birlikte dönmelerinden kaynaklı enerji kayıplarından dolayı geleneksel yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin ürettiğinin ancak yarısı kadar enerji üretebilmeleridir. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin kanatları yere yakın olduğundan dolayı yüksek ve düz alanlara kurulması gerekmektedir. Çünkü yükseklik arttıkça rüzgâr hızı artar ve bu da rüzgâr potansiyelini barındıran en önemli hususlardan biridir. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin kurulamadığı pek çok alana yatay eksenli rüzgâr türbinleri kurulabilir (Cengiz, 2010).

### 1.3.2.1. Darrieus dikey eksenli rüzgâr türbinleri

Dikey eksenli rüzgâr türbinleri arasında en çok kullanılan model Darrieus dikey eksenli rüzgâr türbinleridir. Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından 1931 yılında icat edilmiş ve 1970-1980 lerde Amerika ve Kanada'da bu türbinler üzerine geniş çalışmalar yapılmıştır. Bu modeldeki rüzgâr türbinlerinin verimliliği yüksektir. 2 veya 3 kanatlı olurlar ve yüksek hızlarda çalışabilirler. Bu tip rüzgâr türbinlerinde dışardan bir güç kaynağı ya da fazladan bir savonius rotoru kullanılmalıdır. Çünkü rotorun kalkış torku yüksektir. Kulenin de destekleyici kablolarla birlikte sabit hale getirilmesi gerekmektedir.

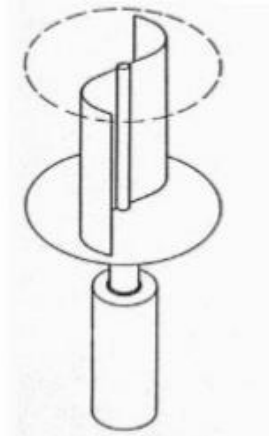




Şekil 1. 4. Darrieus tipi rüzgâr türbini (Derya, 2010)

### 1.3.2.2. Savonius dikey eksenli rüzgâr türbinleri

Savonius rüzgâr türbinleri, Sigurd J. isimli Finlandiyalı mühendis tarafından 1925 yılında icat edilmiştir. Savonius dikey eksenli rüzgâr türbinleri iki yatay disk arasına yerleştirilmiş ve merkezleri birbirine göre simetrik olarak kaydırılmış, “kanat” adı verilen iki yarım silindirden oluşmaktadır. Belirli bir hızla gelen rüzgârın 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 (Ushiyama ve ark., 1988).



Şekil 1. 5. Savonius tipi rüzgâr türbini (Derya, 2010)

Savonius rüzgâr türbinleri aerodinamik performansının düşük olduğundan dolayı uygulama alanları sınırlıdır. Bu uygulama alanlarından bazıları: havalandırma, su pompalama vb. gibidir. Fakat diğer dikey eksenli rüzgâr türbinlerine göre pek çok

avantajı da vardır, bunlardan bazıları; yapımının kolay ve ucuz olması, rüzgâr yönünden bağımsız olması, düşük rüzgâr hızlarında da iyi başlangıç özelliklerine sahip olması ve ilk harekete geçişini kendi kendine sağlıyor olması bu avantajları arasında sayılabilir. (Newman, 1974; Modi ve ark.,1989).



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

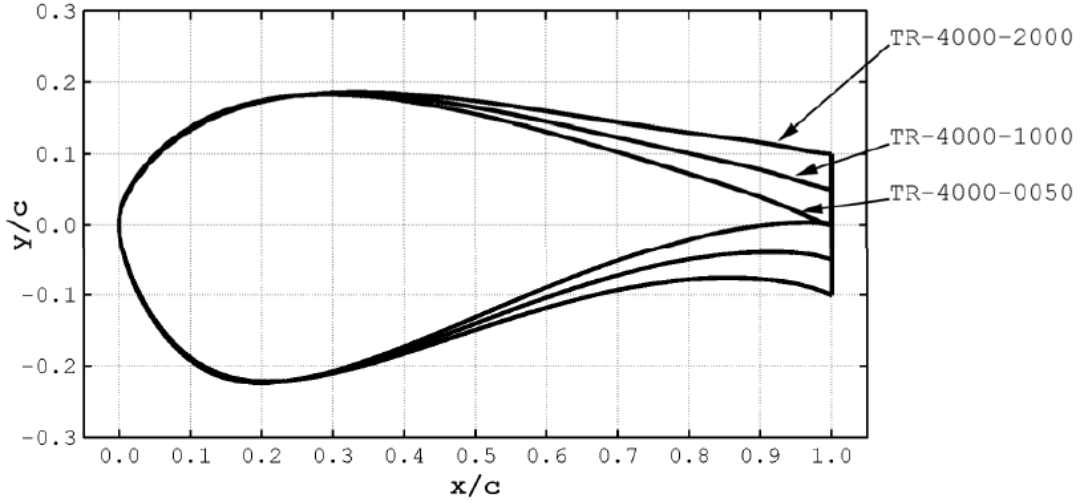
Rüzgâr türbinleri kanatlardan meydana gelmektedir. Bu kanatların aerodinamik verimleri çok önemlidir. Bu kanatlar enine birbirinden farklı boyutlardaki kanat profilleri ile bir araya gelirler. Hava akışı kanat profilleri üzerinden geçerken kaldırma ve sürtünme kuvvetlerini oluşturur (Cengiz, 2010).

Yeni kanat profili şekilleri için birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmaların asıl hedefi kanat performansını artırmaya yönelik olmaktadır. Kanat performansının artırılması da kanattan ayrılmayı daha geç sağlayarak ve daha iyi bir akış sağlayarak gerçekleştirilebilmektedir. Akışın yüzeye bağlanması ile daha yüksek kaldırma kuvveti ve daha az sürüklenme kuvveti sağlanabilmektedir (Cengiz, 2010).

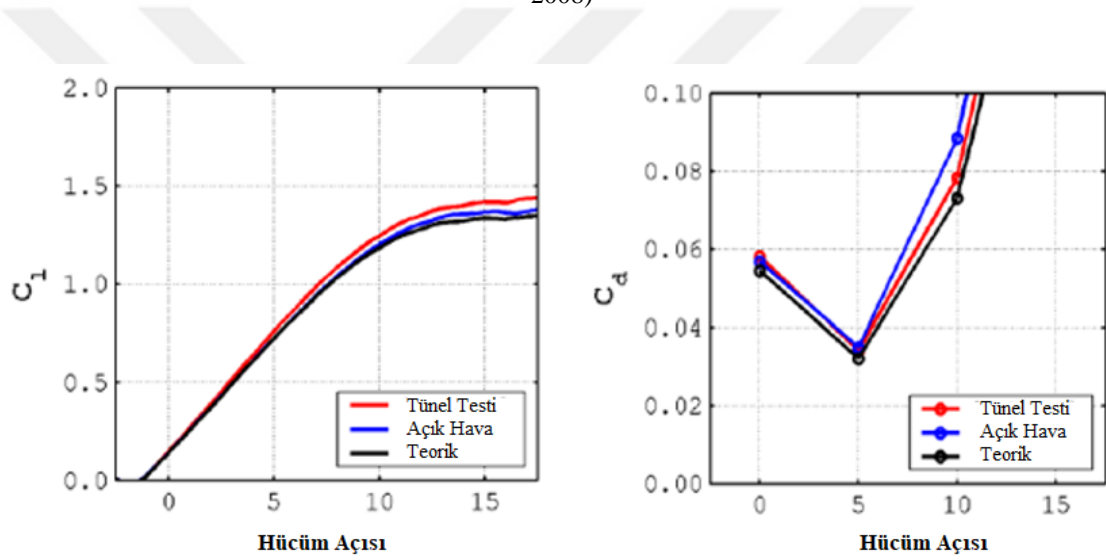
Kanat profillerinin aerodinamik performanslarının artırılmasına yönelik son zamanlarda küt firar kenarlı kanat profilleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların amacı genel olarak akışkan sınır tabakanın ayrılmazlığını sağlamaya yönelik olmaktadır. Bunun sonucunda da kanat profillerinin performansı artırılması hedeflenmektedir.

Van Dam ve ark. (2008), yaptıkları çalışmanın amacı, yüksek katı blokaj koşullarında ve küt firar kenarının olumlu sonuçlarını teyit etmek veya önceki oluşturulmuş rüzgâr tüneli modellerinin ve yapılan deneylerin kalın profil şekillerinin temsilcisi olarak küt firar kenar (flatback) üzerindeki performans karakteristikleri için standart rüzgâr tüneli test doğrulaması yapmışlardır. Kalın rüzgâr türbini profillerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışması ve rüzgâr tüneli testi 1,000,000 Reynolds sayısında yapmışlardır. Sayısal simülasyonlar ile rüzgâr tüneli test sonuçları maksimum % 40 kanat giriş kalınlığında yapılmış olan test için büyük ölçüde uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir. Keskin kenarlı kanat profilinin hesaplanan kaldırma özelliklerinin ve türetilmiş küt firar kenarlı (flatback) kanat profilinin karşılaştırılması artan firar kenarı kalınlığı ile azalan yüzey duyarlılığının daha önceden gözlenen eğilimlerini teyit etmişlerdir.

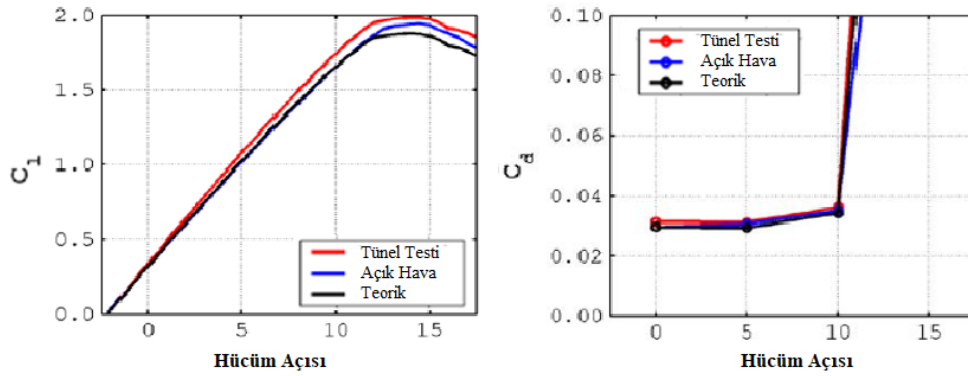
Küt firar kenarlı (flatback) kanat profillerini S821 kanat profilinden türetilmişlerdir. Şekil 2.1 'de görüldüğü üzere TR-4000-0050 nin maksimum giriş kalınlık oranı % 40 dır. TR-4000-1000 'nin de maksimum giriş kalınlık oranı % 40 dır. Fakat firar kenar kalınlığı da % 10 dur. Yapılmış olan deney ve HAD analiz sonuçları Şekil 2.2-2.4 'deki gibidir.



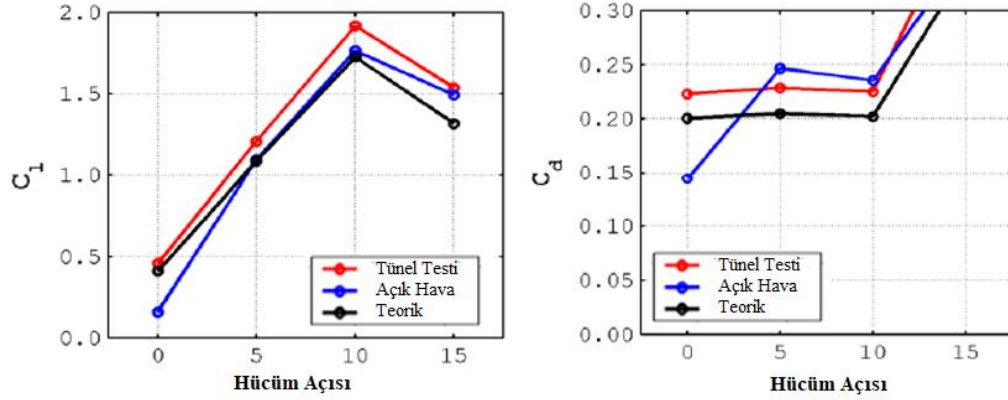
Şekil 2. 1. S821 kanat profili ve türetilmiş küt firar kenarlı (flatback) kanat profilleri (Van Dam ve ark., 2008)



Şekil 2. 2. TR-4000-0050 küt firar kenarlı (flatback) kanat profilinin kaldırma ve sürüklenme katsayıları (Van Dam ve ark., 2008)



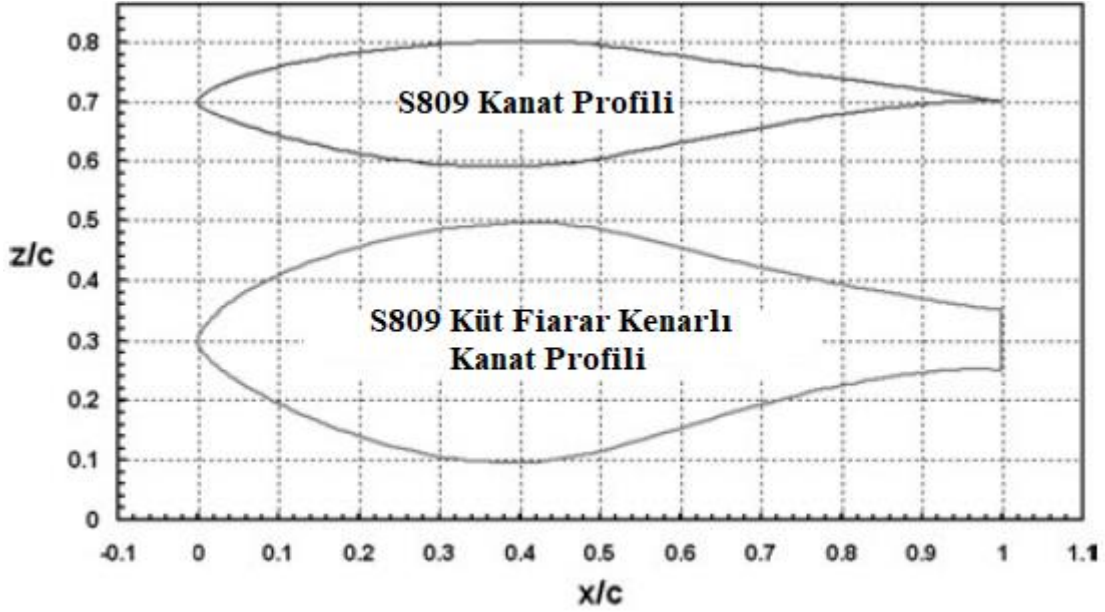
Şekil 2. 3. TR-4000-0100 küt firar kenarlı (flatback) kanat profilinin kaldırma ve sürüklenme katsayıları (Van Dam ve ark., 2008)



Şekil 2. 4. TR-4000-0200 küt firar kenarlı (flatback) kanat profilinin kaldırma ve sürüklenme katsayıları (Van Dam ve ark., 2008)

Firar kenarını belli bir formda kalınlaştırarak test edilmiş ve yapmış oldukları testlerde firar kenarını kalınlaştırdıkça kaldırma katsayısının arttığı görülmüştür (Edward ve ark., 2008).

Chao (2007), S809 kanat profilini kalınlaştırarak küt firar kenarı formu vermiştir. Optimize etmiş olduğu bu kanadı NREL VI nesil rotorda kullanarak ve sıkıştırılabilir üç boyutlu, ortalama Reynolds Navier-Stokes yöntemi kullanılarak etkilerini incelenmiştir. Bu incelemeyi 5, 7 ve 10 m/s serbest akış hızlarında yapmıştır. Optimize etmiş olduğu kanat ile asıl kanat sonuçlarını karşılaştırmıştır. Bu sonuçlara bakarak küt firar kenarlı kanat profillerinin, gelecekteki rüzgâr türbini rotor aerodinamik performansları ile yapısal gereksinimler arasında bir köprü olacağını söylemiştir. Çalışmada kullanılan kanat profil formları Şekil 2.5 'de gösterilmektedir.



Şekil 2. 5. S821 asıl kanat profili ve türetilmiş kanat profili (Chao, 2007)

Yapılmış olan çalışmada iki konfigürasyon incelenmiştir. Birincisi, 5.03 m lik kirişi ile NREL 4.nesil rotor S809 kanat profilidir. İkincisi ise, S809 kanat profilinin % 25 maksimum veter konumunda, % 40 maksimum kalınlık-kiriş oranı ve % 10 küt fırar kenarının kiriş uzunluğu olacak şekilde değiştirilmiş küt fırar kenarlı (flatback) kanat profilidir. Deneyler her iki konfigürasyon için 0 derece yaw (yalpalama) ve 3 derece eğim açısıyla (pitch angle) yapılmıştır. Reynolds sayısı 1,000,000 olarak alınmış (Chao, 2007)

Yapılmış olan çalışmanın sonuçları Çizelge 2.1 'de verilmiştir.

Çizelge 2. 1. Düşük Mach sayılarında yapılan deney ve analizlerde elde edilen tork değerleri (Chao, 2007)

Rüzgâr Hızı (m/s)	S809/Küt Fırar Kenarlı S809 Deneysel Sonucu (N.m)	S809 Kanat Profili Analiz Sonucu (N.m)	Küt Fırar Kenarlı S809 Kanat Profili Analiz Sonucu (N.m)
5	220/370	160	158
7	700/870	815	815
10	1210/1380	1750	1385

Laminer ayrılma kabarcığının yapısı hakkında yapılan ilk çalışmalardan birisi Tani tarafından yapılan deneysel çalışmadır. Bu çalışmada laminer ayrılma kabarcığı uzunluğuna göre kısa ve uzun kabarcık olarak isimlendirilmiştir. Laminer ayrılma kabarcığının yapısı ve davranışını hakkında yapılan ilk çalışmalardan bir başkası Gaster tarafından yapılan çalışmadır. Bu çalışmada laminer ayrılma kabarcığı oluşmasının ve

patlamasının Re sayısı ve yüzey üzerindeki basınç dağılımına bağlı olduğunu göstermiştir. Re sayısı arttıkça oluşan kabarcığın boyunun azaldığı ve incelenen basınç katsayısı değerlerinde ayrılma ve yapışma noktaları arasında basınç dağılımında bir bozulma olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada da laminer ayrılma kabarcığı kısa ve uzun kabarcığı olarak iki şekilde sınıflandırılmıştır. Rinioe ve Takemura 135,000 Re sayısında NACA 0012 kanat profilinde oluşan laminer ayrılma kabarcığının yapısını incelemiştir. Bu çalışmada  $\alpha < 11.5^\circ$  olması durumunda kısa ayrılma kabarcıkları oluşurken  $\alpha > 11.5^\circ$  olması durumunda ise sonra akışta ayrılmaların görüldüğü ve akış kaynaklı titreşimlerin büyük salımlı bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir (Tani, 1964; Gaster, 1967; Rinioe ve ark., 2004).

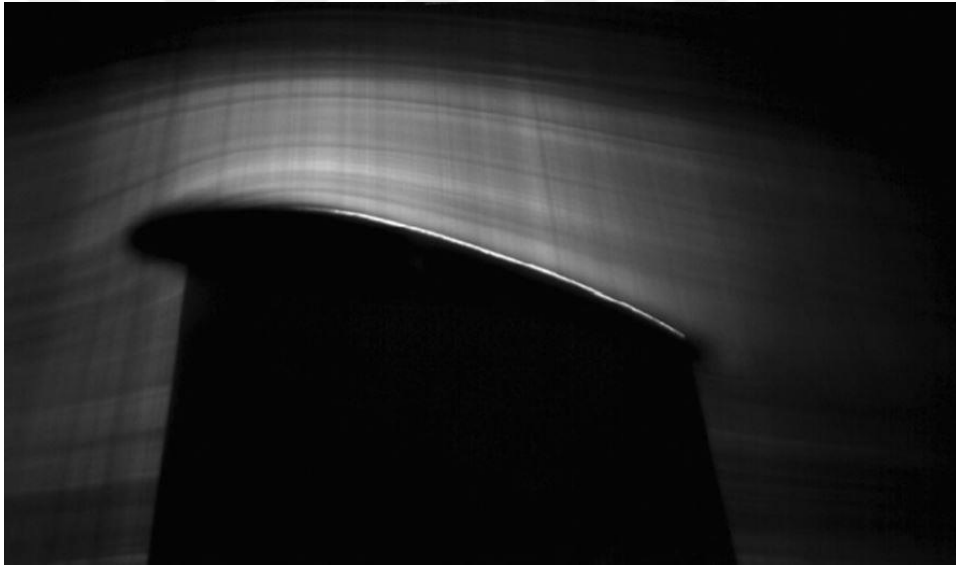
Diwan ve Ramesh tarafından düz plaka üzerinde yapılan deneysel çalışmada laminer ayrılma kabarcığının boyu ve yüksekliğinin, Reynolds sayısının artması ile küçüldüğünü fakat boydaki azalma oranının yüksekliğe göre çok fazla olduğunu gözlemlenmiştir (Diwan ve ark., 2007).

Yang ve ark. (2007), GA(W)-1 kanat profili üzerinde yapmış oldukları çalışmada 68,000 Reynolds sayısında değişik hücum açılarında basınç katsayısı,  $C_p$  ve parçacık akış görüntüleme (PIV) yöntemi ile akış görüntüleri değişimi ele alınmıştır. Hücum açısı arttıkça laminer ayrılma kabarcığının hücum kenarına doğru hareket ettiği ve boyunun da küçüldüğü gözlemlenmiştir. Oluşan kabarcık boyu en fazla veter boyunun % 20 'si, yüksekliği ise veter boyunun % 1 'i kadar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca hücum açısı  $7^\circ$  ve üstündeki açılarda ayrılmaların da Kelvin Helmholtz kararsızlıklarından dolayı oluşan girdaplardan kaynaklandığını gözlemlenmiştir (Yang ve ark., 2007).

Hain ve ark. (2009), Burgman ve ark. (2006), düşük Reynolds sayılarında rüzgâr türbinleri için tasarlanmış SD 7003 kanat profili üzerinde oluşan laminer ayrılma kabarcığını incelemiştir. Laminer ayrılma kabarcığının üstündeki kayma tabakasının Kelvin Helmholtz kararsızlıklarından dolayı oluşan kıvrılmalarının girdap oluşumuna neden olduğu ve türbülansa geçişte bu kararsızlığın baskın olduğunu göstermiştir (Hain ve ark., 2009; Burgman ve ark., 2006).

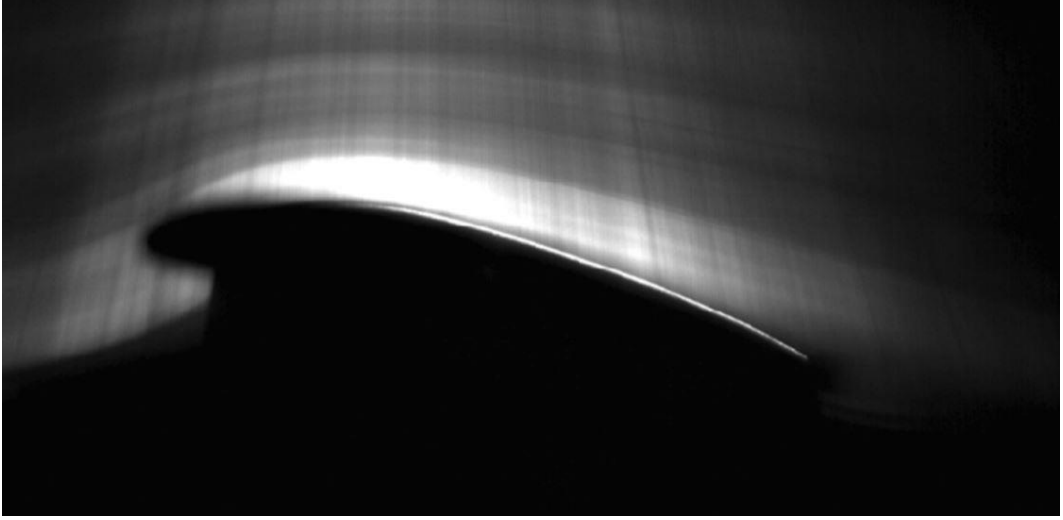
Ronit ve ark. (2011), Düşük Reynolds sayılı kanat profillerinin düşük rüzgâr hızlarında ve daha iyi başlangıç performansları elde etmek amacıyla yatay eksenli rüzgâr türbinleri uygulamalarında kullanılmak üzere açık devreli bir rüzgâr türbininde denenerek AF300 kanat profili geliştirilmişler. Akış özellikleri hakkında ek bilgi elde etmek amacıyla bir analiz programında HAD analizi yapmış ve kanat profili etrafındaki

akışı incelemek için duman akımı görselleştirmesi ile birlikte parçacık görüntü akımları (PIV) kullanılmışlar. AF300 kanat profili kalınlaştırılarak küt firar kenar formu kazandırmışlar.  $14^\circ$  durma (tutunma kaybı) açısında 75,000, 128,000 ve 205,000 Re sayılarında sırasıyla 1.72, 1.81 ve 1.86 maksimum kaldırma katsayıları elde etmişlerdir. Reynolds sayısı 38,000 ve hücum açıları 0-18 arası olduğunda kaldırma katsayısı 0.41 'den 1.05 'e yükseltmişlerdir. AF300 kanat profilinin kütleştirilmiş arka kenarı akış ayırmayı geciktirerek aerodinamik özelliklerini geliştirmiş ve kanat profili yapısının  $C_1$  sini artırmışlardır. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7 'de gösterildiği gibi duman akımı görselleştirmesi ile birlikte parçacık görüntü akımları (PIV) sonuçları, Reynolds sayısı 56,000 gibi düşük seviyelerdeyken ve hücum açısı  $8^\circ$  olduğunda akışın kanat yüzeyine tamamen bağlı kaldığını ve bu durum Reynolds sayısı 75,000, hücum açısı 14 derecede olduğunda akış bu durumunu koruduğunu göstermişlerdir (Ronit ve ark., 2011).



**Şekil 2. 6.** Duman akış görselleştirmesi ile  $Re=75,000$  ve hücum açısı= $14^\circ$  de AF 300 kanat profili (Ronit ve ark., 2011)





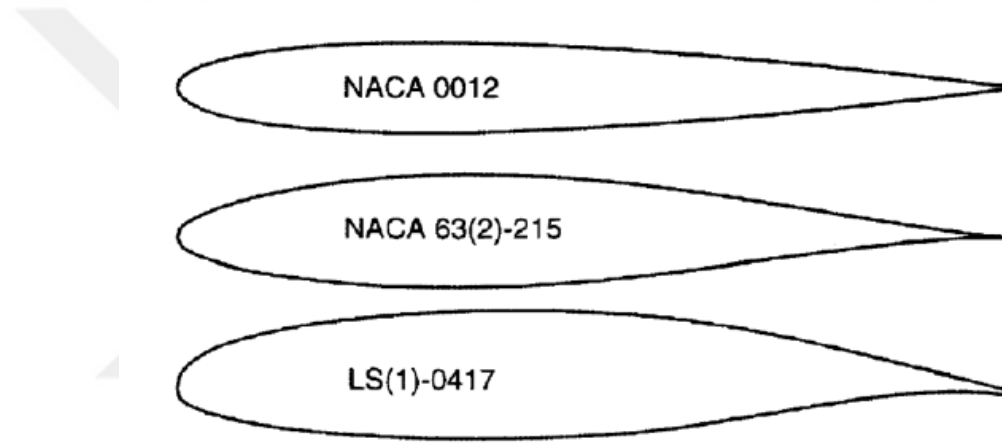
Şekil 2. 7. Duman akış görselleştirmesi ile  $Re=205,000$  ve hücum açısı= $14^\circ$  de AF 300 kanat profili  
(Ronit ve ark., 2011)

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Kanat Profilleri

Bugün birçok ülkede geliştirilmiş ve sayısı binleri aşan kanat profili mevcuttur. Bu kanat profillerinin bir kısmı II. Dünya savaşı sırasında ABD’de NACA (Havacılık Alanında Ulusal Danışma Komitesi) tarafından ve bir kısmı da Almanya, İngiltere, Rusya gibi ülkelerde geliştirilmiştir. Gelişen teknoloji ile beraber HAD kullanılarak modern profiller de geliştirilmiştir.

Bu tezde NACA tarafından geliştirilmiş NACA 4415 kanat profili incelenecektir. Geliştirilmiş bazı kanat profilleri Şekil 3.1 ‘de gösterilmiştir.



Şekil 3. 1. Bazı modern kanat profilleri (Manwell ve ark., 2000)

#### 3.1.1. NACA profilleri

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan kanat profilleri NACA tarafından; kanat profillerinin yapısı ve özelliklerine göre geliştirilen “NACA” ifadesini takip eden bir seri sayı ile tanımlanmaktadır. Bu seri sayılar kanat profillerini özelliklerine göre tanımlamaktadır. Dolayısı ile seri sayıya bakılarak profil ile ilgili özellikler belirlenmekte ve profil kolayca bulunabilmektedir. NACA kanat profilleri 6 gruptan meydana gelmektedir; 4 basamaklı, 5 basamaklı, 1 serileri, 6 serileri, 7 serileri ve 8 serileri olarak gruplandırılabilir.

#### Dört basamaklı NACA serileri;

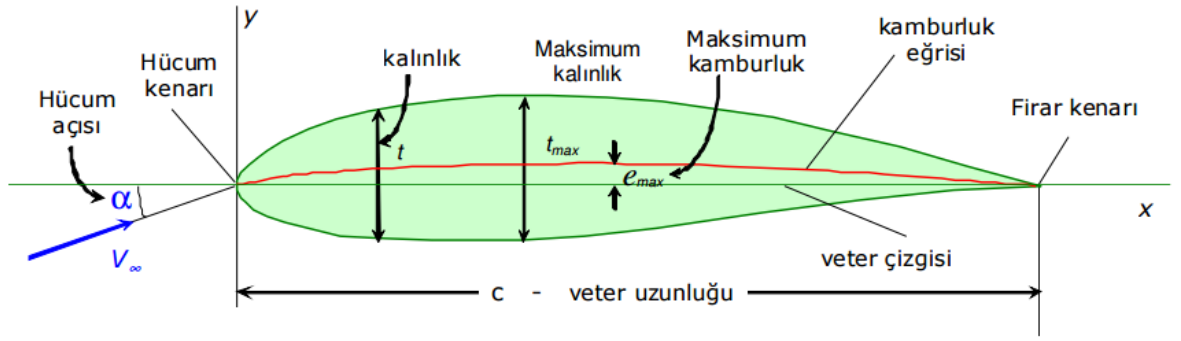
Dört basamaklı kanat profili serisi iki bölümden oluşur; ilk bölümde “NACA” ifadesi yazılır, ikinci bölümde 4 basamaklı bir sayı yazılır. 4 basamaklı serinin ilk sayı basamağı kanat profilin maksimum kamburluğunun veter hattına oranını vermektedir. İkinci sayı basamağı ise kamburluğun maksimum düzeyde olduğu noktanın kanat profili hücum kenarına olan uzaklığını veter (kiriş) hattının yüzdesi olarak tanımlamaktadır. Son iki sayı basamağı ise kanat profilin maksimum kalınlığının veter hattına oranıdır. Örneğin Şekil 3.3 'te görülen NACA 4415 kanat profilinin maksimum kamburluğu % 4, bu noktanın kanat profili hücum kenarına uzaklığının veter hattına oranı % 40 ve kanat profilinin maksimum kalınlığının veter hattına oranı % 15 'tir.

### 3.1.2. Kanat profili özellikleri

Rüzgâr türbinlerinin kanat profilleri iki eğriden meydana gelir. Kanat profilinin giriş ucu ile firar kenarı ucu arasındaki uzunluğa veter uzunluğu (chord) olarak isimlendirilir ve “c” ile gösterilir. Kanat profilinin alt ve üst eğrileri arasındaki dikey uzunluk kanat kesit kalınlığı olarak isimlendirilir ve “t” ile gösterilir. Kanat profilin, akışı aldığı ucuna ön (hücum) kenar, akışın profili terk ettiği kısma arka(firar) kenar ismi verilir. Bu iki ucu birleştiren doğruya kiriş çizgisi denir. Kanat profilin üst eğrisi ile alt eğrisinin ortasından geçip hücum kenarı ile firar kenarını birleştiren eğriye kamburluk eğrisi denir. Bu eğri ile veter hattı arasındaki dikey uzaklık ise kamburluk olarak isimlendirilir (Şekil 3.2) (Martin, 2008; Anderson, 1986).

Kanat profilinin kamburluk değeri artırıldığında üst yüzeydeki alan artar; üst yüzeydeki alanın artması ile kanat profilinin üzerinden geçen havanın hızı da artar. Bernoulli denklemi ve enerjinin korunumu prensibine göre hava hızının artması ile basınç da düşmektedir. Böylece alt yüzey ile üst yüzey arasında oluşan basınç farkı artmakta ve sonuç olarak taşıma kuvveti arttırılmaktadır.

Şekil 3.2 'de kanat profilinin özelliklerini belirleyen hücum kenarı, firar kenarı, hücum açısı, kamburluk, kalınlık, veter çizgisi, veter uzunluğu, kamburluk eğrisi gibi terimlerin profil üzerinde temsil ettiği yerler gösterilmiştir.



Şekil 3. 2. Kanat profili (Yükselen, 2017)

Kalınlık oranı,

$$\delta = t_{\max} / c \quad (3.1)$$

$\delta < \% 10$  ince profil (yüksek hızlarda)

$\delta \sim \% 10-14$  orta kalınlıkta profil

$\delta > \% 14$  kalın profil (düşük hızlarda) (Yükselen, 2017)

Kamburluk oranı,

$$\gamma = e_{\max} / c \quad (3.2)$$

$\gamma < \% 4-5$  küçük kamburluk (uçaklarda)

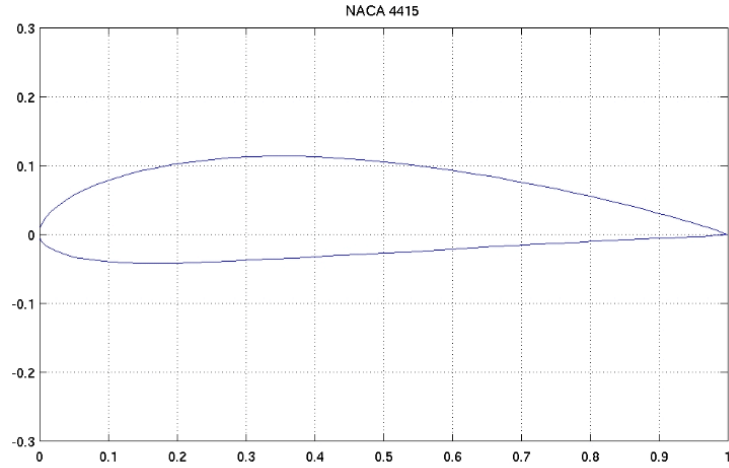
$\gamma > \% 4-5$  büyük kamburluk (kompresör-türbin) (Yükselen, 2017)

### 3.1.2.1. NACA 4415 kanat profili özellikleri

Şekil 3.3 'te gösterilen kanat profilinin özellikleri ve oranları aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

Kamburluk oranı	: % 4
Maksimum kamburluk noktası konumu	: % 40
Kalınlık oranı	: % 15

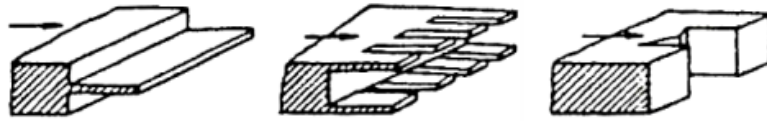
Yukarıdaki verilere göre NACA 4415 kanat profili kalınlık oranı % 14 'den büyük olduğundan dolayı kalın profil olarak nitelendirilebilir. NACA 4415 kanat profilinin formu Şekil 3.3 'te gösterilmektedir.



Şekil 3. 3. NACA 4415 kanat profili

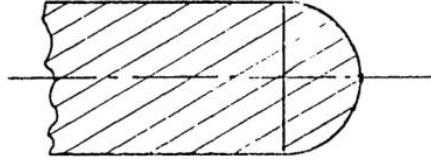
### 3.2. Küt Firar Kenarlı Kanat Profilleri

Firar kenarındaki çentikler tabandaki sürüklemenin azaltılmasında oldukça etkili olduğu görülmektedir. Şekil 3.4 'de görülen testere dişli ve M şeklindeki küt firar kenarlı kanat profillerinde girdap etkisi azalacağı için daha yüksek temel basınç meydana gelmiş olur. M şeklindeki tırtıklı firar kenarlı bir kanat testere firar kenarlı bir profilden daha etkilidir. Çünkü M şeklindeki firar kenarlı profillerde daha az girdap meydana gelmektedir. Fakat bu şeklin derinliği testere dişli boşluk derinliğinden biraz daha fazladır (Daniel ve ark., 2005).



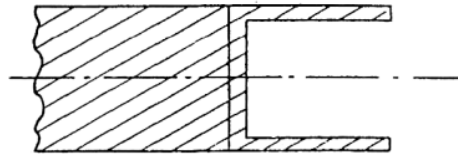
Şekil 3. 4. Sürüklemeye etkisini azaltma tekniği(soldan); ayırıcı levha, havalandırma boşluğu, tırtıklı firar kenarı (Tanner, 1973)

Firar kenarına yuvarlak form verilerek oluşturulmuş profil formu da Şekil 3.5 'de görülmektedir.

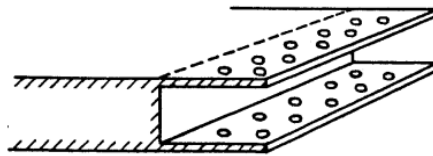


Şekil 3. 5. Yuvarlak firar kenarı (Nash ve ark., 1966)

Sonuç olarak, firar kenarı keskin köşelerinden akışın ayrılması girdapların oluşmasına sebep olmaktadır. Kanat profili arkasında akış ayrılmasına sebep olan ve büyük bir girdap oluştuğunda; firar kenarı üzerinde yapılacak olan bir oyuk veya bir boşluk daha fazla basınç oluşturur bu bölgede ve daha az türbülans oluşmasını sağlayabilir (Daniel ve ark., 2005). Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 ‘de farklı firar kenarı formlarına yer verilmiştir.



Şekil 3. 6. Taban boşluğu (Nash ve ark., 1966)



Şekil 3. 7. Delikli taban boşluğu (Nash, 1967)

Bu çalışmada NACA 4415 kanat profilinden elde edilen küt firar kenarlı kanat profilinin çıkış kenarındaki kalınlık % 2 olduğu için sürüklenme etkisini ve türbülansı azaltacak şekillerin uygulanması için yeterli alan olmadığı için uygulanmamıştır.

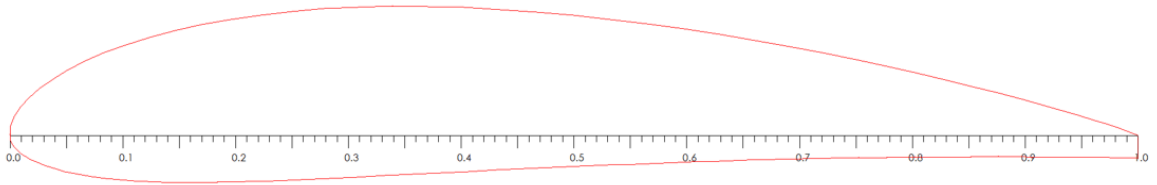
### 3.2.1. Küt firar kenarlı profilin elde edilmesi

Küt firar kenarlı kanat profili bu tez çalışmasında çıkış kenarının kalınlaştırılması ile elde edilmiştir.

### **Kanat profilinden küt firar kenarı oluşturma;**

Kanatları meydana getiren profiller; altta ve üstte birer adet olmak üzere iki adet çizgiden meydana gelmektedir. Çıkış kenarında kütleştirme meydana getirmek için; kütleştirme yapılacak profil çizgisinin ne kadar kütleştirileceğine karar verilir. Daha sonra profilin çıkış kenarından başlanarak kütlük miktarı kadar profilin y koordinatlarına eklenir. Belirlenmiş olan kütlük miktarı maksimum kanat kamburluk noktasına kadar devam edecek şekilde oransal olarak ve maksimum kamburluk noktasında sıfır olacak şekilde ayarlanır. Bunun sonucunda da profilin alt veya üst çizgisinde istenen kütlük Şekil 3.8 'de gösterildiği gibi elde edilmiş olur.

Şekil 3.8 'de bu tez çalışmasında incelenen NACA 4415 kanat profilinin alt çizgisinin % 2 oranında kütleştirilmesi sonucunda elde edilen kanat profili gösterilmektedir.



**Şekil 3. 8.** Türetilen küt firar kenarlı kanat profili

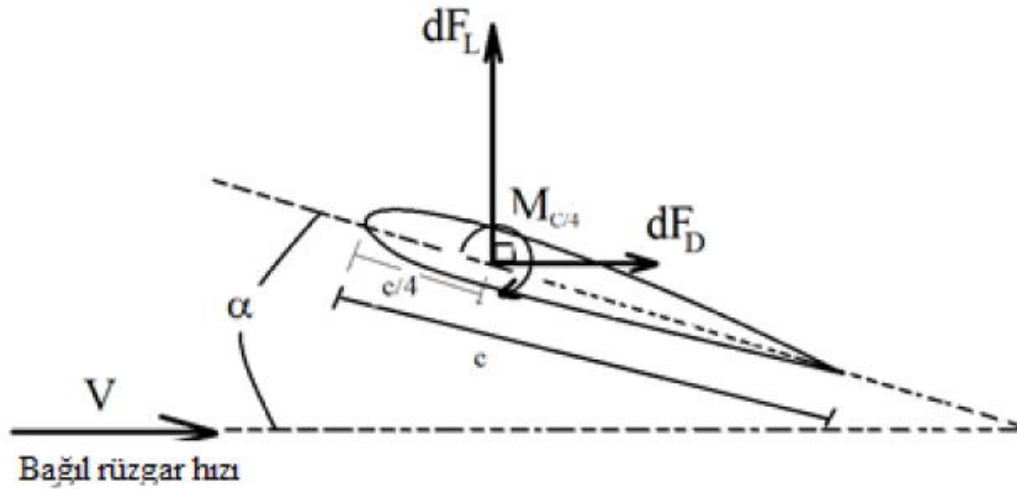
### **3.3. Aerodinamik Kuvvetler ve Kavramlar**

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, kanatların 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.

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

Kanat profiline gelen  $V$  hızlı hava, bu profilin özel tasarlanmış geometrisi sayesinde alt ve üst yüzeyleri arasında basınç farkı oluşturur. Bu basınç farkı sayesinde akış doğrultusuna dik bir  $dF_L$  kaldırma kuvveti (lift) meydana gelir.  $V$  hızının kanat kesit giriş hattı ile yaptığı açıya hücum açısı denir ve  $\alpha$  ile gösterilir. Burada kaldırma kuvveti,  $dr$  uzunluğundaki kanat elemanı için yazıldığı için  $F_L$  yerine  $dF_L$  simgesi kullanılmıştır.  $F_L$  nin birimi N (Newton) iken  $dF_L$  nin birimi (birim uzunluk başına etkiyen kuvvet olduğundan) N/m olur. Kanat kesitinde kaldırma kuvveti dışında ikinci bir kuvvet daha oluşur. Akış doğrultusunda meydana gelen bu kuvvet sürüklenme kuvveti (drag) olarak isimlendirilir ve  $dF_D$  ile gösterilir. Bu iki kuvvetin dışında, kanat kesitini saat yönünde dönmeye zorlayacak şekilde bir de moment oluşur. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin uygulama noktası düşük hızlı akışkana maruz kalan kesitlerde, kanat kesitinin ön hücum kenarının 1/4 gerisindedir (Şekil 3.9) (King, 2001).



Şekil 3. 9. Kaldırma, sürüklenme kuvvetleri ve moment (Erişen ve ark., 2014)

$V$  havanın hızı, kanat elemanında oluşan  $dF_L$  kaldırma kuvveti ve  $dF_D$  sürüklenme kuvveti olmak üzere;

$C_L$  kaldırma kuvvet katsayısı,

$$C_L = \frac{dF_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 c dr} \quad (3.3)$$

$C_D$  sürüklenme kuvvet katsayısı,

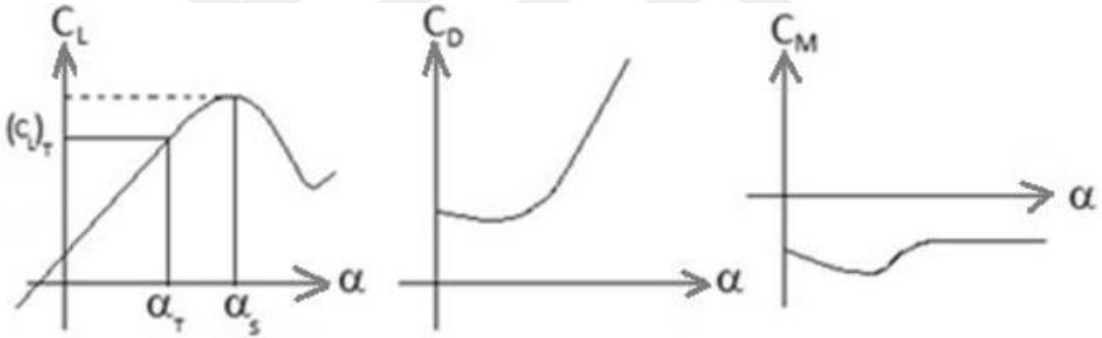


$$C_D = \frac{dF_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 c dr} \quad (3.4)$$

Şeklinde tanımlanırlar. Burada  $C_L$  ve  $C_D$  birimsiz katsayılarıdır. Kanat elemanında oluşan  $dM$  moment ise  $C_M$  moment katsayısı,

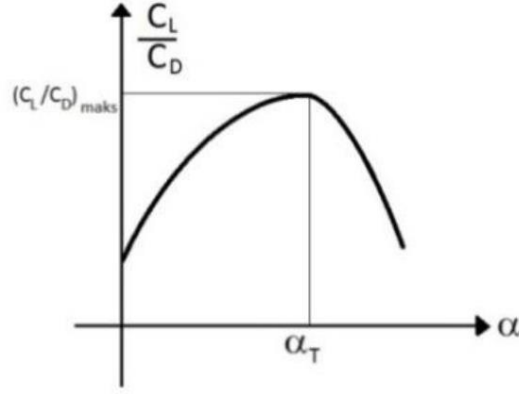
$$C_M = \frac{dM}{\frac{1}{2} \rho V^2 c^2 dr} \quad (3.5)$$

Bişiminde tanımlanır.  $C_L$  kaldırma ve  $C_D$  sürüklenme kuvvet katsayıları  $\alpha$  hücum açısıyla değişirken,  $C_M$  moment katsayısı hücum açısıyla pek fazla değişmez. Bu katsayıların hücum açısına göre değişen değerleri polar grafikler ismi ile anılan grafiklerle gösterilir. (Şekil 3.10)



Şekil 3. 10. Polar grafikler (Katz ve ark., 1991)

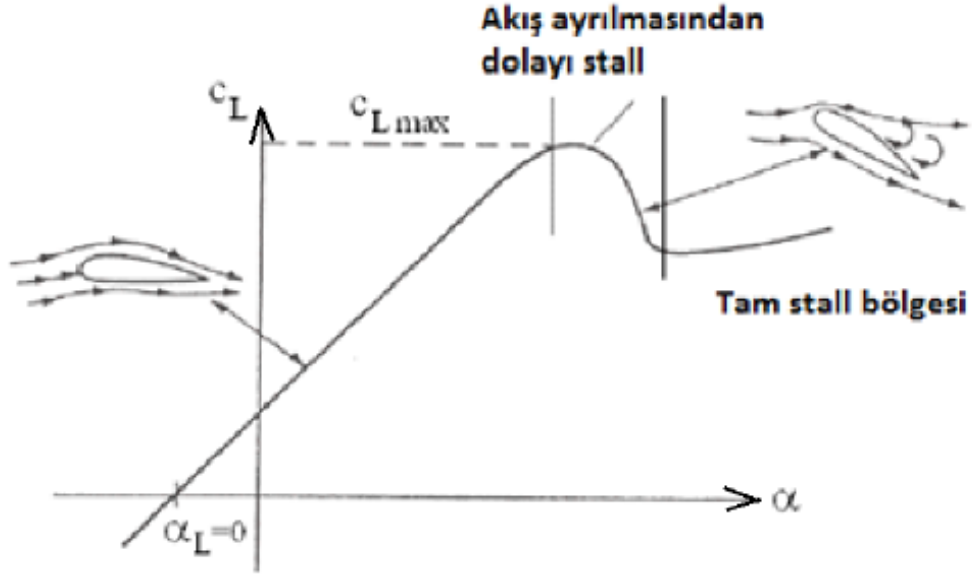
Kaldırma/sürüklenme oranının en yüksek olduğu açı, rüzgâr türbinlerinde tasarım açısı olarak alınır (Şekil 3.11).



Şekil 3. 11. Tasarım hücum açısı (King, 2001)

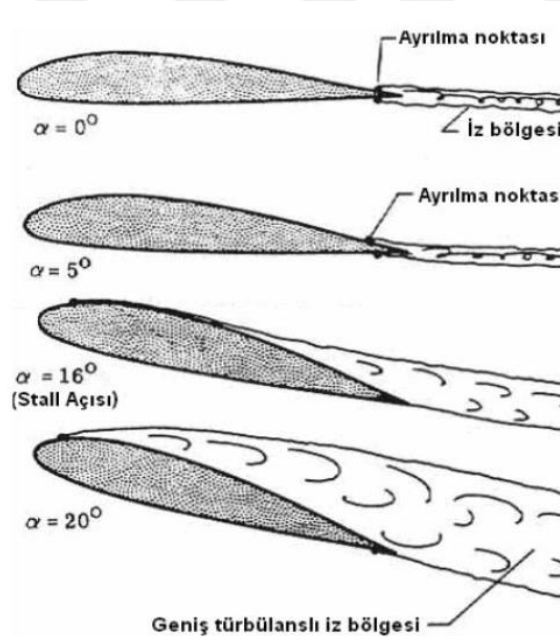
Şekil 3.10 'da tutunma kaybı açısı  $\alpha_s$ , tasarım hücum açısı  $\alpha_T$  ile gösterilmiş ve  $C_L$  kaldırma katsayısının  $C_D$  sürüklenme kuvvetinin ve  $C_M$  moment katsayısının  $\alpha$  hücum açısına göre değişimlerini gösteren polar grafikler gösterilmiştir. Hücum açısı arttıkça  $C_L$  ve  $C_D$  değerleri artar. Ancak bu artış, hücum açısının kritik bir değerine kadar devam eder ve bu açıdan sonra  $C_L$  değeri azalmaya başlarken  $C_D$  değeri hızla artmaya devam eder. Bu kritik açiya kadar akış, kanat kesit üst yüzeyinde yüzeye uyumlu bir şekilde hareket ederken hücum açısının artmasıyla birlikte akış yüzeyden ayrılmaya başlar. Akış ayrılmasının ön uca yaklaşmasıyla beraber  $C_L$  değeri azalmaya başlar. Bu olay 'stall' veya 'tutunma kaybı' olarak isimlendirilir ve tutunma kaybı olayının başladığı bu açıya tutunma kaybı açısı denir.

Şekil 3.12 'de gösterildiği gibi, tutunma kaybı öncesinde  $C_L$  kaldırma katsayısı  $\alpha$  hücum açıyla artar,  $\alpha_s$  tutunma kaybı hücum açısında maksimum değerine ulaşır. Tutunma kaybı sonrası ise  $C_L$  azalır (King, 2001).



Şekil 3. 12. Kanat kesitinin üç farklı akış davranışı (King, 2001)

Akış ayrılması, kanat kesitinin arka ucunda başlar ve hücum açısının artmasıyla birlikte ön uca doğru kayar (Şekil 3.13).



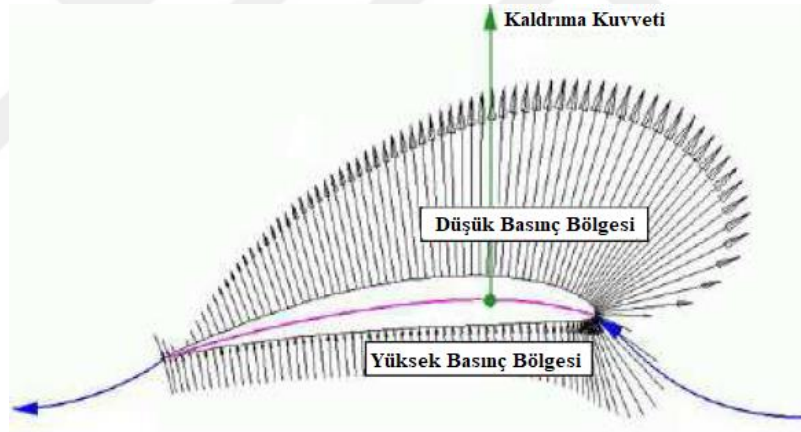
Şekil 3. 13. Örnek bir tutunma kaybı olayı (King, 2001)

Kaldırma ve sürükleme kuvvetlerinin oluşmasının sebebi, cisim etrafında oluşan basınç değişimi ve yüzey sürtünmesidir.  $C_f$  yüzey sürtünme katsayısı olup kayma gerilmesinin dinamik basınca oranı olarak tanımlanır.  $C_p$  basınç katsayısı olup statik basınç farkının dinamik basınca oranı olarak tanımlanır. Kanat kesit yüzeyindeki  $C_p$

basınç ve  $C_f$  sürtünme katsayılarının dağılımı bilirse  $C_L$  ve  $C_D$  katsayıları belli bir hücum açısında hesaplanabilir.  $P_0$  açık hava basıncı,  $P$  akışkanın statik basıncı,  $V$  akışkanın hızı olmak üzere, basınç katsayısı  $C_p$ ,

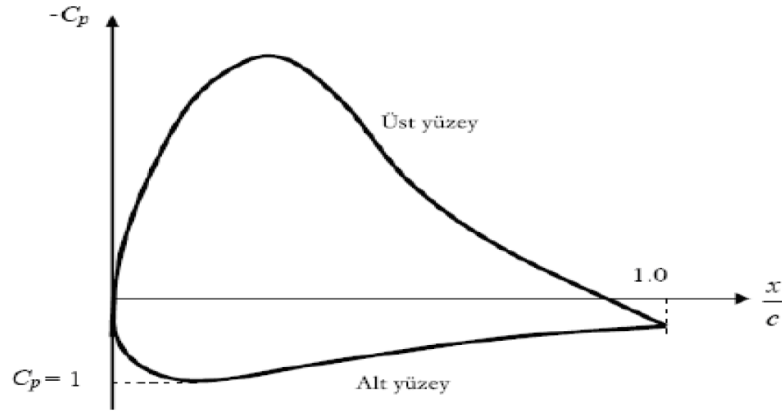
$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (3.6)$$

Cisim etrafında çeşitli noktalardaki farklı hızlar, Bernoulli denklemine göre cisim etrafında her noktada değişen bir basınç dağılımına neden olur. Şekil 3.14 'te verilen basınç dağılımında görüldüğü gibi üst yüzeyde düşük basınç bölgesi, alt yüzeyde yüksek basınç bölgesi oluşur. Kanadın hücum kenarında durma noktası oluşur ve durma noktasında havanın hızı sıfıra eşit olduğu için dinamik basınç sıfırdır ve toplam basınç statik basınca eşittir.



Şekil 3. 14. Küçük hücum açısına sahip bir kanat profili etrafındaki basınç dağılımı (Cengiz, 2010)

Şekil 3.15 'te basınç katsayısının kanat profilinin veter uzunluğu boyunca değişim grafiği verilmiştir. Alt ve üst yüzeyler arasındaki basınç farkından meydana gelen basınç kuvvetlerinin ve hava ile cisim yüzeyi arasındaki sürtünme kuvvetlerinin bileşkesi cisim üzerinde bir bileşke kuvvetle bir bileşke moment oluşturulur.



Şekil 3. 15. Basınç katsayısının veter uzunluğu boyunca değişimi (Cengiz, 2010)

Sürtünme katsayısı  $C_f$ ,

$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (3.7)$$

Eşitliği ile verilir. “ $\tau$ ” terimi, kayma gerilmesini (shear stress) ifade eder ve

$$\tau = \mu \left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (3.8)$$

Şeklinde tanımlanır. Burada,

$$\left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0}$$

Terimi yüzeydeki hız profilinin eğimini,  $\mu$  terimi havanın dinamik viskozitesini ve

$$\frac{1}{2} \rho V^2$$

Terimi dinamik basıncı ifade eder. Kanat kesitinin hem alt hem de üst yüzeyi üzerindeki basınç katsayısı  $C_p$  ve yüzey sürtünme katsayısı  $C_f$  dağılımı bilinirse, kanat kesit kiriş ( $x$ ) doğrultusunda oluşan aksenal kuvvet katsayısı  $C_x$  ile bu doğrultuya dik ( $y$ ) oluşan normal kuvvet katsayısı  $C_y$  aşağıdaki eşitliklere göre hesaplanabilir.

$$C_y = \frac{1}{c} \left[ \int_0^c (c_{p,alt} - c_{p,\ddot{u}st}) dx + \int_0^c \left( c_{f,\ddot{u}st} \frac{dy_{\ddot{u}st}}{dx} - c_{f,alt} \frac{dy_{alt}}{dx} \right) dx \right] \quad (3.9)$$

$$C_x = \frac{1}{c} \left[ \int_0^c \left( c_{p,\ddot{u}st} \frac{dy_{\ddot{u}st}}{dx} - c_{p,alt} \frac{dy_{alt}}{dx} \right) dx + \int_0^c (c_{f,\ddot{u}st} + c_{f,alt}) dx \right] \quad (3.10)$$

$C_y$  ile  $C_x$  değerleri hesaplandıktan sonra,  $V$  akış doğrultusundaki  $C_D$  sürükleme kuvvet katsayısı ile akış doğrultusuna dik oluşacak  $C_L$  kaldırma kuvvet katsayısı,  $\alpha$  hücum açısına göre aşağıdaki formüllerle hesaplanır (King, 2001).

$$C_L = C_y \cos \alpha - C_x \sin \alpha \quad (3.11)$$

$$C_D = C_y \sin \alpha + C_x \cos \alpha \quad (3.12)$$

### 3.3.1. Düşük Reynolds sayısı aerodinamiği

Akışkanlar mekaniğinde en iyi bilinen ve en çok kullanılan Reynolds sayısı, atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranıdır. Reynolds sayısı akışan laminer veya türbülanslı yapıda olduğunu tanınamaya yarayan önemli bir boyutsuz parametredir. 1883 yılında Osborne Reynolds tarafından tanımlanan boyutsuz bir sayı olan  $Re$  sayısı;

$$Re = \frac{\rho V c}{\mu} \quad (3.13)$$

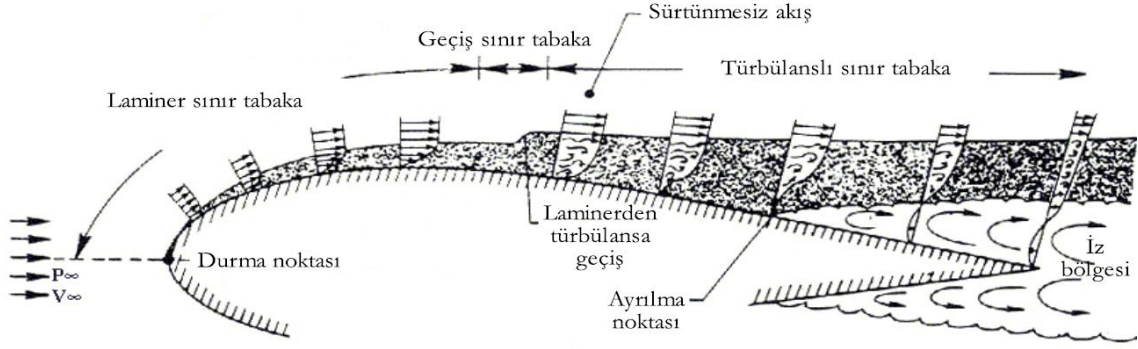
Eşitliği ile hesaplanır. Burada  $V$  havanın cisme göre bağlı hızını,  $\mu$  terimi havanın dinamik viskozitesini,  $\rho$  havanın yoğunluğunu,  $c$  cismin karakteristik uzunluğunu (kanat elemanı için bu uzunluk kanat veter uzunluğu  $c$  alınır) ifade eder. Reynolds sayısının büyüklüğü akışın laminer veya türbülans olduğunu belirler. Akışta düzenlilik varsa laminer akış, akışta yüzeye dikey veya dairesel hareketler varsa türbülans akış olur. Reynolds sayısı arttıķa; akım alanında atalet kuvvetlerinin hakimiyeti artar, viskoz kuvvetlerin etkinliği dar bir bölge içerisinde (sınır tabaka) kalır ve sınır tabaka daha çabuk türbülanslı hale geçer. Böylece yüksek Reynolds sayı değerlerinde ayrılma

olayı daha geç olacağından kaldırma katsayı değeri artarken sürüklenme katsayı değeri azalır.

$50,000 < Re < 1,000,000$  aralığında olan akış rejimleri aerodinamiği düşük Re sayılı aerodinamik olarak adlandırılır (King, 2001). 500,000 altında düşük ve çok düşük Reynolds sayıları uygulama alanları; mikro hava araçları, gaz türbin motorlarının türbin ve kompresör kanatçıkları, insansız hava araçları, deniz taşıtlarının kontrol yüzeyleri, rüzgâr türbinleri, kara taşıtları, kuş ve böcek uçuşları olarak düşünülebilir. Düşük Re sayılı rejimde viskoz kuvvetlerin etkili olması nedeniyle kanat profili yüksek Re sayılı rejimden daha erken tutunma kaybına uğrar.

Yüksek Reynolds sayılarında baskın olamayan viskoz kuvvetler düşük Re sayılarında baskın hale gelir ve istenmeyen sonuçlara sebep olur. Bunların başında laminer ayrılma kabarcığının oluşması gelir. Laminer ayrılma kabarcığının oluşması aerodinamik performansı olumsuz yönde etkilediği gibi, titreşim ve gürültüye neden olur. Yapılan çalışmalarla gösterilmiştir ki laminer ayrılma kabarcığı oluştuğunda açı değişimine göre kaldırma kuvvetinin artış oranı daha az, sürüklemedeki artış da daha fazla olur. Bazı durumlarda ise akım yüzeye yapışmadan kanat yüzeyini terk eder bu durumda ise tutunma kaybı oluşur. Bir akışta, Reynolds sayısının düşük olmasının sebebi, akışın geçtiği kanatların veter uzunluklarının küçük olması, akım hızlarının düşük olması veya bu iki durumun ikisinin de olmasından olabilir. Bazen de yüksek irtifa insansız hava araçlarında olduğu gibi yüksek irtifalarda bulunan düşük hava yoğunluğu ve yüksek kinematik viskoziteye bağlı olarak da düşük Reynolds sayısı elde edilmektedir (Laitone, 2001)

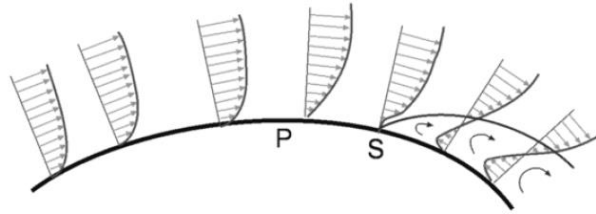
Klasik yaklaşımla sınır tabaka incelenecek olursa, bu tabaka lokal Re sayısının değerine göre üç bölümden oluşur, bunlar; laminer sınır tabaka, türbülansa geçişli sınır tabaka ve türbülanslı sınır tabakadır (Şekil 3.16). Laminer sınır tabaka, akımın düzenli, ayrılmalara karşı kararlı olduğu bölge olup diğer tabakalara göre nispeten daha ince bir tabakadır. Akış kanat üstünde aktıkça, diğer bir ifadeyle lokal Reynolds sayısı arttıkça, türbülansa geçişli sınır tabaka oluşur. Bu bölge laminerden türbülansa geçiş bölgesidir, akışın kararlılığı bozulmaya başladığından dolayı hem laminer hem de türbülanslı sınır tabakanın özelliklerini gösterebilir. Türbülanslı sınır tabakada ise akışın kararlılığı bozulur ve akış düzensizleşir, rastgele yani türbülanslı olarak hareket eder. Türbülanslı bölgede küçük girdaplar oluşup türbülanslı akım ayrılması da bu bölgede yaşanır.



Şekil 3.16. Bir kanat profili üzerinde oluşan sınır tabaka ve iz bölgesi (Genç, 2009)

### 3.3.2. Laminer ayrılma kabarcığı

Düşük Re sayılı akışın sınır tabaka yapısında laminer bölge ile türbülanslı bölge daha detaylı incelediğinde, türbülansa geçişin laminar bölgede ters basınç gradyenlerinin sebep olduğu laminar ayrılmalardan dolayı görülmüştür. Belli bir bölgede viskoz etkilerin baskın olmasından dolayı oluşan ters basınç gradyenlerinin etkisi ile akış aktığı cidardan ayrılır, ayrıldığında laminar yapıya sahip akış, türbülanslı bir yapıya geçmeye başlar, bu bölge geçiş bölgesidir.

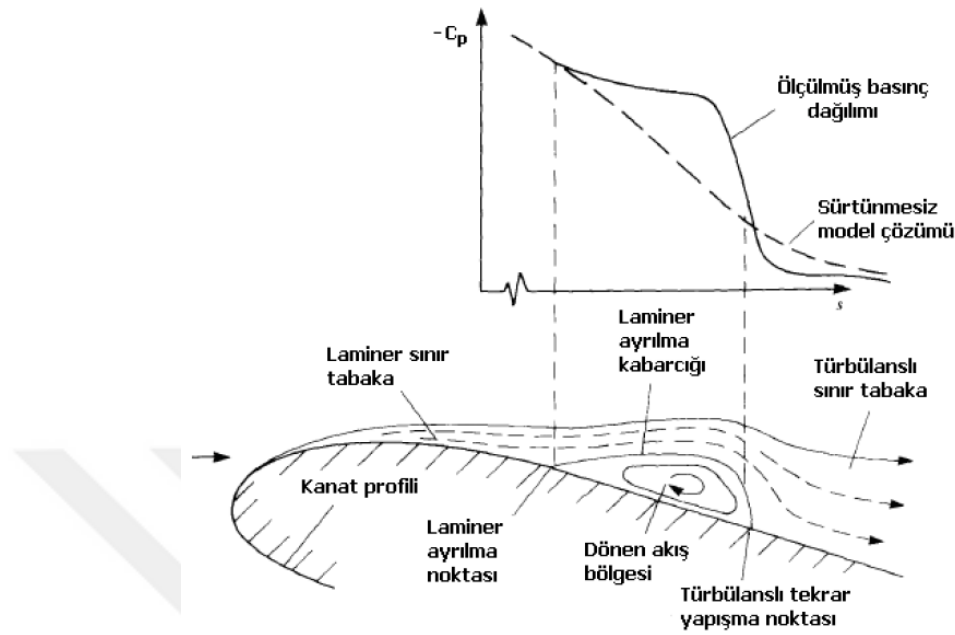


Şekil 3.17. Eğrisel bir yüzey üzerinde hız profilleri (Auld ve ark., 2008)

Türbülansa geçiş ile birlikte enerjisi artan akım yüzeye türbülanslı olarak tekrar tutunur ve tutunduktan sonra türbülanslı bir karakterde akmaya devam eder. Akışın ayrıldığı nokta ayrılma noktası, türbülansa geçtiği nokta, geçiş noktası, tekrar yüzeye yapıştığı nokta ise yeniden yapışma noktası olarak adlandırılır. Şekil 3.17 'de eğrisel bir yüzey üzerinde akan akışın hız dağılımı gösterilmiştir. Akım en baştan P noktasına kadar iyi huylu basınç gradyenine sahiptir ve bu tür laminar profiller ayrılmalara karşı oldukça dirençlidir. Şekil 3.17 dikkatli olarak incelenirse S noktasına kadar cidara yakın kısımlarda hız azalmış ve S noktasından itibaren akışta negatif hızlar ve ters basınç



gradyenleri oluşmuştur bu noktadan itibaren akışta dönmeler ve ayrılmalar olmuştur (Auld ve ark., 2008).

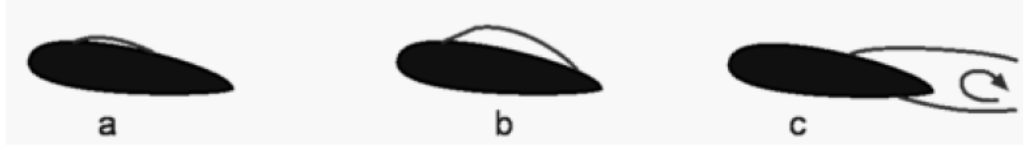


Şekil 3.18. Laminer ayrılma kabarcığı (Katz ve ark., 1991)

Düşük Re sayılı akışlarda hücum kenarından firar kenarına doğru ilerledikçe laminer akım viskoz kuvvetlerin etkisi ile çok çabuk türbülanslı akıma geçmeye başlar. Türbülansa geçiş bölgesinde akım viskoz etkilerin ve ters basınç gradyanlarının üstesinden gelemez ve Şekil 3.19 'da görüldüğü gibi laminer sınır tabaka ayrılması ve ayrılma kabarcığı meydana gelir. Bu kabarcıkta geri akış ve ters hız profilleri oluşur. Türbülansa geçiş bölgesinde akış gelişip türbülanslı olunca da türbülanslı akışın yeterli enerjisi ile yüzeye tekrar tutunur. Yeniden tutunma ile birlikte akış yüzeye yapışır ve türbülanslı ayrılma olana kadar akışa düzgün bir şekilde devam eder. Laminer ayrılma kabarcığının basınç katsayısı üzerindeki etkilere bakıldığında Şekil 3.18 'deki gibi bir dağılım elde edilir. Belirli bir bölgeden sonra grafikte bir kambur oluşmakta ve bu kamburun başlangıcı ayrılmayı, sonu ise yüzeye tekrar yapışmayı göstermektedir. Eğer akım viskoz etkilerden etkilenmemiş veya sürtünmesiz olsaydı kesikli çizgideki gibi lineer bir dağılım elde edilirdi.

Laminer ayrılma kabarcığı daha da detaylı incelendiğinde akış yapışmadan önce bir noktada akışın türbülansa geçtiği gözlemlenir. Türbülansa geçiş noktası, ayrılma kabarcığının boyutu (uzun-kısa) ve tutunma kaybı gibi aerodinamik olaylarla da alakalıdır. Çünkü akış türbülansa ne kadar çabuk geçerse o kadar çabuk yüzeye yapışma

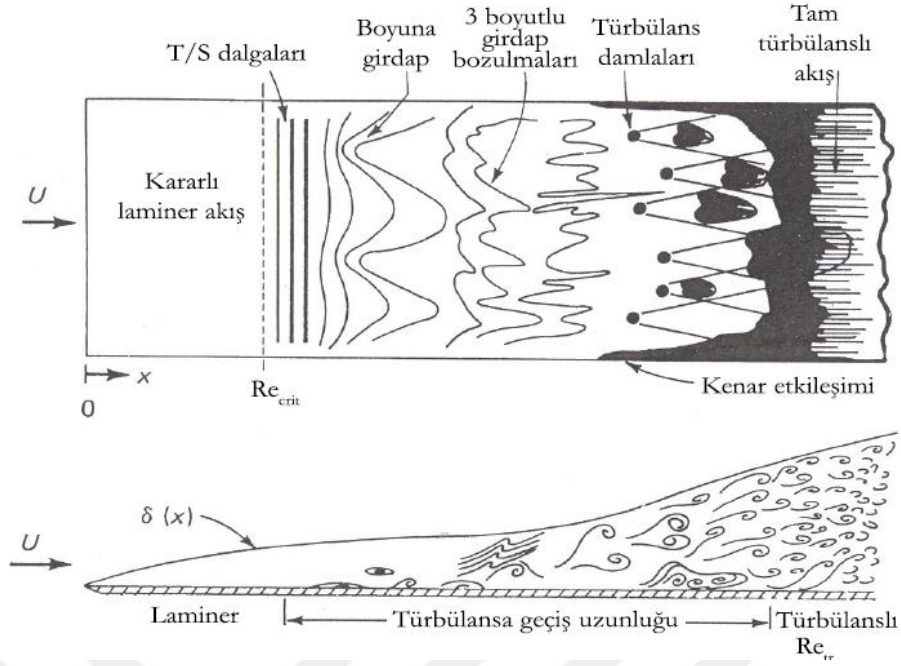
olur bu durumda da performans karakteristikleri de artar. Eğer türbülansa geçiş çok geç olursa yüzeye yapışma noktası da arkada olacağı için büyük kabarcık oluşabileceği gibi akış yüzeye hiç yapışmadan da terk edebilir. Böyle durumlarda tutunma kaybı oluşur (Şekil 3.19).



Şekil 3. 19. Kanat profil etrafında değişik bölgelerde oluşan laminer ayrılmalar (Auld ve ark., 2008)

Viskoz etkilerin baskın olması akımın düzgün ve laminer olmayı bırakıp çalkantılı ve kararsız (türbülanslı) olmaya başlar. Bu kararsızlık türbülansa geçişe sebep olur. Türbülansa geçişi doğal geçiş, atlamalı geçiş ve laminer ayrılmış türbülansa geçiş olarak sınıflandırmak mümkündür (Genç, 2009).

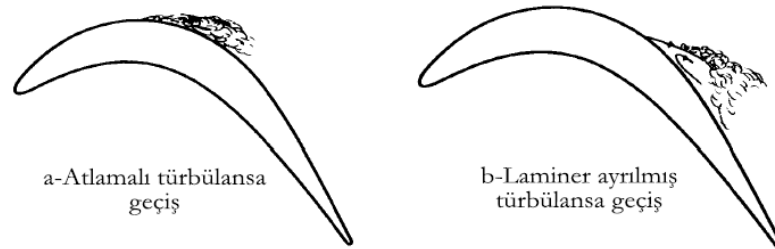
Doğal türbülansa geçiş, Şekil 3.20 'deki gibi olup sınır tabaka nedeniyle meydana gelir. Bu tip geçişler daha serbest akımın türbülansı düşük olduğu zaman olur. Düz levha üzerinde akış ile ilgili Schubauer ve Skramstad'ın (Schubauer ve ark., 1947) yapmış oldukları deneyler düz bir plakanın hücum kenarı mesafesine bağlı yerel  $Re$  sayısı ( $Re_x$ )  $2.8 \times 10^6$  'dan az olduğunda sınır tabakanın laminer,  $Re_x$ ,  $3.9 \times 10^6$  'dan büyük olduğunda ise tam türbülanslı yapıda olduğunu göstermiştir. Arada kalan bölge ise ne tam laminer ne de tam türbülanslı bir özelliğe sahip türbülansa geçiş bölgesi olarak nitelendirilmiştir. Düz plaka üstünde doğal türbülansa geçiş Şekil 3.20 'deki gibi anlatılır. Serbest akış, levha üstünden belli bir bölgeye kadar laminer olarak devam eder, yerel  $Re$  sayısı kritik bir değere ulaştığında akışta T/S (Tollmien /Schlichting) dalgaları oluşur ve akıştaki kararlılık bozulmaya başlar, T/S dalgalarından sonra ise boylamasına girdaplar oluşur, aşağı akım yönünde girdaplar 3 boyutlu dağılır, bozulmuş girdapçıklar türbülans damlacıklarına, türbülans damlacıkları da birleşerek tam türbülansa neden olur.



Şekil 3. 20. Düz levha üzerindeki akışta doğal türbülansa geçiş (Genç, 2009; White, 1991)

Bir başka tip türbülansa geçiş, atlamalı (bypass) türbülansa geçiş olarak adlandırılır. Bu tür geçişte serbest akış, direk türbülansa geçebilecek kadar türbülans şiddetine sahip olduğu ve akışın doğal geçişte olduğu gibi T/S dalgaları, boylamasına girdaplar ve girdap dağılımları olmadan direk türbülans damlacıklarına daha sonra ise tam türbülansa geçer. Bu tip geçişler gaz türbinli motorların kompresör ve türbin kanatçıklarında görülebilir.

Üçüncü tip olan ayrılmış türbülansa geçişte ise Şekil 3.21 'de gösterildiği gibi laminer ayrılma içerisinde olan türbülansa geçiştir. Viskoz etkilerden dolayı oluşan ters basınç gradyanlarından dolayı yüzeyden ayrılan akışta oluşan girdapçıklar nedeniyle akış türbülansa geçer ve türbülanslı akış yüzeye tekrar tutunur. Düşük Re sayılarında daha çok bu tür geçiş olur.



Şekil 3. 21. Atlamalı ve laminer ayrılmış türbülansa geçişler (Genç, 2009; Süzen, 2005)

### 3.4. HAD İle Kanat Profili Analizi

#### 3.4.1. Hesaplamalı yaklaşımlara bakış (Ansys, 2015)

Türbülanslı akışların hesaplanması için üç temel bakış bulunmaktadır; DNS(Direct Numerical Simulation), LES (Large Eddy Simulation) ve RANS (Reynolds Averaged Navier- Stokes Simulation) hesaplama yaklaşımları bulunmaktadır. Bu tezde HAD yöntemi ile RANS hesaplama yaklaşımı esas alınarak çözümlenmelerde bulunuldu.

- RANS (Reynolds Averaged Navier- Stokes Simulation):
  - Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes Simülasyonu zaman ortalamalı Navier- Stokes eşitlikleri ile çözülür.
  - Çözümleme için modelleme yapılması gerekmektedir.
  - Birçok problemin çözümünde kullanılır.
  - Endüstriyel çözümlenmelerde en yaygın kullanılan yaklaşımdır.

#### 3.4.2. RANS hesaplamalı yaklaşımın çözümleme modelleri

Deney olanaklarının kısıtlı, zaman ve maliyet bakımından çok pahalı olmasından dolayı, son yıllarda aerodinamik çalışmaların hesaplamalı aerodinamik çerçevesinde sayısal olarak incelenmesini güçlü bir seçenek olarak ortaya çıkarmıştır. Günümüzde hızlı bilgisayar teknolojisinin artması ile araştırma kurumları ve endüstrinin hemen hemen tüm kesimlerinde, akış problemlerinin incelenmesinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çok yaygın kullanılır hale gelmiştir. HAD çalışmalarından elde edilen en önemli sonuçlardan birisi, bir tasarım yapılmadan önce bilgisayar benzeşimi aracılığıyla elde edilen veriler yardımıyla verim artırma yöntemleri ve tasarıma yönelik bir takım problemlerin deney aşamasına gelmeden önce rahatlıkla çözülebilmesidir. HAD ile yapılan çalışmalar daha az maliyetli ve daha farklı düşünceler geliştirebilme yönünde büyük katkılar sağladığı için tercih edilmektedir. Yapılan çalışmalar esnasında ayrıntılı ve birleşik geometri içerisindeki değişiklikler daha kolay ve daha hızlı şekilde yapılabilmektedir. Günümüzde akışkanlar mekaniği ve aerodinamik alanında en çok kullanılan yazılımlar, Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri ile sonlu hacimler metodu kullanarak benzeşim yapan genel amaçlı HAD programlarıdır. Akış hesabı, ısı ve kütle transferi, kimyasal reaksiyonlar ve benzeri konularda tasarım ve benzeşim yapmaktadır.

Bu hesaplamalı yaklaşımın problemin özelliklerine göre geliştirmiş olduğu bir çok türbülans çözümleme modelleri bulunmaktadır. Çözümleme modelleri arasından iki denklemlilik model olan  $k-\omega$  ve  $k-\epsilon$  modelleri kullanılmıştır.

Problemlerin yapısının çok değışiklik göstermesi nedeniyle her problem için uygun tek bir türbülans modeli bulunmamaktadır. Türbülans modeli seçiminde, akışın fiziksel durumu, istenilen doğruluk seviyesi, model için gerekli olan değerlerin hesaplanabilirliği ve simülasyon için gereken zaman dikkate alınmaktadır (Ansys, 2007).

### 3.4.3. RANS denklemleri

Bir kanat profili çevresinde meydana gelen  $C_L$ ,  $C_D$  ve  $C_M$  aerodinamik katsayı değerleri deneylerle, teorik olarak veya HAD analizleri ile hesaplanabilmektedir. Teorik hesaplamalarda kabullenmeler yapılır. Bu sebeple teorik olarak elde edilen sonuçlar net olmayabilirler. Rüzgâr tünellerinde yapılan deneysel çalışmalarda daha güvenilir sonuçlar elde edilmekte ancak akış ayrılmasının olduğu tutunma kaybı durumlarında güvenilirlik azalmaktadır. Ayrıca rüzgâr tünellerinde çok fazla değışik hücum açılarında bu katsayı değerlerini bulmak hem çok zaman alıcı hem de daha masraflı olmaktadır. Son zamanlarda daha da gelişen ve güvenilirliği artan HAD gibi bilgisayar paket programları ile kanat kesit etrafındaki akışla oluşan kuvvetleri ve aerodinamik katsayılarını elde etmek daha az zaman alıcı ve daha güvenilir olmaktadır. Dış akış analizlerinde, cisim etrafındaki akışta oluşan hız ve basınç değışimleri hesaplanır. Bu hesaplar için, akışın matematiksel modeli olan Reynolds ortalamalı Navier Stokes denklemlerinin sayısal olarak çözüldüğü bir bilgisayar paket programı olan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılır. HAD analizinde akış fiziğinin, hücre oluşturma sisteminin, türbülans model seçiminin ne kadar doğru yapıldığı elde edilecek sonuçların güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. İki boyutlu Navier Stokes denklemleri, bir süreklilik ve iki momentum korunum denklemlerinden oluşur. Türbülans ve sıkıştırılmaz akışlarda, bu korunum denklemlerine türbülans etkisini hesaba katan ilave denklemler ortaya çıkar. Bu denklemler şunlardır (Anderson, 1995):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.14)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'v'}) \quad (3.15)$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{u'v'}) \quad (3.16)$$

Bu denklemlerde yer alan  $u$  ve  $v$  sırasıyla  $x$  ve  $y$  doğrultusundaki hız bileşenlerini,  $p$  basıncı,  $\mu$  dinamik viskoziteyi,  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu,  $\tau$  türbülans kayma gerilmesini ve  $u'$  ve  $v'$  yatay ve düşey türbülans hız sapmalarını temsil etmektedir. Denklemlerde yer alan türbülans kayma gerilmesi aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$-\rho \overline{u'v'} = \eta \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.17)$$

Denklemlerde görülen  $\eta$  terimi, türbülans viskozitesi olarak adlandırılmaktadır ve  $\eta$  nin belirlenmesi için farklı türbülans modelleri geliştirilmiştir. Farklı fiziksel durumlara ve yorumlara göre geliştirilen farklı türbülans modelleri söz konusudur. Türbülans modellerinin en çok kullanılanları, Spalart Allmaras,  $k$ - $\epsilon$ ,  $k$ - $\omega$  modelleridir. Tüm akışlar için en iyi olan belli bir türbülans modeli yoktur. Akış fiziğine uygun türbülans modeli kullanılmalı, gerekirse aynı akış için farklı modeller kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalıdır.

### 3.4.3.1. Türbülans benzeşim modelleri

Bütün akış problemlerini kapsayacak yüksek kapasitede ortak bir modelin henüz uygulamada olmadığı bir gerçektir. Türbülans modelinin seçimi akışı çevreleyen ortamın fiziği, belirli bir sınıftaki problem için esas alınan uygulama, uygulama için aranan doğruluk seviyesi, uygun hesaplama kaynakları ve benzeşim için uygun olan zamanın miktarı gibi özelliklere bağlıdır. Bunun yanı sıra ele alınan uygulama için en uygun türbülans modelinin seçimi için de değişik türbülans modellerinin özelliklerini ve sınırlamalarını bilmek gerekmektedir.

En genel anlamda akışkan hareketleri, süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri ile tanımlanır. Bu denklemlerin çeşitli kabuller yapılmadan analitik veya sayısal olarak çözümü günümüzde çok zordur. Ancak akış değişkenleri değişik formlarda

basitleştirilerek çözülmeye çalışılır. Örneğin Navier-Stokes denklemleri zaman ortalamalı Navier-Stokes denklemlerine dönüştürülür ve bu denklemler RANS denklemleri olarak tanımlanır. Hareket denklemlerinin zaman ortalamasının alınması karşımıza yeni bilinmeyenler çıkarmaktadır. Bu ek terimler türbülanslı gerilmelerdir. Bu terimlerin ana akış değişkenleri cinsinden ifade edilmeleri gerekmektedir. Bu olaya türbülans benzeşimi denir. Türbülans benzeşimi karşımıza yeni kabuller ve yaklaşımlar getirmektedir.

Bu çalışmada türbülans modeli olarak k-ε türbülans benzeşim modeli ve SST k-ω türbülans benzeşim modelleri kullanılmıştır. k-ε türbülans benzeşim modeli türetilen ve orijinal NACA 4415 kanatların 3D analizlerinde kullanılmıştır. SST k-ω türbülans benzeşim modeli ise türetilen ve orijinal NACA 4415 kanat profillerinin 2D analizlerinde kullanılmıştır.

### 3.4.3.1.1. k-ε türbülans modeli

Türbülans modelin basit biçimi olan bu modelde iki farklı transport denklemi vardır. k-ε model, türbülans kinetik enerjisi ve dağılımı nedeniyle transport denklemlerine dayanan yarı-deneysel bir modeldir. k-ε modelinin performansını arttırmak için yeni modeller geliştirilmiştir. Parametrik çalışmalarda ve başlangıç itersyonlarda kullanımı uygundur.

#### k-ε Modeli denklemleri;

k-ε modelinde iki yeni denklem, korunum eşitliklerine eklenmiştir. Bu eşitlikler, ortalama hız değişiminin ve kaldırma (bouyance) kuvvetinin oluşturduğu türbülans kinetik enerjisi ve bütün yayılma oranlarında sıkıştırılabilir türbülans genişleyen çalkantıların katkısını dikkate alır. Türbülans kinetik enerji, k, ve onun dağılım oranı, ε, aşağıdaki transport denklemlerinden hesaplanmıştır:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{1\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.19)$$

Bu denklemlerde,  $G_k$  ortalama hızdaki değişimin neden olduğu türbülans kinetik enerji üretimini,  $G_b$  kaldırma (bouyance) kuvvetinin neden olduğu türbülans kinetik enerji üretimini,  $Y_M$  sıkışabilen türbülans çalkantılardaki genişlemenin bütün yayılmaya etkisini göstermektedir. Bu denklemler deneysel ve matematiksel hesaplamaların birleştirilmesi ile meydana gelmiştir.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$  sabitlerdir.  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$  sırasıyla,  $k$  ve  $\varepsilon$  için türbülans Prandtl sayıdır. Türbülans viskozitesi  $\mu_t$ , aşağıdaki denklemden hesaplanır (Ansys,2012).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.20)$$

Burada  $C_\mu$  bir sabiti göstermektedir. Model sabitleri  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$ ,  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$  tipik değerleri aşağıda verilmiştir:

$$X_{1\varepsilon} = 1.44, X_{2\varepsilon} = 1.92, X_{3\varepsilon} = 0.09, X_\mu = 0.09, \sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_k = 1 \quad (3.21)$$

Bu değerler türbülanslı akışta hava ve su ile yapılan deneylerden elde edilmiştir. Model sabitlerin bu değerleri standart olmasına rağmen her biri geniş çapta kabul edilebilir, onlar gerekirse sayısal akışkan dinamiği programında değiştirilebilir.  $G_k$  terimi türbülans kinetik enerji üretimini gösterir. Bu terim standart, RNG, ve realizable  $k$ - $\varepsilon$  modelleri için hemen hemen aynı olarak modellenmiştir.  $k$  için bu terim şöyle tanımlanır:

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.22)$$

$G_k$  değeri Boussines hipotezi ile aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (3.23)$$

Burada  $S$  ortalama gerilme oranıdır:

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3.24)$$



Yüksek Reynolds sayısı kullanıldığı zaman  $\mu_t$  'nin yerine  $\mu_{eff}$  kullanılır. Kaldırma kuvvetinden kaynaklanan türbülans üretimi  $G_b$  aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3.25)$$

Burada  $Pr_t$  enerji için türbülans Prandtl sayısıdır ve  $g_i$ ,  $i$  yönündeki yerçekimi ivmesidir.  $k-\epsilon$  modeli için  $Pr_t$  değeri 0.85'dir. Termal yayılma katsayısı,  $\beta$ , aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (3.26)$$

Denklem (3.27) ideal gazlar için denklem (3.29) 'a indirgenir.

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (3.27)$$

#### 3.4.3.1.2. SST $k-\omega$ türbülans modeli

HAD yöntemi ile çözüm yapan birçok yazılımda iki çeşit  $k-\omega$  modeli vardır ve bunlar Standart ve SST  $k-\omega$  modelleridir. Standart  $k-\omega$  modeli, düşük Re sayısının, sıkıştırılabilirliğin ve kaymalı akışların yayılım etkisini içeren Wilcox'un  $k-\omega$  modelidir. Bu model, türbülanslı kinetik enerji,  $k$  ve yayılma oranı  $\omega$  'ya bağlı ampirik bir modeldir. HAD yöntemi ile çözüm yapan yazılımlarda Wilcox  $k-\omega$  modeli ise Menter'in SST (Shear-Stress Transport) yaklaşımı ile düzenlenerek SST  $k-\omega$  modeli oluşturulmuştur. Standart ve SST  $k-\omega$  türbülans benzeşim modellerinin taşınım denklemleri benzerdir. SST modelinin standart modelden farkı (Wilcox, 1998; Menter, 1994)

- Sınır tabakanın iç bölgesinde standart  $k-\omega$ 'dan sınır tabakanın, dış bölgesinde ise yüksek Re sayılı akış için olan  $k-\epsilon$  modeline yavaş yavaş geçiş yapar.
- Asal türbülans kayma gerilmesinin taşınım etkilerini hesaba katmak için türbülans viskozite denklemi düzeltilmiştir.

SST  $k-\omega$  türbülans modeli, Menter tarafından serbest akım içerisinde  $k-\epsilon$  modelinin serbest akım bağımsızlığı ile duvar yakınında  $k-\omega$  modelinin doğru ve sağlam

formülasyonu etkili olarak harmanlamak için geliştirilmiştir (Genç, 2009; Anderson, 1995; Menter, 1994)

### ***k- ω* türbülans modeli denklemleri;**

Akış bölgesi için iki denklemlilik türbülans modeli Kolmogorov (1942) tarafından önerilmiştir. Bu türbülans modelinde iki parametre bulunmaktadır; birincisi türbülans kinetik enerjisi (*k*) olarak oluşturulmuş. İkincisi ise, birim türbülans kinetik enerjisi için yayılma (*ω*) olarak oluşturulmuştur. *k- ω* türbülans modeli için temel eşitlikler aşağıda verilmiştir ( Wilcox, 1998).

Buna göre, girdap viskozitesi,

$$\mu_T = \frac{\rho k}{\omega} \quad (3.28)$$

Türbülans kinetik enerjisi,

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.29)$$

Özgül yayılma oranı,

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (3.30)$$

Bu ifadede yer alan kapalılık katsayıları,

$$\alpha=5/9, \quad \beta=3/40, \quad \beta^*=9/100, \quad \sigma=1/2, \quad \sigma^*=1/2 \quad (3.31)$$

Olarak verilmiştir. Bunun yanında harici denklemler,

$$\varepsilon = \beta^* \omega k \quad (3.32)$$

Olarak tanımlıdır.

#### **4. KÜT FİRAR KENARLI KANAT PROFİLİNİN ELDE EDİLMESİ**

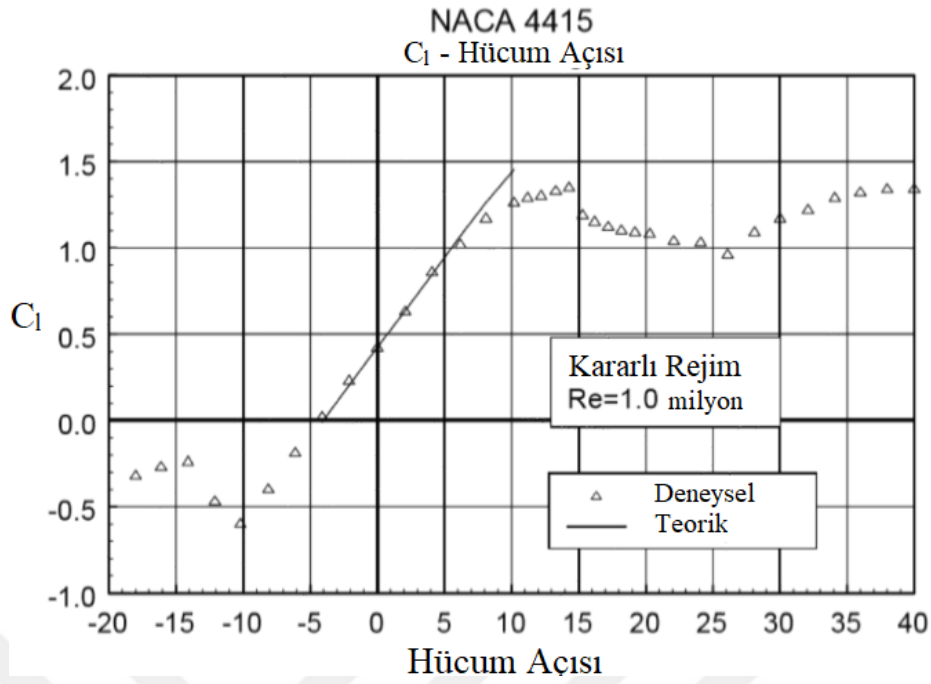
Bu çalışmada NACA 4415 kanat profili esas alınarak, kanat profilinin aerodinamik performansını artırmaya yönelik olarak profilin üst çizgisi, alt çizgisi ve her iki çizgi aynı anda kalınlaştırılarak bazı profiller elde edilmiştir. Bu küt firar kenarlı kanat profilin eldesinde QBlade programı kullanılmıştır.

##### **4.1. NACA 4415 Kanat Profili Üzerindeki Akışın QBlade Programı İle Doğrulanması**

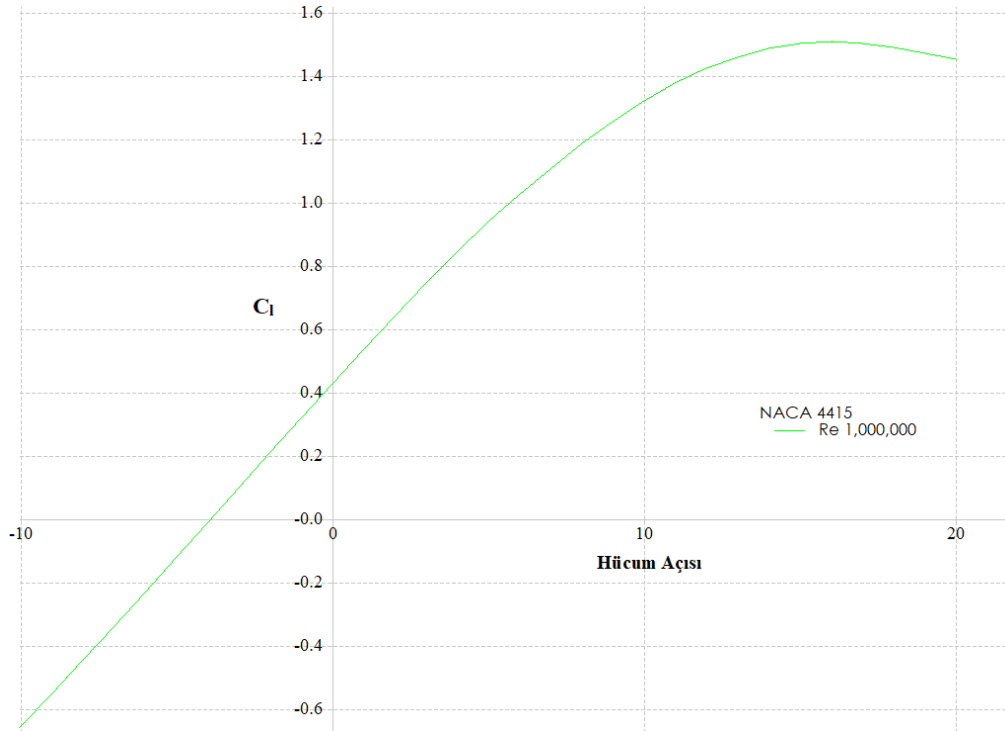
Her şeyden önce QBlade programı ile NACA 4415 kanat profilinin doğru sonuçlar verip vermediği araştırılmıştır. Bu bölümde daha önce “The Ohio State University” ve “University of Glasgow” kurumları tarafından NACA 4415 kanat profili üzerine yapılmış olan deneysel ve teorik çalışmalar incelenmiştir.

Yapılmış olan bu çalışmadaki şartlar, QBlade programında NACA 4415 kanat profili için uygulanarak yapılan çalışmaların; QBlade programı ile de benzer sonuçlar alınıp alınmadığı incelenmiştir.

Şekil 4.1 ‘de “The Ohio State University” nin hazırlamış olduğu çalışmada farklı hücum açılarında ve farklı Re sayılarında deneysel ve teorik çalışmalar verilmiştir. Bu çalışmalar incelenmiş olup NACA 4415 kanat profili bu şartlarda Qblade programı ile analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizin sonuçları Şekil 4.2 ‘de verilmiştir.



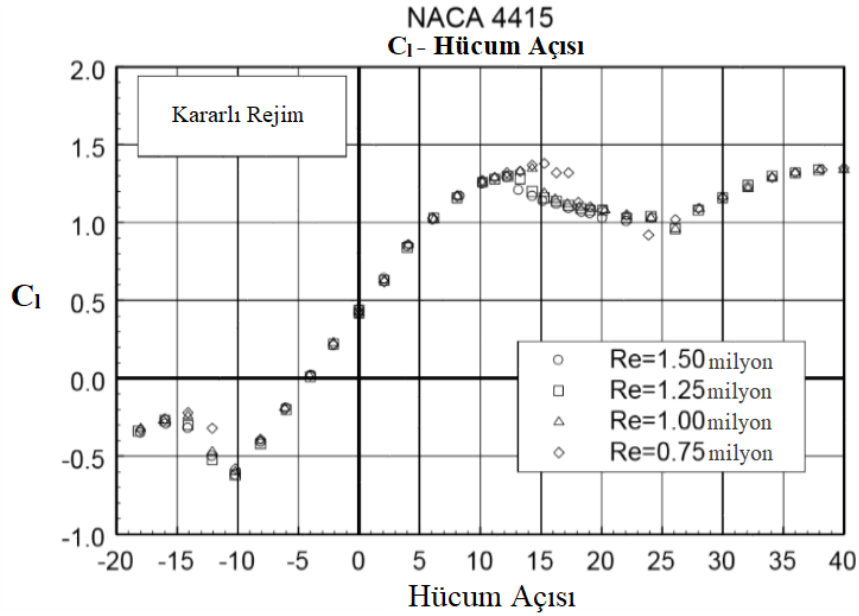
**Şekil 4. 1.** NACA 4415 kanat profilinin  $Re=1,000,000$  de teorik ve deneysel olarak incelenmesi (Hoffmann ve ark., 1996)



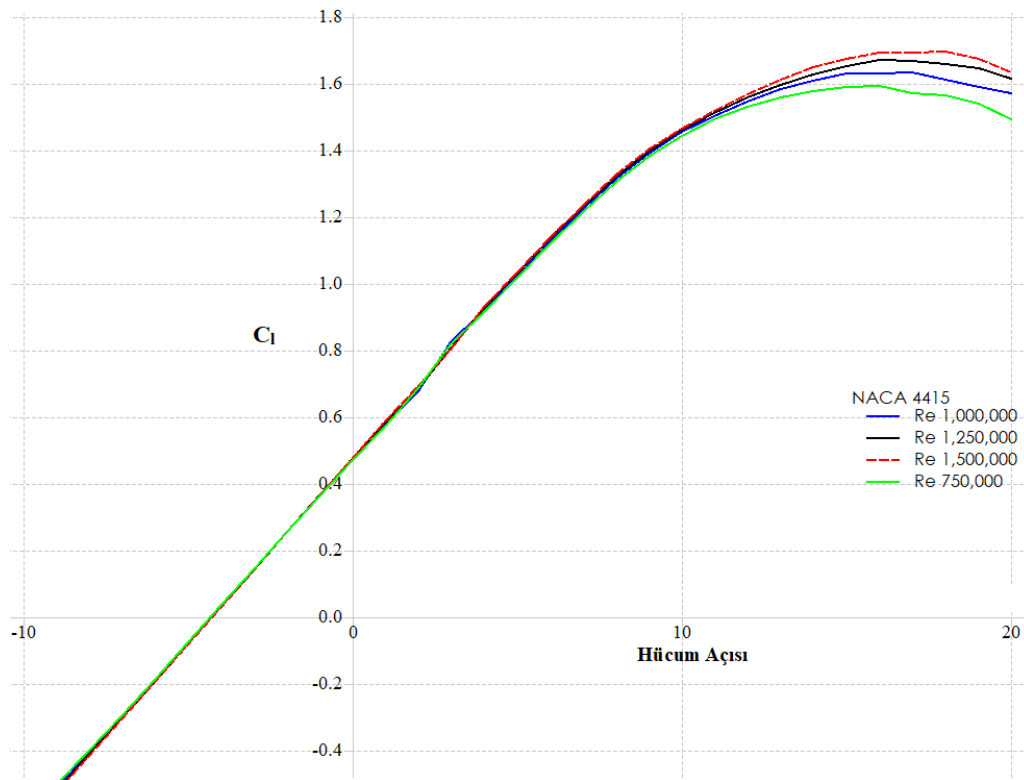
**Şekil 4. 2.** NACA 4415 kanat profilinin Qblade ile  $Re=1,000,000$  de analizi

$Re=1,000,000$  sayısında yapılmış olan deneysel, teorik ve Qblade programı ile gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde;  $10^\circ$  hücüm açısına kadar  $C_l$  değerlerinin yaklaşık 1.3 olarak çıktığı görülmüştür. Bu noktadan sonra deneysel sonuçların düştüğü

görülürken, Qbalde programı ile yapılmış olan analiz sonuçlarına göre değerler yaklaşık  $15^\circ$  'ye kadar 1.5 'e kadar yükselmektedir. Deneysel sonuçlarda ise  $15^\circ$  'ye kadar 1.4 'e kadar yükselmiş ve sonradan düşüşe geçtiği görülmektedir.



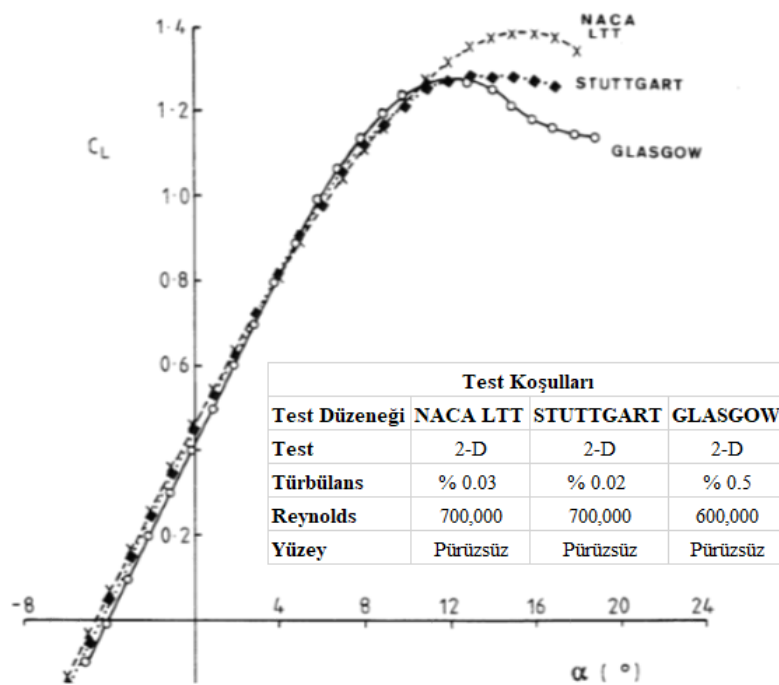
**Şekil 4. 3.** NACA 4415 kanat profilinin farklı Re sayılarında deneysel olarak incelenmesi (Hoffmann ve ark., 1996)



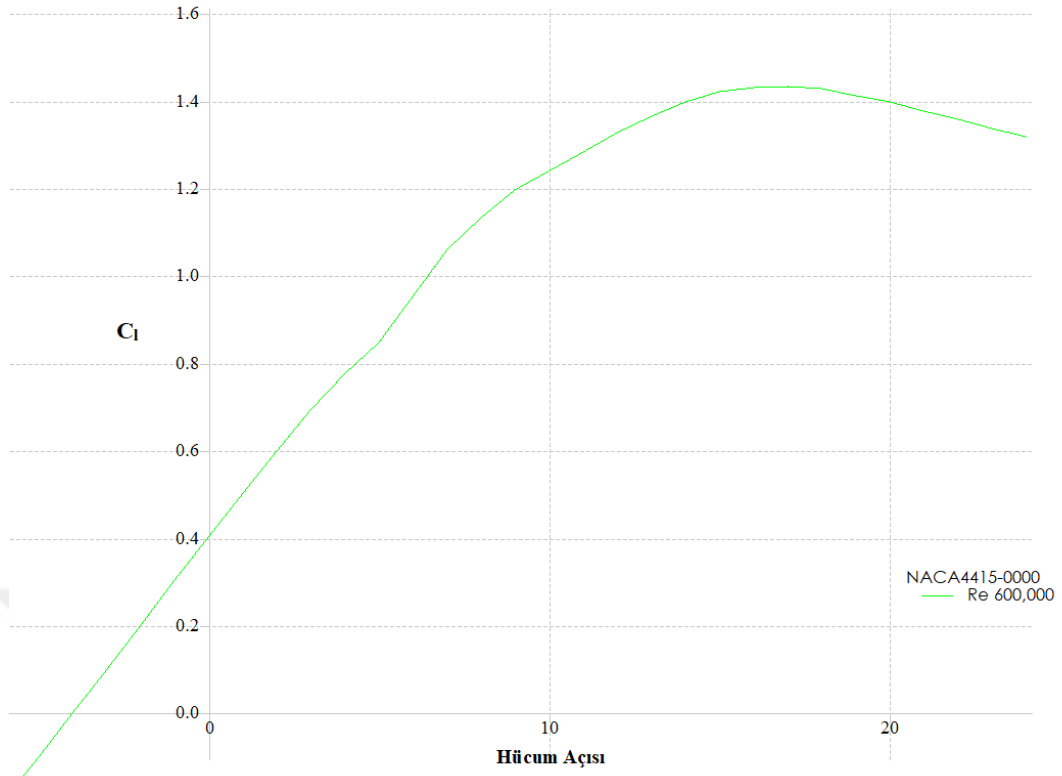
**Şekil 4. 4.** NACA 4415 kanat profilinin farklı Re sayılarında Qblade ile analizi

Yine “The Ohio State University” tarafından farklı Re sayılarında yapılmış olan deneysel çalışma ile Qbalde programı ile gerçekleştirilmiş olan analiz sonuçları kıyaslandığında; değerlerin hücum açısı  $10^\circ$  'ye kadar benzer durumda olduğu, bu noktada sonra deneysel değerlerde düşüş gözlemlenirken Qbalde analiz sonuçlarının bir miktar daha yükseldiği görülmektedir.

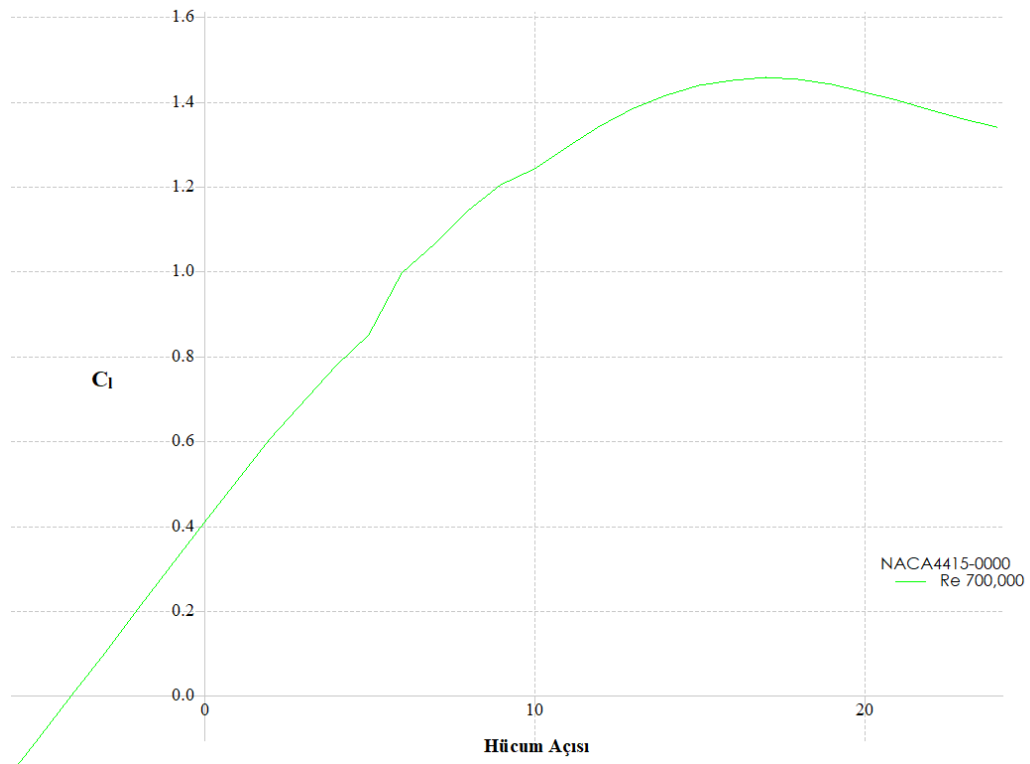
Şekil 4.5 'de “ University of Glasgow” un yapmış olduğu çalışmada farklı hücum açılarında ve iki farklı Re sayısında deneysel çalışmalar verilmiştir. Bu çalışmalar incelenmiş olup NACA 4415 kanat profili bu şartlarda Qblade programı ile analiz edilmiştir. Bu analiz sonuçları da Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 'de verilmiştir.



Şekil 4. 5. NACA 4415 kanat profilinin  $Re=700,000-600,000$  sayılarında deneysel olarak incelenmesi (Saliveros, 1988)



Şekil 4. 6. NACA 4415 kanat profilinin  $Re=600,000$  için Qblade ile analizi



Şekil 4. 7. NACA 4415 kanat profilinin  $Re=700,000$  için Qblade ile analizi

Re=700,000-600,000 sayılarında yapılmış olan deneysel çalışmalar ile Qblade analiz sonuçları kıyaslandığında; 10° hücum açısına kadar  $C_1$  değerlerinin yaklaşık 1.15 olarak benzer olduğu görülmüştür. Hücum açısı 12° olduğunda deneysel  $C_1$  sonuçlarının yaklaşık 1.3 olduğu ve sonrasında düşüşe geçtiği görülmüştür. Qblade analiz sonuçlarına göre 15° 'de Re=600,000 iken  $C_1$  değerlerinin yaklaşık olarak 14.1 ve Re=700,000 iken  $C_1$  değerlerinin yaklaşık olarak 14.4 olduğu görülmüştür. Deneysel NACA LTT sonuçlarına göre 15° 'de  $C_1$  değeri yaklaşık olarak 13.9 olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak deneysel çalışmalar ile Qblade programı sonuçlarının yaklaşık olduğu görülmüş olup Qblade programı ile yapılan analiz sonuçları doğrulanmıştır.

#### **4.2. Küt Firar Kenarlı Kanat Profilinin QBlade Programı İle Elde Edilmesi**

NACA 4415 kanat profili için optimum firar kenarı kalınlık oranını ve bu kalınlığın nerede olacağını bulmak için birden fazla simetrik(hem alt çizgi gem de üst çizgi), alt çizgi ve üst çizgi kalınlık oranları denenmiştir. Qblade programı ile analiz edilen türetilmiş kanat profilleri;

- Simetrik Kanat Profilleri: Veter çizgisinin hem üst tarafında hem de alt tarafında eşit olacak şekilde toplamda % 1, % 2, % 4, % 7 ve % 10 oranlarında firar kenarında kalınlaştırmalar gerçekleştirilmiştir.
- Alt Kanat Profilleri: Veter çizgisinin alt tarafında kalacak şekilde alt çizgide % 0.5, % 1, % 2, % 3.5, % 4 ve % 5 oranlarında firar kenarında kalınlaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Üst çizgide herhangi bir işlem yapılmadan orijinal olarak bırakılmıştır.
- Üst Kanat Profilleri: Veter çizgisinin üst tarafında kalacak şekilde üst çizgide % 0.5, % 1, % 2, % 3.5, % 4 ve % 5 oranlarında firar kenarında kalınlaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Alt çizgide herhangi bir işlem yapılmadan orijinal olarak bırakılmıştır.

Çizelge 4.1 'de türetilmiş kanat profillerinin açıklamaları verilmiştir. Kanat profillerinin firar kenarında yapılmış olan kalınlaştırma oranları verilmiştir. Kalınlaştırma oranları; firar kenarı uzunluğunun veter uzunluğuna oranı olarak ifade edilmiştir.

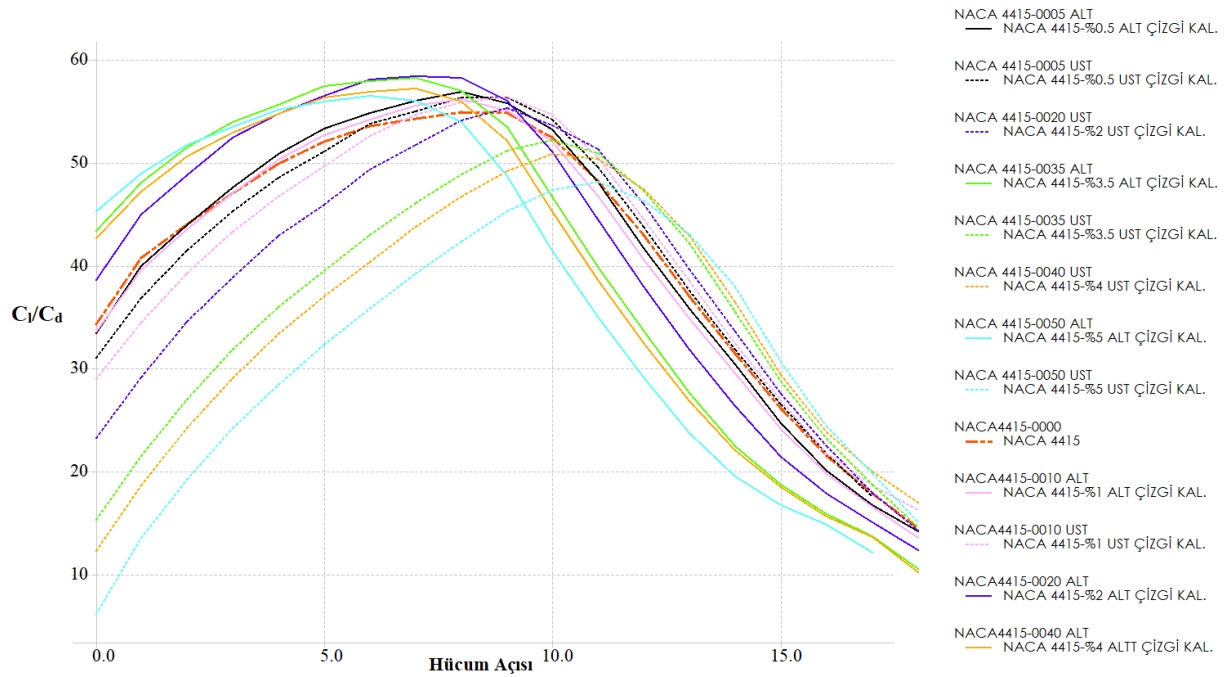


**Çizelge 4. 1** Türetilmiş kanat profillerinin isimlendirilmesi

<b>Türetilmiş Kanat Profili Kodu</b>	<b>Profil Kodu Açıklaması</b>
NACA 4415-000 NACA 4415	Orijinal NACA 4415 Profil
NACA 4415-0005 ALT NACA 4415-%0.5 Alt Çizgide Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının alt çizgisinde %0.5 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0005 ÜST NACA 4415-%0.5 Üst Çizgide Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının üst çizgisinde %0.5 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0020 ÜST NACA 4415-%2 Üst Çizgide Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının üst çizgisinde %2 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0035 ALT NACA 4415-%3.5 Alt Çizgide Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının alt çizgisinde %3.5 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0035 ÜST NACA 4415-%3.5 Üst Çizgide Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının üst çizgisinde %3.5 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0040 ÜST NACA 4415-%4 Üst Çizgide Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının üst çizgisinde %4 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0050 ALT NACA 4415-%5 Alt Çizgide Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının alt çizgisinde %5 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0050 ÜST NACA 4415-%5 Üst Çizgide Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının üst çizgisinde %5 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0010 ALT NACA 4415-%1 Alt Çizgide Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının alt çizgisinde %1 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0010 ÜST NACA 4415-%1 Üst Çizgide Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının üst çizgisinde %1 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0020 ALT NACA 4415-%2 Alt Çizgide Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının alt çizgisinde %2 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0040 ALT NACA 4415-%4 Alt Çizgide Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının alt çizgisinde %4 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0010 NACA 4415-%1 Simetrik Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının alt ve üst çizgisinde toplam %1 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0020 NACA 4415-%2 Simetrik Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının alt ve üst çizgisinde toplam %2 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0040 NACA 4415-%4 Simetrik Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının alt ve üst çizgisinde toplam %4 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0070 NACA 4415-%7 Simetrik Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının alt ve üst çizgisinde toplam %7 kalınlaştırma yapılmıştır
NACA 4415-0100 NACA 4415-%10 Simetrik Kalınlaştırma	Orijinal profile veter hattının alt ve üst çizgisinde toplam %10 kalınlaştırma yapılmıştır

NACA 4415 orijinal kanat profili ve yukarıda belirtilmiş olan kanat profilleri QBlade programı ile 124,000 Re sayısında analiz edilmiş; kaldırma kuvveti katsayısı,

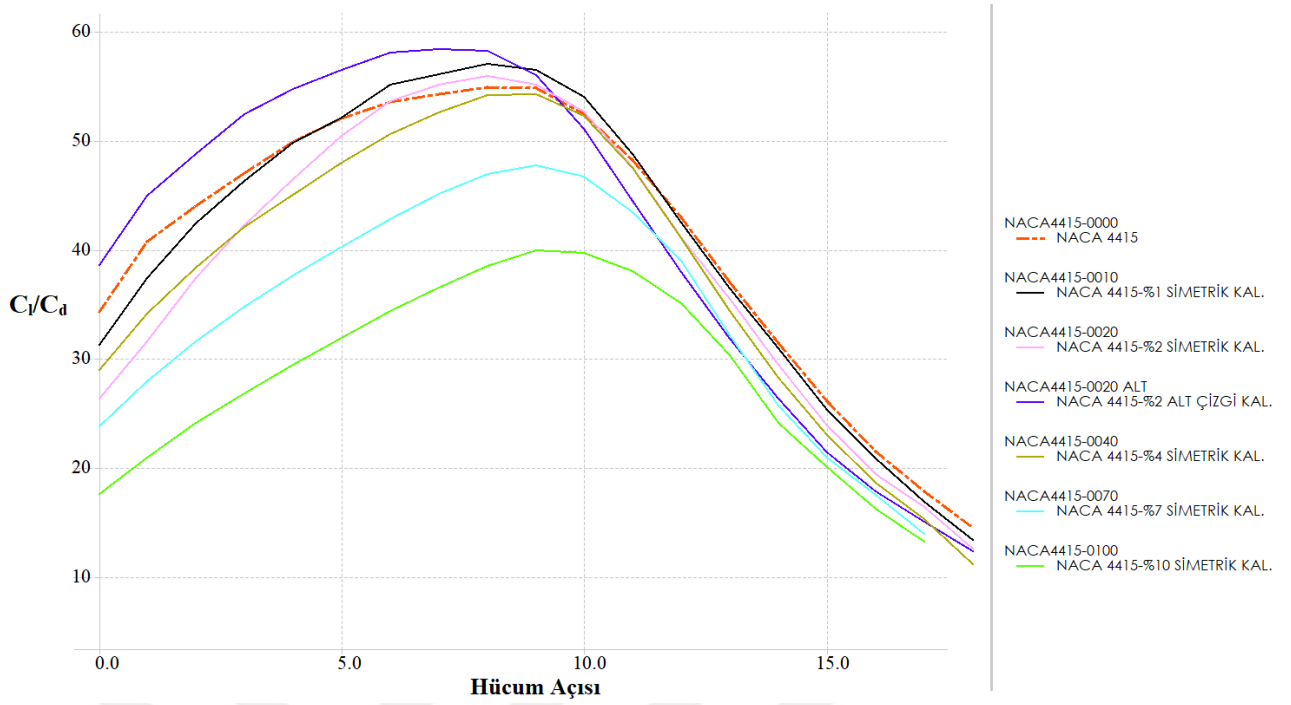
sürüklenme kuvveti katsayısı ve bunların oranları kıyaslanmıştır. Optimum küt firar kenarlı kanat profiline karar verilirken  $C_l / C_d$  oranı dikkate alınmıştır.



Şekil 4.8. NACA 4415, üst çizgiden ve alt çizgiden kalınlaştırılmış küt firar kenarlı kanat profillerinin kıyaslanması

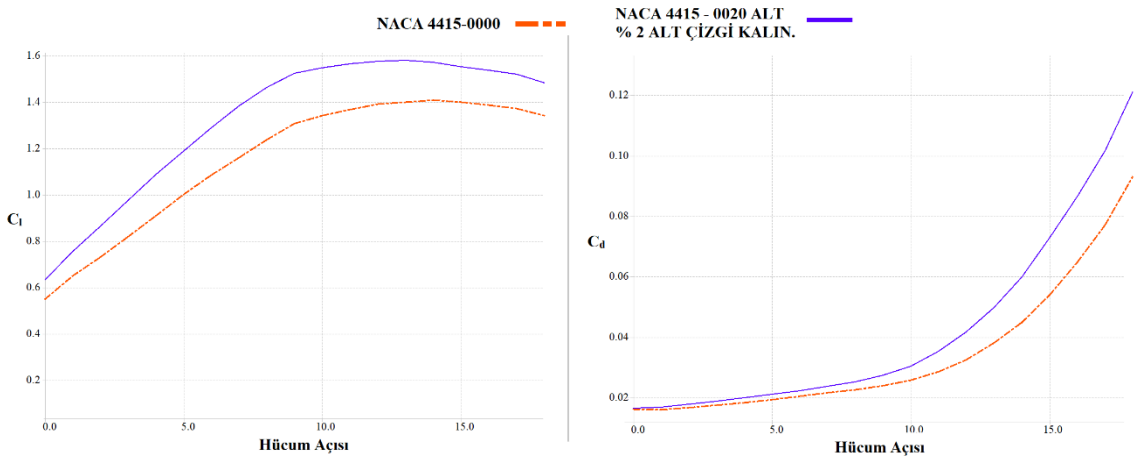
Şekil 4.8 'de sonuçları verilmiş olan ve gerçekleştirilen analizde kırmızı renkli merkez çizgisi olarak gösterilen orijinal NACA 4415 kanat profiline veter çizgisinin üstünde kalan küt firar kenarlı kanat profilleri ile çizginin altında kalan küt firar kenarlı kanat profillerinin ortasında olduğu görülmektedir. Grafikten de görüldüğü üzere sadece veter çizgisinin üst tarafındaki çizgide kalınlaştırılma yapıp alt tarafındaki çizgi orijinal bırakıldığında  $C_l/C_d$  oranı orijinal NACA 4415 kanat profilinden daha düşük olduğu görülmektedir. Aynı şekilde veter çizgisinin alt tarafında kalan çizgi belirlenmiş olan oranlarda kalınlaştırıldığında; bütün türetilmiş profillerin  $C_l/C_d$  oranlarının orijinal NACA 4415 kanat profilinden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 4.8 'e göre  $C_l/C_d$  oranı en yüksek profil, firar kenarı veter çizgisinin altında kalacak şekilde % 2 oranında kalınlaştırılmış olan profildir.  $C_l/C_d$  oranı en düşük profil de veter çizgisinin üstünde kalacak şekilde firar kenarı % 0.5 oranında kalınlaştırılmış olan profildir.



Şekil 4.9. NACA 4415, simetrik olarak kalınlaştırılmış ve alt çizgiden % 2 oranında kalınlaştırılmış küt firar kenarlı kanat profillerinin kıyaslanması

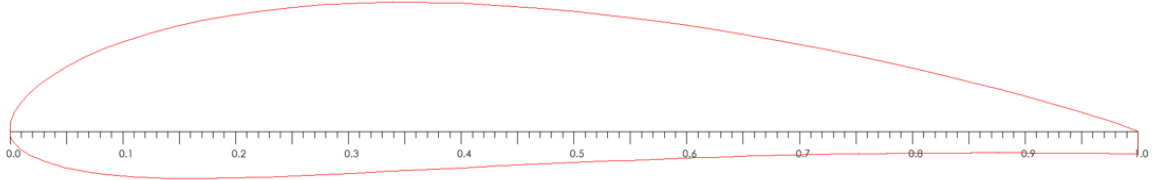
Şekil 4.9 'dan da anlaşılacağı üzere  $C_l/C_d$  oranı en yüksek profil, firar kenarı veter çizgisinin altında kalacak şekilde % 2 oranında kalınlaştırılmış olan profildir.



Şekil 4.10. NACA 4415 kanat profilinden türetilmiş alt çizgiden % 2 oranında kalınlaştırılmış küt firar kenarlı kanat profilinin  $C_l$  ve  $C_d$  grafikleri

Şekil 4.10 incelendiğinde NACA 4415 kanat profilinden türetilmiş küt firar kenarlı kanat profilinin  $C_l$  değeri, orijinal kanat profilinin  $C_l$  değerinden daha yüksektir. Diğer tarafta  $C_d$  değeri için tam tersi olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada NACA 4415 kanat profili esas alınarak, kanat profilinin aerodinamik performansını artırmaya yönelik olarak profilin üst çizgisi değiştirilmeden, alt çizgisinin çıkış kenarı % 2 oranında kalınlaştırılarak; bir kanat profili elde edilmiştir. Teorik ve deneysel çalışmalarda bu kanat profili kullanılacaktır.(Şekil 4.11)



**Şekil 4. 11.** Türetilmiş küt firar kenarlı kanat profili

## 5. HAD İLE KÜT FİRAR KENARLI KANAT PROFİLİNİN AERODİNAMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

### 5.1. Kütle Firar Kenarlı ve NACA 4415 Kanatların Elde Edilmesi

Bu bölümde 3 boyutlu NACA 4415 ve türetilmiş kanatların elde edilmesinde izlenmiş olan adımlar anlatılacaktır.

Bu çalışma, Konya şartlarında 500 W gücünde(P), 3 adet palalı(B), yatay eksensli bir rüzgâr türbini esas alınarak yapılmıştır.

Rüzgâr türbini kanat yarıçapı,

$$P = C_P \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (5.1)$$

Denklemler ile 0.77 m olarak hesaplanmıştır. Bu denklemde verilmiş olan nominal rüzgâr hızı(V)=10 m/s; güç faktörü (Cp)=0.43 olarak alınmıştır.

Kanat bağlama açısı,

$$\alpha_b = \frac{2}{3} \cdot \arctan\left(\frac{R}{\lambda \cdot r}\right) - \alpha \quad (5.2)$$

Denklemler ile hesaplanmıştır. Bu denklemde verilmiş olan hücum açısı( $\alpha$ )=10 °; uç hız oranı ( $\lambda$ )=6 olarak alınmıştır.

Veter uzunluğu,

$$c = \frac{1}{B} \cdot \frac{16 \cdot \pi}{C_l} \cdot r \cdot \sin^2\left[\frac{1}{3} \cdot \arctan\left(\frac{R}{\lambda \cdot r}\right)\right] \quad (5.3)$$

Denklemler ile hesaplanmıştır. Bu denklemde verilmiş olan kaldırma kuvvet katsayısı( $C_l$ )=1.225 olarak alınmıştır (Hau, 1996).

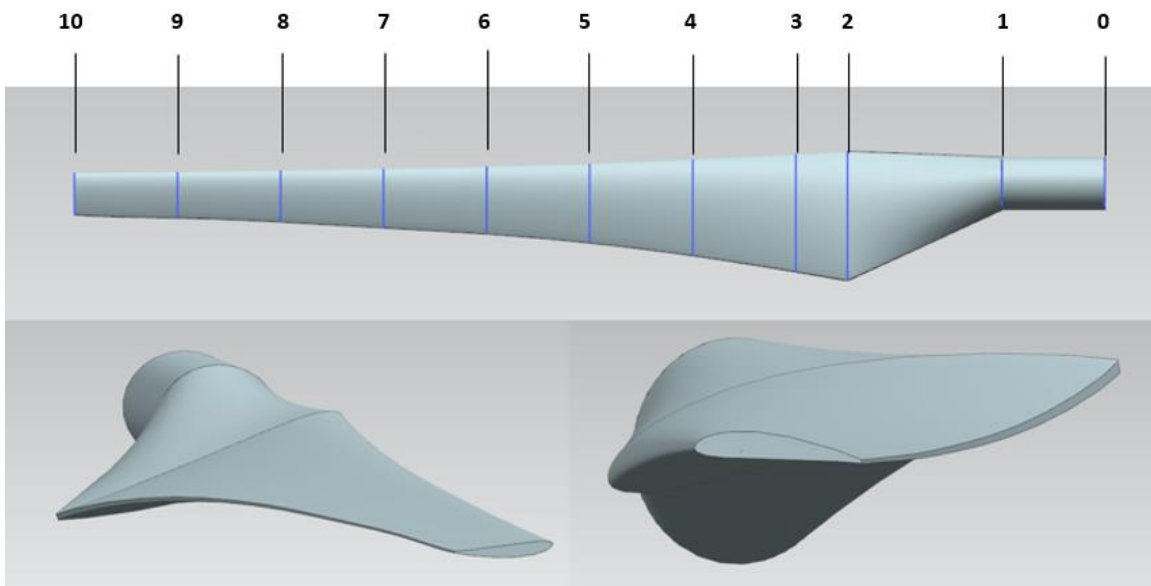
3 boyutlu kanat yarıçapı 10 istasyona(r) bölünmüş olup kanat bağlama açısı ve veter uzunluğu, her bir istasyon için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yapılmış olan hesaplar Çizelge 5.2 'de verilmiştir.

Kanadın türbine bağlanacağı kesit olan 1.istasyon için çap 0.04 m olarak alınmıştır.

Çizelge 5. 1. Modellenen kanadın tasarım parametreleri

İstasyon	r/R	r (m)	Kanat bağlama açısı( $\alpha_b$ ) (m)	Veter uzunluğu (c) (m)
1	0.10	0.0777	-	Çap 0.04
2	0.25	0.1943	12.46004502	0.100814460
3	0.30	0.2332	9.36973606	0.090273135
4	0.40	0.3109	5.07990996	0.073228322
5	0.50	0.3887	2.28996588	0.060916591
6	0.60	0.4664	0.34940733	0.051895668
7	0.70	0.5442	-1.07166816	0.045090987
8	0.80	0.6219	-2.15447404	0.039809385
9	0.90	0.6996	-3.00568199	0.035606060
10	1.00	0.7774	-3.69178519	0.032188760

Bu veriler kullanılarak bir CAD çizim programı ile kanatların 3 boyutlu modellemesi yapılmıştır. Yapılmış olan modellemede NACA 4415 kanat profili için orijinal profil koordinatları kullanılırken; türetilmiş kanat profili için bölüm 4 'te elde edilmiş olan kanadın profil koordinatları kullanılmıştır.

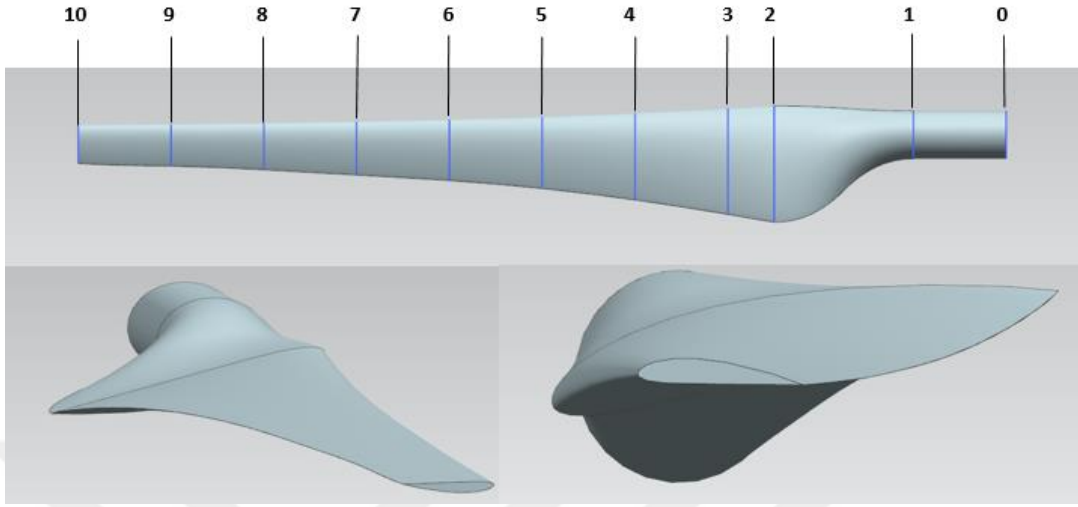


Şekil 5. 1. Türetilmiş kanadın 3 boyutlu küt firar kenarının görünümü

Şekil 5.1 'de verilmiş olan ve türetilmiş kanadın görselinden de görüldüğü üzere, çıkış kenarında NACA 4415 kanat profilinde bulunan keskinlik bulunmamaktadır.

Kanadın modellenmesi sırasında kanat ekseninin doğru konumda belirlenmiş olması önemlidir. Kanat eksenini, kanadın burulma zorlamasına etki eder. Bu sebeple

kanat ekseninin hücum kenarına olan uzaklığının  $t/4 - t/3$  aralığında olması önerilir. Bu çalışmada kanat eksenini (twist axis)  $t/4$  olarak alınmıştır (Habalı, 1999).



Şekil 5. 2. NACA 4415 3 boyutlu kanadın görünümü

Kanat modelleri için, kanat boyuna 10 adet parçaya bölünmüştür. 0. Ve 1. İstasyonlar aynı çapa sahip olup 0.04 m olarak belirlenmiştir. 1. ve 2. İstasyonlar arasındaki geçişin farklı olmasının sebebi; modelleme yapılan CAD programının kabiliyetlerinden dolayıdır. Orijinal NACA 4415 kanat profiline ait CAD model verisi Şekil 5.2 'de verilmiştir.

Bütün istasyonlar için Reynolds sayısı,

$$Re = \frac{\rho \cdot c \cdot Vb}{\mu} \quad (5.4)$$

Denklemine göre hesaplanmıştır. Bu denklemde; dinamik viskozite( $\mu$ ), 0.000017894 kg/m.s; veter uzunluğu(c) her bir istasyon için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Re hesabında kanat profili veter uzunluğu(c) profilin karakteristik özelliği olarak kullanılmıştır. Bileşke hız( $V_b$ ),

$$V_b = \sqrt{V^2 + V\phi^2} \quad (5.5)$$

Denklemini ile hesaplanmıştır. Bu denklemde nominal hız( $V$ )=10 m/s olarak alınmıştır.

Çevresel hız( $V_\phi$ ),

$$V_{\phi} = w \cdot r \quad (5.6)$$

Denklemi ile hesaplanmıştır. Bu denklemde rotor radyal mesafesi (r), istasyon uzaklıkları olarak alınmıştır. Açısal hız(w),

$$w = \frac{V \cdot \lambda}{R} \quad (5.7)$$

Denklemi ile hesaplanmıştır. Bu denklemde kinematik viskozite(v),

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (5.8)$$

Denklemi ile 0.0000146 m<sup>2</sup>/s olarak hesaplanmıştır.

Yukarıdaki denklemlerden verilen veriler türetilmiş kanat için Çizelge 5.3 'de gösterilmektedir.

**Çizelge 5. 2.** Modellenen kanadın tasarım parametreleri

İstasyon	r/R	R (m)	V <sub>φ</sub> (m/s)	V <sub>bileşke</sub> (m/s)	Reynolds sayısı
<b>1</b>	0.10	0.0777	6.0000	11.6619	31,934.4
<b>2</b>	0.25	0.1943	15.0000	18.0278	124,420.8
<b>3</b>	0.30	0.2332	18.0000	20.5913	127,253.6
<b>4</b>	0.40	0.3109	24.0000	26.0000	130,341.0
<b>5</b>	0.50	0.3887	30.0000	31.6228	131,875.5
<b>6</b>	0.60	0.4664	36.0000	37.3631	132,740.2
<b>7</b>	0.70	0.5442	42.0000	43.1741	133,272.7
<b>8</b>	0.80	0.6219	48.0000	49.0306	133,623.0
<b>9</b>	0.90	0.6996	54.0000	54.9181	133,865.4
<b>10</b>	1.00	0.7774	60.0000	60.8276	134,039.8

Bu çalışmada 2D HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri 2.istasyon veter uzunluğu(c) ve Reynolds sayısı esas alınarak yapılmıştır.



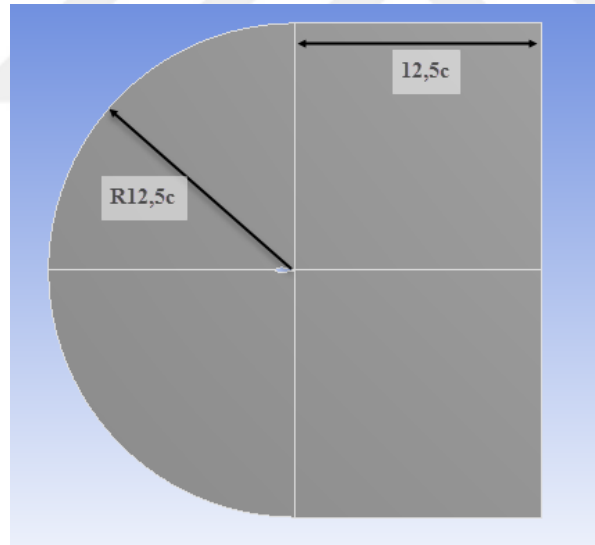
## 5.2. Kanat Profillerin (2D) HAD İle İncelenmesi

Bu bölümde NACA 4415 kanat profili ve türetilmiş kanat profilinin üzerindeki akış HAD yöntemi ile çözüm yapan bir yazılım ile incelenmiştir. Yapılan analizler Çizelge 5.3 'de verilmiş olan 2.istasyon esas alınarak yapılmıştır. Aynı zamanda yapılan deney de bu istasyon verileri esas alınarak üretilmiş olan kanat profilleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Kanat profilleri üzerinde yapılan akış analizleri  $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $16^\circ$  ve  $18^\circ$  hücum açıları için gerçekleştirilmiş olup buna göre kıyaslanmıştır.

### 5.2.1. Akış bölgesinin oluşturulması

Kanat profili koordinatları bu çalışma kapsamında kullanılan paket programa girilerek kanat profilinin 2D geometrisi oluşturuldu. Şekil 5.3 'deki gibi Kanat profilini içine alacak şekilde akış bölgesi oluşturulur.



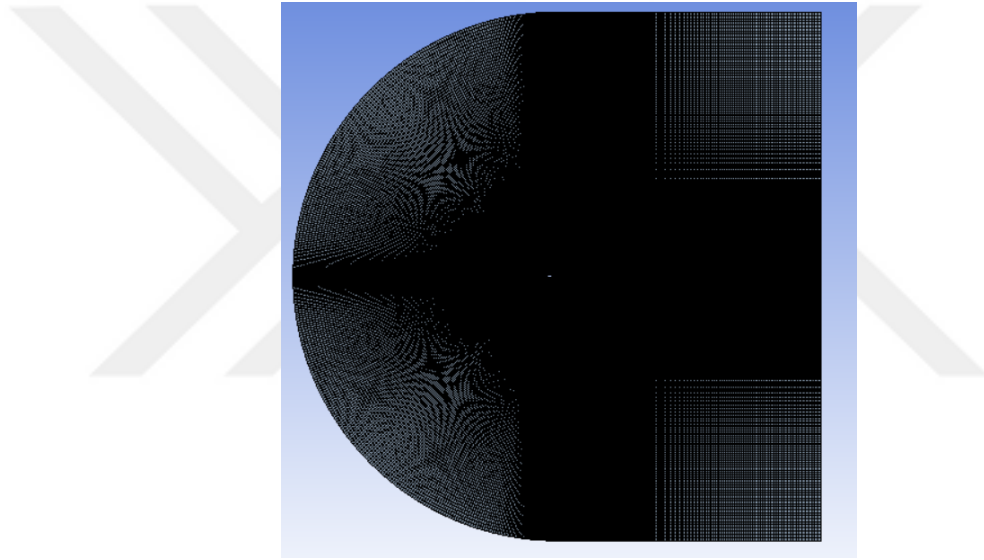
Şekil 5. 3. Kanat profili ve akış bölgesi

### 5.2.2. Sayısal ağ oluşturulması

Bu çalışma kapsamında kullanılan meshing programı, akış alanını küçük elemanlara bölerek meydana getirir. Bu elemanlar hücre olarak adlandırılır. 2 boyutlu (2D) akış bölgelerinde, hücreler alanlardan meydana gelir. 3 boyutlu (3D) akış bölgelerinde ise hücreler hacimlerden meydana gelir. Program, korunum denklemlerini

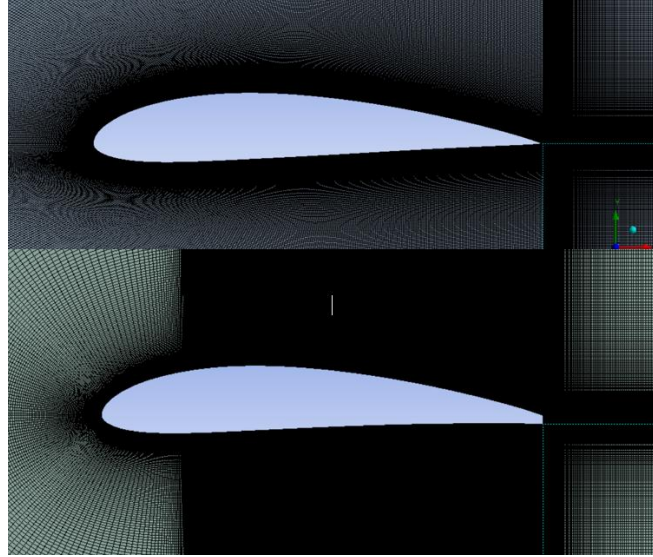
hücre dediğimiz akış bölgelerinde (kontrol alanları veya kontrol hacimlerinde) gerçekleştirir. Akış bölgelerinin kalitesi, HAD çözümünün doğruluğu etkilemektedir. Dolayısı ile HAD problemlerinde ilk aşama sayısal ağın doğru bir şekilde oluşturulmasıdır.

Bu çalışmada, sayısal simülasyonu yapılan NACA 4415 kanat profiline ait 2 boyutlu geometrik modelin ağ yapısının oluşturulmasında, akış çözümlerine daha uygun olan C ağ yapısı kullanılmıştır. Profil yüzeyinde oluşan basınç ve hava hızı değişimlerinin daha iyi tespitini sağlamak amacıyla, ağ yapısı profil yüzeyine doğru gittikçe sıklaştırılmış ve yapısal mesh kullanılmıştır. Şekil 5.4 'te oluşturulan ağ yapısının görünümü verilmektedir.



Şekil 5. 4. Oluşturulan ağ yapısının uzaktan görünümü

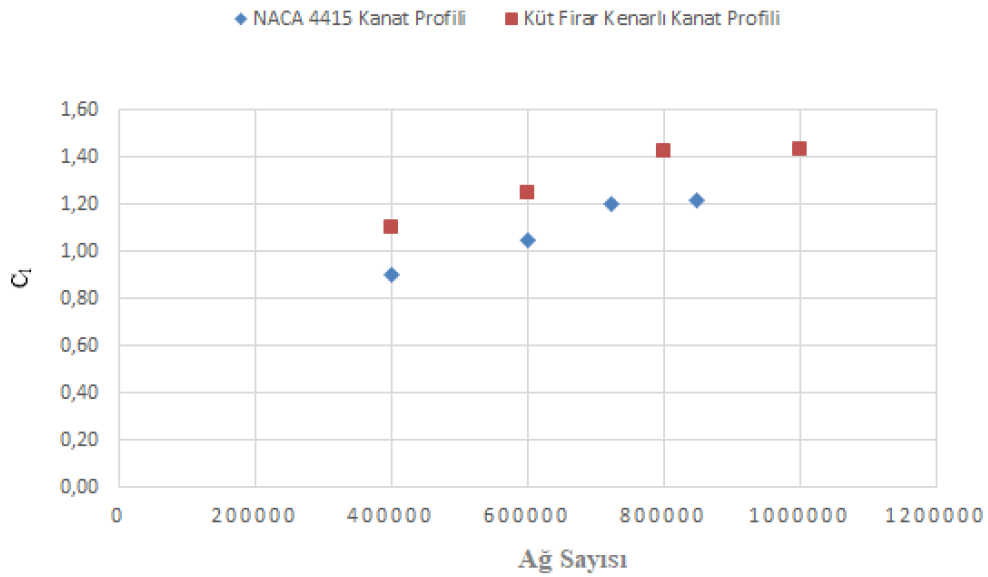
Şekil 5.5 'de de profil etrafında sıklaşan ağın görünümü verilmektedir.



**Şekil 5. 5.** Oluşturulan ağ yapısının profil çevresindeki görünümü(üst: NACA 4415; alt: türetilmiş profil)

Simülasyon sonuçlarının ağdaki hücre sayısından etkilenmemesi için dört farklı hücre sayısı ile  $0^\circ$  hücum açısında çözümler yapılmış ve sonuçların artık kayda değer bir değişim göstermediği ve hesaplama zamanını kısaltacak olan hücre sayısı seçilip kalan çözümler ve simülasyonlar bu ağ yapısı ile gerçekleştirilmiştir.

NACA 4415 kanat profili simülasyonlarının ağ yapısı ve sayısından etkilenmemesi için ağdan bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada SST  $k-\omega$  türbülans benzeşim modelinde farklı sayılarda ağ yapısı ile çözümler alınmış ve sonuçlardaki değişimler incelenmiştir. Şekil 5.6 'da gerçekleştirilmiş olan çalışmanın sonuçları verilmiştir. NACA 4415 kanat profili 800,500 hücre sayısı ile; türetilmiş kanat profili de 722,400 hücre sayısı ile çözülmüştür. Bu çalışmalarda sınır tabaka bölgesindeki ağ yapısı ile ilgili bize fikir vermesi açısından +y değerleri yaklaşık olarak 10-15 arasında değişim göstermektedir.



Şekil 5. 6. 2D çözümün ağdan bağımsızlık çalışması

### 5.2.3. Sınır şartlarının oluşturulması

İlk aşamada doğru bir sayısal ağ oluşturulduktan sonra problemin sınır şartları belirlenir. Sınır şartlarının tanımlanması için yazılımda bazı ön ayarlamalar yapılır. Bu çalışmada kullanılan yazılımda yapılan hesaplama hassasiyeti 8 basamağa kadardır. “double precision” ile bu hassasiyeti iki katına çıkarabiliriz. Bu tezde yapılan hesaplamaların hassasiyeti “double precision” ile iki katına çıkartılmıştır.

Program ara yüzünde akış bölgesinde bulunan bütün sınır şartları belirlenmelidir. Bu projede kullanılan paket programında sınır şartları ilk aşamada program tarafından atanır. Program tarafından atanan sınır koşulları veya değerler bizim problemimizin sınır koşulları veya değerlerinden farklı ise; belirlemiş olduğumuz sınır koşullarını değiştirmeli veya değerleri belirlememiz gerekmektedir.

HAD analizlerinde akışkan çok önemlidir. Bu sebeple akışkan ile ilgili özelliklerin doğru bir şekilde belirlenmesi çok önemlidir. Akışkan ile ilgili; akışkanın türü, sıcaklığı, yoğunluğu ve viskozitesi programa tanımlanmalıdır. Bu projede akışkan olarak hava kullanılmıştır. Kullanılan paket programında hava ile ilgili özellikler tanımlanmış olduğu için akışkanın yoğunluğu dışında bu özelliklerin tekrardan belirlenmesine gerek kalmamıştır.

HAD analizlerinde akış bölgesinde tanımlı olan değişkenlerin değerleri belirlenmiş olması gerekmektedir. Analizin başlayabilmesi için bu değişkenlerin değerlerinin programda belirlenmiş olması gerekmektedir.

HAD analizlerinde akış bölgesinde bulunan bütün hücreler için program tarafından belirlenmiş olan denklemler iteratif olarak çözülür. Normal şartlarda çözdürülen denklem eşitliklerinin sağ ve sol tarafında bulunan terimlerinin birbirine eşit olması gerekmektedir. Denklemden eşitliğinin her iki tarafında bulunan terimlerinin arasındaki farkın sıfıra eşit olması gerekmektedir. Bu durum hiçbir zaman gerçekleşebilir değildir. Fakat programa yeterli sayıda iterasyon tanımlanırsa denklemin her iki tarafındaki terimler arasındaki fark sıfıra yaklaşır.

HAD analizlerinin laminar akış bölgelerinde iyi bir sonuç alabilmek için sayısal ağ yapısının uygun bir şekilde oluşturulmuş olması gerekmektedir. Bu ön şart sağlandığında sıkıştırılmaz ve daimi akışlarda HAD yazılımları doğru sonuçlar verir.

HAD analizleri, türbülanslı akış bölgelerinde akış alanının durağan (daimi) olduğu durumlarda bile laminar akış analizlerinden çok daha zordur. Bunun en önemli sebebi akış bölgesindeki sürekli değişen akış özellikleridir. Türbülanslı akış bölgelerinde her yönden girdaplar meydana gelir. Bunun yanında Reynolds sayısının büyümesi türbülanslı akış bölgesindeki hesaplamaları zorlaştırır. Bu nedenle, yüksek Reynolds sayılı türbülanslı akış çözümleri için ya basitleştirici kabuller yapmak gerekecek ya da doğru türbülans modelini kullanmak gerekecektir.

### **5.2.3.1. İçeri akış ve dışarı akış sınır şartları**

Kullanılan paket programda akışkanın, akış bölgesine girdiği bölgelerde akış hızı belirtilmiştir. Aynı şekilde akışkanın, akış bölgesinden çıktığı bölgede akış için basınç değeri girilmiştir. Genel olarak akışkanın girişi ve çıkışı için farklı durumlarda söz konusu olabilmektedir. Akışkan bölgesinde sıcaklık alışverişi mevcut ise yani enerji denklemleri çözülecekse buna göre sıcaklık değerlerinin de belirtilmesi gerekmektedir. Bu durum türbülans denklemlerinin çözülmesi için de geçerlidir. Aynı şekilde türbülans özelliklerinin de belirtilmesi gerekmektedir.

Akış alanı denklemleri için hız girişi seçilecek ise; hızın vektörel değerlerinin de girilmesi gerekmektedir. Akış alanı denklemleri için basınç çıkışı seçilecek ise; serbest akış durumlarında yani çıkışı atmosfere açıyorsa atmosferik basınç (sıfır etkin basıncı)

girilmelidir. Akış alanı denklemlerinin giriş ve çıkış özellikleri belirlenirken türbülans özellikleri belirtilebilir.

HAD çözümlerinde ters akış problemi ile sıklıkla karşılaşılabilir. Ters akışın meydana gelmesinin birçok sebebi bulunmaktadır. Çoğunlukla akış alanının yeteri kadar büyük olmaması ve çıkış bölgesindeki sayısal ağın kalitesinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Program çözümü sırasında ters akış uyarılarının alınmaması gerekmektedir.

Akış alanı için hareket denklemleri çözümünde; hız girişi seçildiyse basınç veya başka bir özelliğin belirtilmemesi gerekmektedir. Aynı şekilde akış alanı çıkışında basınç seçildiyse hız veya başka bir özelliğin belirtilmemesi gerekmektedir. Aksi takdirde aşırı yüklenmiş denklemlerin çözümü gerçekleşmeyebilir, çözülsede doğru sonuçlar vermeme ihtimali oldukça yüksektir. Akış alanı girişinde hız belirtildiyse; akışın geri kalanı için basınç durumu kendini ayarlar. Benzer bir durum da basınç girişinde veya çıkışında hız belirtilmez, çünkü bu da matematiksel olarak aşırı yüklenme durumuna yol açar. Basıncın belirtildiği bir sınır şartında hız, akış alanının geri kalanına uymak için kendisini ayarlar.

Bazı HAD uygulamasında, akış bölgesi hesaplamalarında birden fazla sınır şartı belirtilebilir. Bu durumda da aşırı hesaplama yüklemesinin olmamasına dikkat edilmelidir.

### 5.2.3.2. Diğer sınır şartları

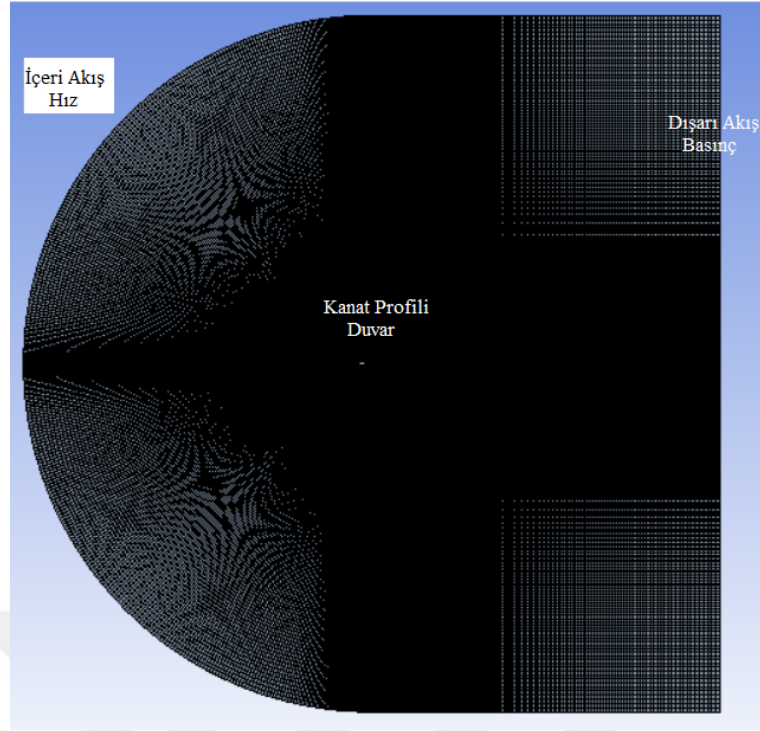
Bu çalışmada uygulanan diğer bir sınır şartı da 3D hesaplama bölgesinin periyod olarak modellenmesidir. 2D hesaplama alanlarında çözüm süresini kısaltmak için akış alanına uygun ise simetriklik modellenebilir. Aynı şekilde 3D hesaplama alanlarında da periyodiklik uygulanır. Akış alanının tekrarlama durumlarında kullanılır. Bu çalışmada 3D hesaplama çözümünde sadece bir adet kanat ve buna uygun akış hacmi modellendi. 3 kanatlı bir rüzgâr türbini çalışması için, modellenen kanat ve akış yüzeyinin her iki tarafına periyodiklik tanımlandı. Böylece hesaplamalar bir tek kanat ve akış hacmi için yapılırken sonuçlar 3 kanatlı bir rüzgâr türbini için elde edilmiş oldu. Modellenen hesaplama hacmi için tanımlanan sınır koşulları, modellenmesine gerek duyulmayan diğer tekrarlanan akış hacimleri için de geçerli olmaktadır. Periyodiklik veya simetriklik sınır şartları çözümlene yapılacak olan bilgisayarın fazla zorlanmaması için problemin

müsaade ettiği çerçevede bütün akış bölgesini modellemek yerine minimum akış bölgesini modeller.

Bu çalışmanın 3 boyutlu analiz çalışmasında bir adet kanat ve bu kanat için akış bölgesi oluşturulmuş olup periyodik sınır şartları tanımlanmıştır. Bu durumda simülasyonun daha hızlı çözümlenmesini sağlar.

#### **Akış bölgesi sınır şartları;**

- 2D ve 3D analizleri; 8 GB RAM ve i7-7700HQ/2.8 GHz işlemci özelliklerinde bir bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir.
- Çözümler SST k- $\omega$  türbülans benzeşim modeli ile gerçekleştirilmiştir.
- 2D analizlerde yakınsama kriteri  $10^{-6}$  olarak alınmıştır. 3D analizlerde yakınsama kriteri de  $10^{-4}$  olarak alınmıştır.
- Yapılan çalışmalar düşük hızlarda olduğu için yoğunluk değişimi beklenmemektedir. Bu yüzden basınca bağlı çözüm kullanılmıştır.
- Çözülen model 2 boyutlu ve zamandan bağımsız olarak çözülmüştür.
- Akış bölgesinde tanımlanan havanın vizkositesi:  $1.7894e-05$  kg/m.s olarak alınmıştır.
- İçeri akış Şekil 5.7 'de gösterildiği gibi üst, alt ve giriş duvarlarında tanımlanmıştır. Bu tez çalışması;  $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $14^\circ$ ,  $16^\circ$  ve  $18^\circ$  hücum açılarında çözülmüştür. Yapılan çalışma 124,000 Reynolds sayısında çözülmüştür.



Şekil 5. 7. Akış alanı sınır şartları

#### 5.2.4. Analiz sonuçların incelenmesi

Bu çalışma kapsamında NACA 4415 kanat profilinin ve bu kanat profilinden türetilmiş firar kenarı % 2 oranında kalınlaştırılmış kanat profillerinin HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Her iki kanat profilinin analizleri aynı koşullarda gerçekleştirilmiştir.

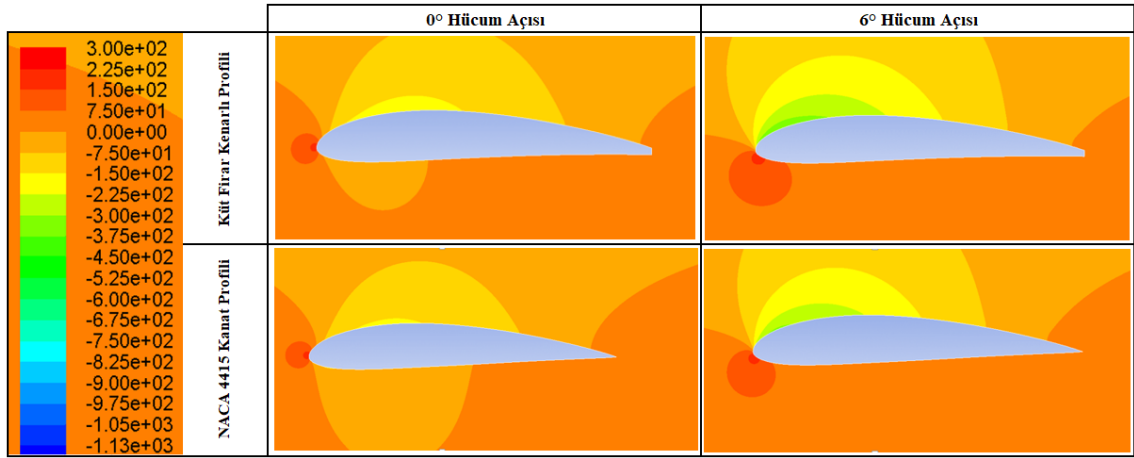
Analizler  $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $14^\circ$ ,  $16^\circ$  ve  $18^\circ$  hücum açılarında gerçekleştirilmiş olup her iki kanat profili verileri kıyaslanmıştır. Kanat profillerinin etrafındaki basınç dağılımları ve hava hızları, değişen hücum açlarına göre aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.

Kanat profillerinin alt bölgesi yüksek basınç ve düşük hız bölgeleridir; üst bölgesi de düşük basınç ve yüksek hız bölgeleridir. Bu açıdan her iki kanat profili kıyaslandığında, türetilmiş kanat profilinin alt bölgesinde yüksek basınç bölgeleri daha fazladır.

Şekil 5.8 'de NACA 4415 ve türetilmiş kanat profillerinin  $0^\circ$  ve  $6^\circ$  hücum açıları için basınç dağılımları gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere türetilmiş kanat profilinin alt bölgeleri NACA 4415 kanat profilinin alt bölgesine göre daha yüksek



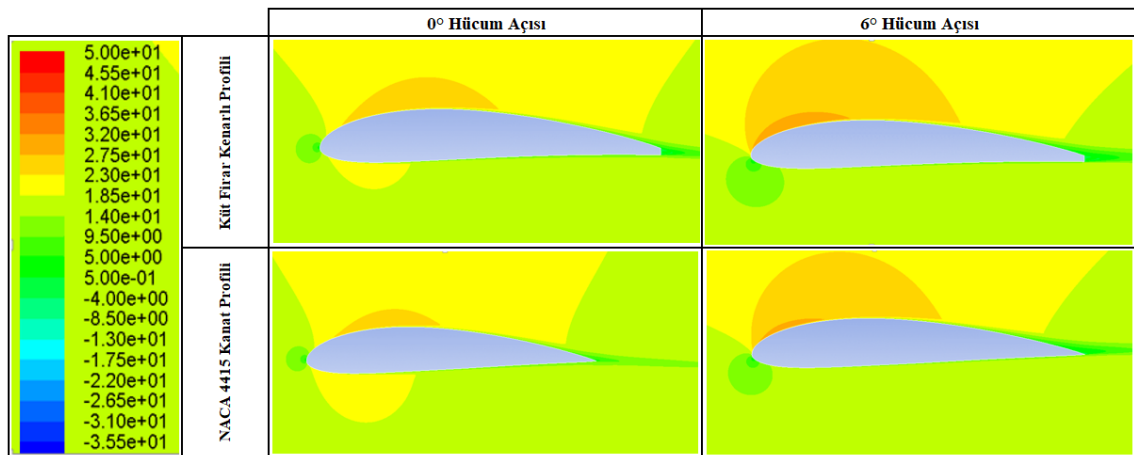
basıncılı akış bulunmaktadır. Aynı şekilde türetilmiş kanat profilinin üst bölgesinde düşük basınçlı hava akışının daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 8.Kanat profilleri etrafında 0° ve 6° hücum açılarındaki basınç dağılımı

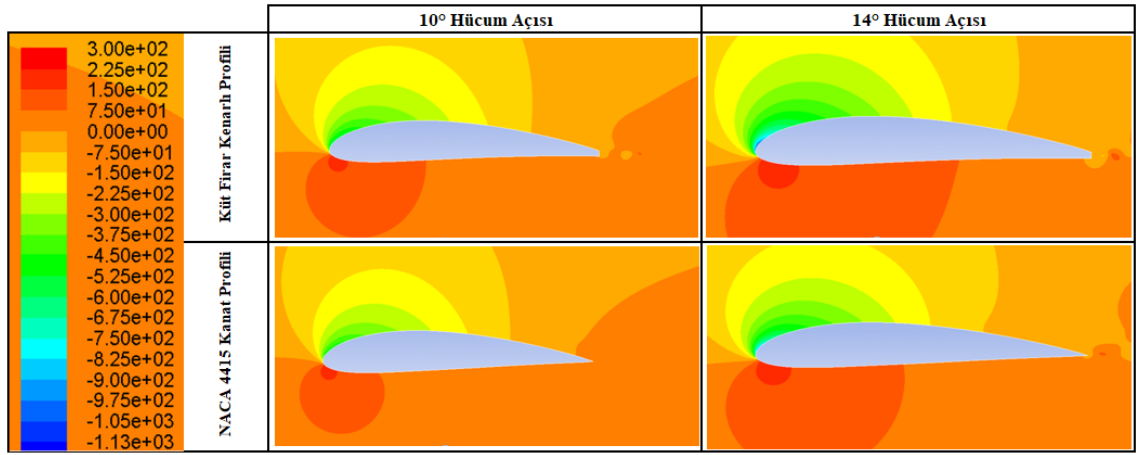
NACA 4415 ve türetilmiş kanat profillerinin etrafında 0° ve 6° hücum açıları için meydana gelen hız değişimleri Şekil 5.9 'da gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere türetilmiş profilin alt bölgesinde hava hızının NACA 4415 kanat profiline göre daha düşük olduğu görülmektedir.

Hava akışı her iki kanat profilinin çıkış kenarından benzer şekilde ayrıldığı görülmektedir. Fakat çıkış kenarından sonra küt fırat kenarlı kanat profilindeki akışın daha kararlı olduğu görülmektedir.



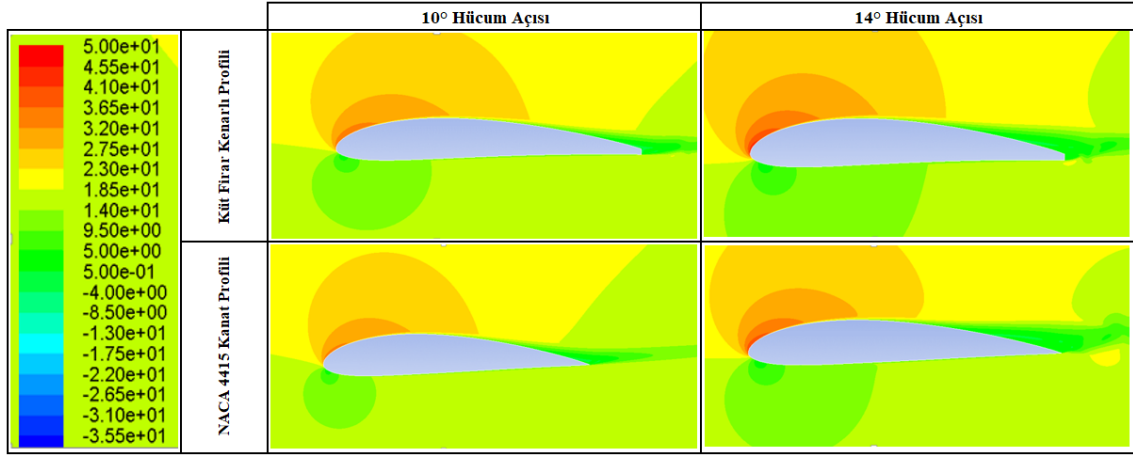
Şekil 5. 9.Kanat profilleri etrafında 0° ve 6° hücum açılarındaki hava hızları

Şekil 5.10 'da NACA 4415 ve türetilmiş kanat profillerinin etrafındaki basınç durumu  $10^\circ$  ve  $14^\circ$  hücum açıları için gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere türetilmiş kanat profilinin alt bölgelerindeki basınç durumu daha yüksektir. Hücum açılarının artması ile basınç durma noktasının çıkış kenarına doğru ilerlediği görülmektedir. NACA 4415 kanat profilinin çıkış kenarının üst bölgesinde yüksek basıncın oluştuğu görülmektedir. Çıkış kenarında meydana gelen girdaplar bu tür etkiler oluşturmaktadır. Aynı durumun türetilmiş kanat profilinde olmadığı görülmektedir. Bu durum türetilmiş kanat profilinin kaldırma kuvvetinin neden daha yüksek olduğunu açıklamaktadır.



Şekil 5. 10.Kanat profilleri etrafında  $0^\circ$  ve  $6^\circ$  hücum açılarındaki basınç dağılımı

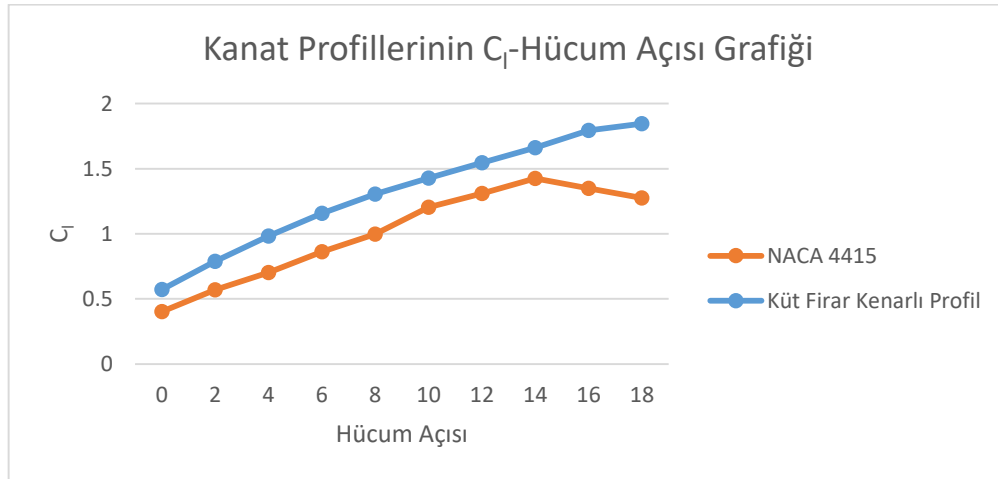
Şekil 5.11 'de NACA 4415 ve türetilmiş kanat profillerinin etrafındaki hava akış hızlarının durumu  $10^\circ$  ve  $14^\circ$  hücum açıları için gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere türetilmiş profilin alt bölgesinde hava hızının NACA 4415 kanat profiline göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 5.10 'da meydana gelen basınç durumu ile paraleldir. Her iki kanat profilinde çıkış kenarına doğru akışın ayrılma bölgeleri benzerlik göstermektedir. Fakat akış ayrıldıktan sonra türetilmiş kanat profilinde daha kararlı devam ettiği görülmektedir. Bu durum türetilmiş kanat profilinin çıkış kenarındaki girdapların NACA 4415 kanat profiline göre daha az olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.11. Kanat profilleri etrafında 10° ve 14° hücum açılarındaki hava hızları

Yapılmış olan HAD analizleri sonucunda NACA 4415 kanat profili ve türetilmiş kanat profili için  $C_l$  ve  $C_d$  değerleri elde edilmiştir. Elde edilen karakteristik değerler aşağıdaki şekillerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

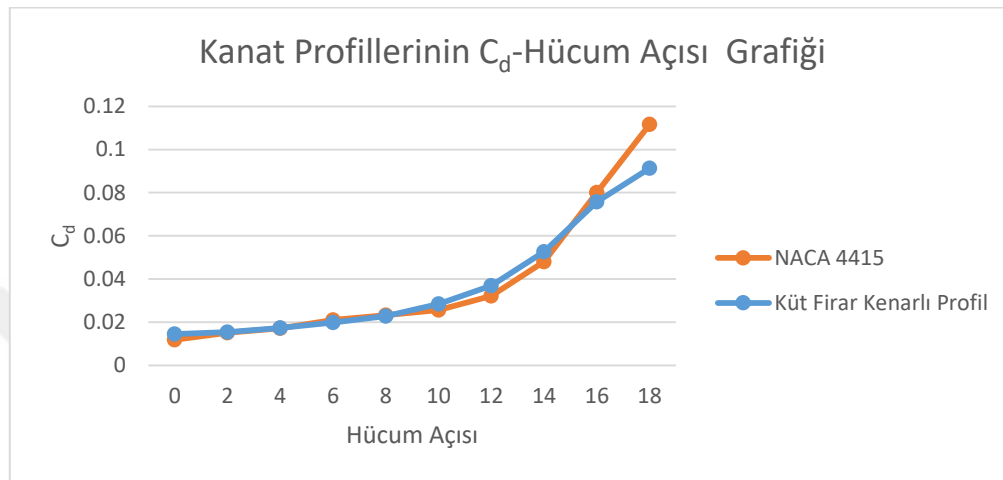
Şekil 5.12 'de NACA 4415 ve türetilmiş kanat profillerinin kaldırma kuvvet katsayılarının hücum açılarına göre değişimi karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Küt firar kenarlı kanat profilinin NACA 4415 kanat profilinden daha yüksek  $C_l$  ye sahip olduğu görülmektedir. 14° hücum açısına kadar her iki kanat profilinde de  $C_l$  yükselmektedir. Fakat 14° hücum açısından sonra NACA 4415 kanat profilinin  $C_l$  değerleri düşmeye başlamaktadır.



Şekil 5.12. Kanat profillerinin  $C_l$ - hücum açısı grafiği

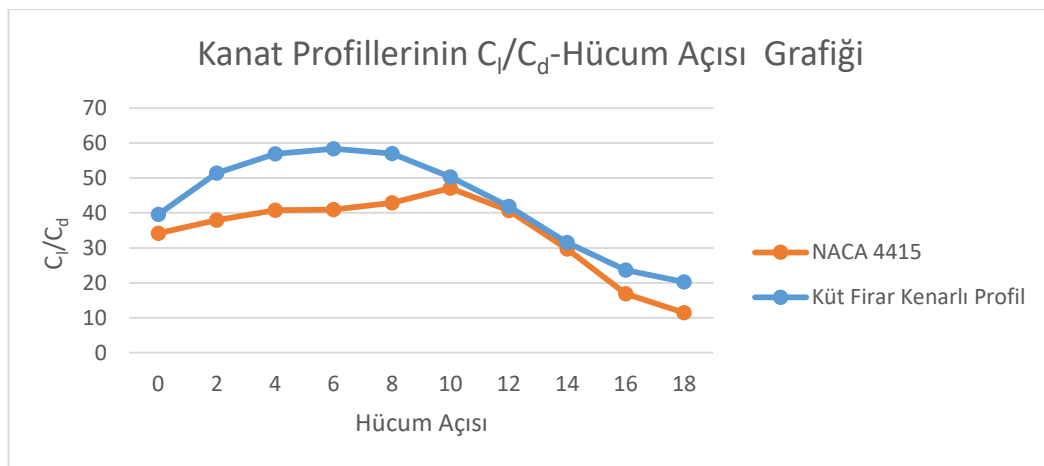
Şekil 5.13 'de NACA 4415 ve türetilmiş kanat profillerinin sürükleme kuvvet katsayılarının hücum açılarına göre değişimi karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Küt firar

kenarlı kanat profili ile NACA 4415 kanat profilinin yakın  $C_d$  değerlerine sahip olduğu görülmektedir.  $16^\circ$  hücum açısından sonra NACA 4415 kanat profilinin  $C_d$  değerlerindeki değişim daha fazla olmaktadır. Bunun sebebi NACA 4415 kanat profilinde yüksek hücum açılarındaki akış ayrılmalarının kanat profilinin giriş kenarına yaklaşıyor olması ve girdapların meydana geliyor olmasıdır.



Şekil 5.13. Kanat profillerinin  $C_d$ - hücum açısı grafiği

Kanat profilleri karşılaştırması için kullanılan karakteristik değerlerden bir tanesi de  $C_l/C_d$  değeridir. Şekil 5.14 'de hücum açılarına göre  $C_l/C_d$  değişim grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre  $C_l/C_d$  değerinin en yüksek olduğu hücum açısı  $6^\circ$  'dir.



Şekil 5.14. Kanat profillerinin  $C_l/C_d$  - hücum açısı grafiği

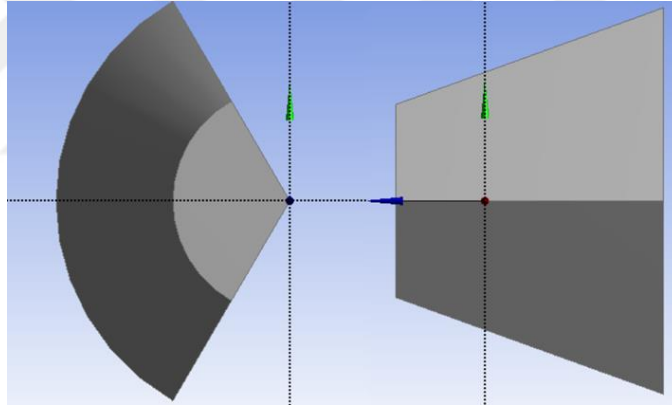
Her iki kanat profili için yapılan 2D HAD analizlerine göre; türetilmiş kanat profilinin NACA 4415 kanat profiline göre daha verimli olduğu anlaşılmaktadır.

### 5.3 Üç Boyutlu Kanatların (3D) HAD İle İncelenmesi

Bu çalışma kapsamında NACA 4415 ve küt firar kenarlı kanatlar Bölüm 5.1 ‘de anlatıldığı gibi modellendi. HAD yöntemi ile çözüm yapan bir paket programı ile akış bölgesi oluşturuldu, sayısal ağlar oluşturuldu ve gerekli sınır şartları girilerek analizler gerçekleştirildi.

#### 5.3.1. Akış bölgesinin oluşturulması

Üç boyutlu HAD analizleri için öncelikle akış bölgesinin oluşturulması gerekmektedir. Daha hızlı çözüm alabilmek için akış bölgesi Şekil 5.15 ‘de görüldüğü gibi  $120^\circ$  açı ile modellenmiştir. Kurulum aşamasında gerekli yüzeylere periodiklik tanımlanacaktır.



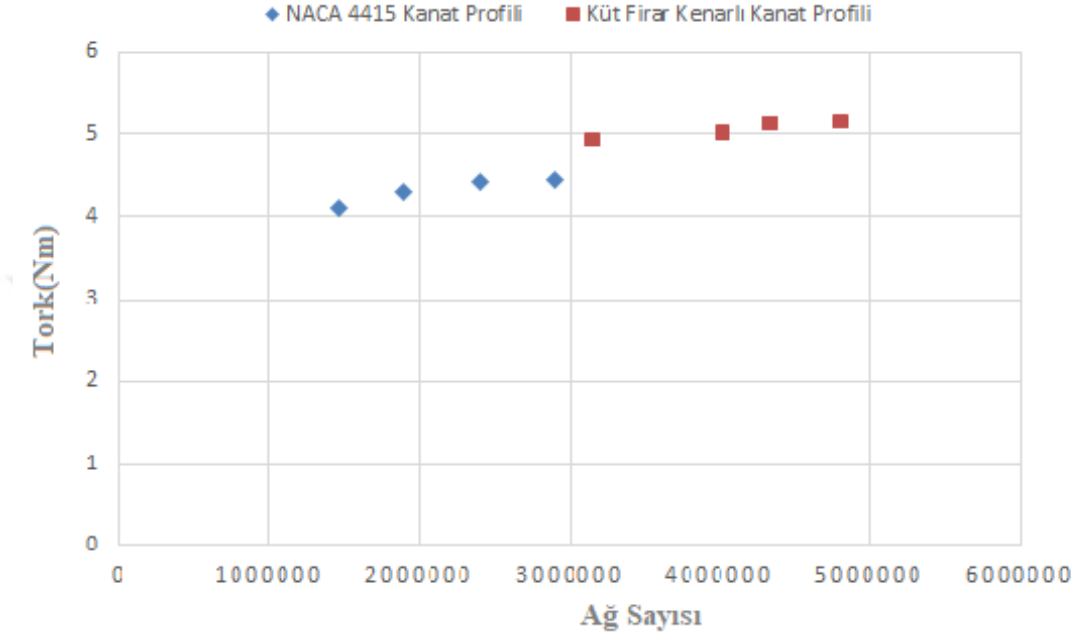
Şekil 5. 15. Üç boyutlu HAD analizi için akış bölgesinin oluşturulması

#### 5.3.2. Sayısal ağ oluşturulması

Sayısal ağ oluşturulurken genel olarak Bölüm 5.2.2 ‘de 3D için belirlenen yollar izlenmiştir. Hücre büyüklükleri kanadın olduğu bölgede küçültülmüş olup dışa doğru büyüyerek gitmektedir. Ayrıca daha doğru bir sonuç almak için sınır tabaka kalınlığı olabildiğince inceltirilmiştir.

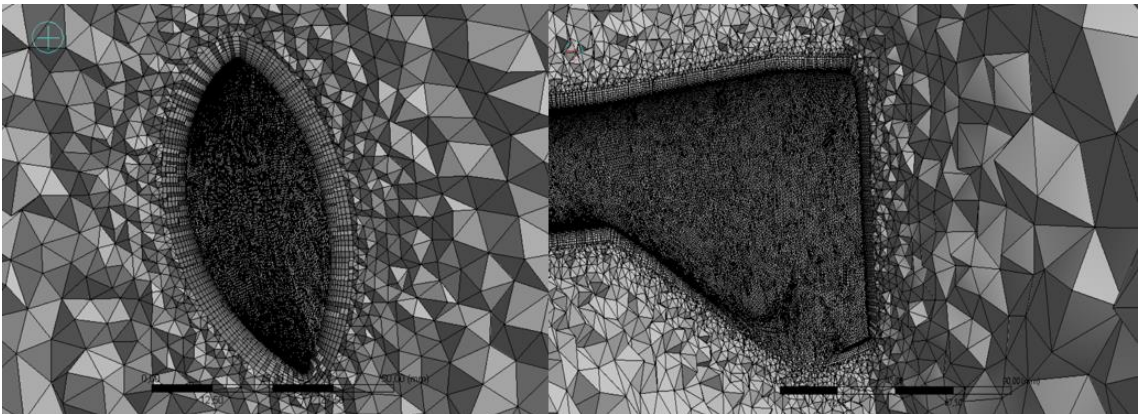
NACA 4415 kanat profili 3D simülasyonlarının ağ yapısı ve sayısından etkilenmemesi için ağdan bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada k-ε türbülans benzeşim modelinde farklı sayılarda ağ yapısı ile çözümler alınmış ve

sonuçlardaki değişimler incelenmiştir. Şekil 5.16 'da gerçekleştirilmiş olan çalışmanın sonuçları verilmiştir. NACA 4415 kanat profili 2,420,000 hücre sayısı ile; türetilmiş kanat profili de 4,341,548 hücre sayısı ile çözülmüştür. Bu çalışmalarda sınır tabaka bölgesindeki ağ yapısı ile ilgili bize fikir vermesi açısından +y değerleri yaklaşık olarak 40-60 arasında değişim göstermektedir.



Şekil 5. 16. 3D çözümün ağdan bağımsızlık çalışması

Şekil 5.17 'de hücre kalitesi ile ilgili bir görsel bulunmaktadır.



Şekil 5. 17. Hücre kalitesinin kanatlara doğru iyileştirilmesi

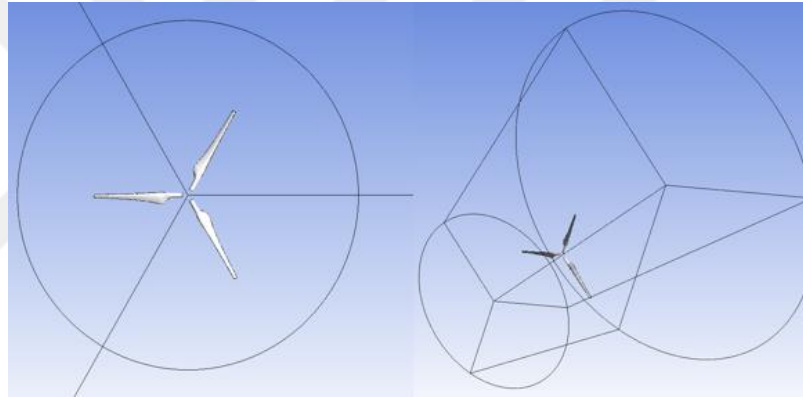
### 5.3.3. Sınır şartlarının belirlenmesi

Sınır şartları için genel olarak Bölüm 5.2.3 'de 3D için belirlenen yollar izlenmiştir. İçeri akış için nominal rüzgar hızı olan 10 m/s değeri girilmiştir.

Geometri oluşturma aşamasında akış bölgesi gerçek akışın 1/3 'ü kadar modellenmiştir. Bu sebeple akış duvarlarına periyodiklik tanımlanmıştır.

### 5.3.4. Analiz sonuçların incelenmesi

Bu çalışma kapsamında NACA 4415 ve küt firar kenarlı kanatların 3D HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Kanatlar için gerçekleştirilen analizlerden elde edilen tork değerleri karşılaştırılacaktır.



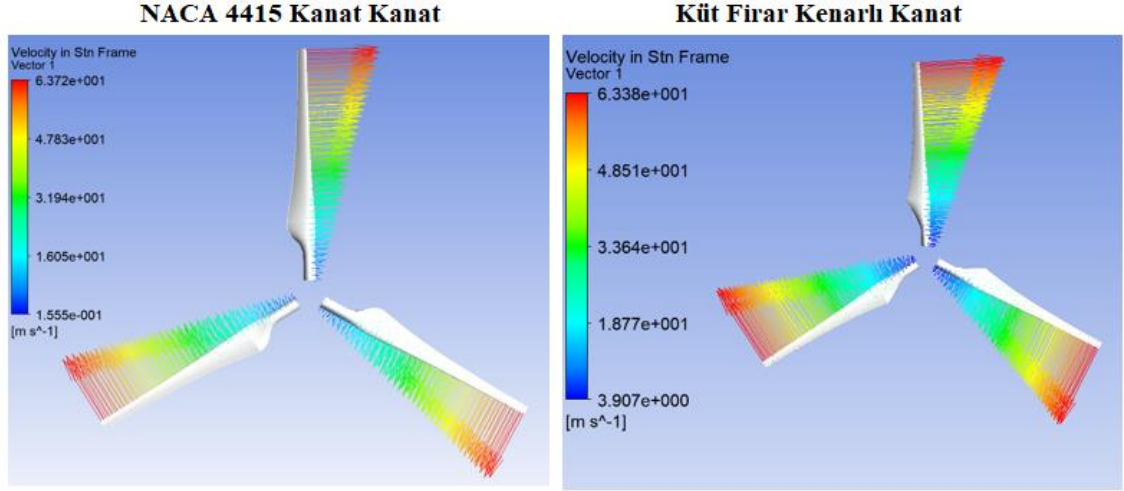
Şekil 5. 18. Akış bölgesi ve kanatların gösterimi

Rotor çapı 1.44 m olan rüzgâr türbini Şekil 5.18 'de gösterilmektedir. Akış analizlerinde paket programının süreklilik denkleminde uyup uymadığı çok önemlidir. Bu sebeple bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizde giriş ve çıkıştaki debi farkına bakılmıştır. Şekil 5.19 'da görüldüğü üzere giriş ve çıkış arasındaki debi farkı az olduğundan dolayı sonucu etkileyecek seviyede değildir.

<b>Kütleli Akış Hızı</b>	<b>(kg/s)</b>
İçeri Akış-1	28.84418
İçeri Akış-2	86.58808
Dışarı Akış	-115.43138
Toplam	0.0008811

Şekil 5. 19. Örnek bir HAD analizi için akış bölgesindeki debi değerleri

Şekil 5.20 'de NACA 4415 ve küt firar kenarlı kanatlar üzerindeki akış hızının vektörel gösterimi bulunmaktadır. Kanatlardaki hız vektörlerinin kanadın ucuna doğru gittikçe büyüdüğü görülmektedir.



Şekil 5. 20. NACA 4415 ve küt firar kenarlı kanatların hız vektörleri

Bu çalışma kapsamında NACA 4415 kanat profilinin çıkış kenarında % 2 'lik kalınlaştırma yapılarak bir küt firar kenarlı kanat profili elde edildi. Firar kenarındaki bu düzlük, daha az girdapların oluşmasına ve akışın profilden ayrıldıktan sonra daha kararlı olmasına yol açmaktadır. Çizelge 5.4 'de verilmiş olan 3D HAD ile analizi gerçekleştirilen bu iki kanadın tork değerleri kıyaslandığında bunlara paralel olarak küt firar kenarlı kanadın tork değerinin daha yüksek olduğu ortaya çıkmaktadır. NACA 4415 kanadın analizi sonucunda elde edilen tork değeri 4.42 Nm iken; küt firar kenarlı kanadın tork değeri de 5.12 Nm olarak elde edilmiştir. Elde edilen tork değerleri,

$$T = \frac{P}{w} \quad (5.9)$$

Denklemleri ile elde hesaplanmıştır. Bu denklemde tork (T), Nm cinsinden; güç (P), watt cinsinden alınmıştır.  $w$  (rad/s) açısal hızı Denklem 5.7 ile hesaplanmıştır.



**Çizelge 5. 3.** NACA 4415 ve küt firar kenarlı kanatların tork değerleri

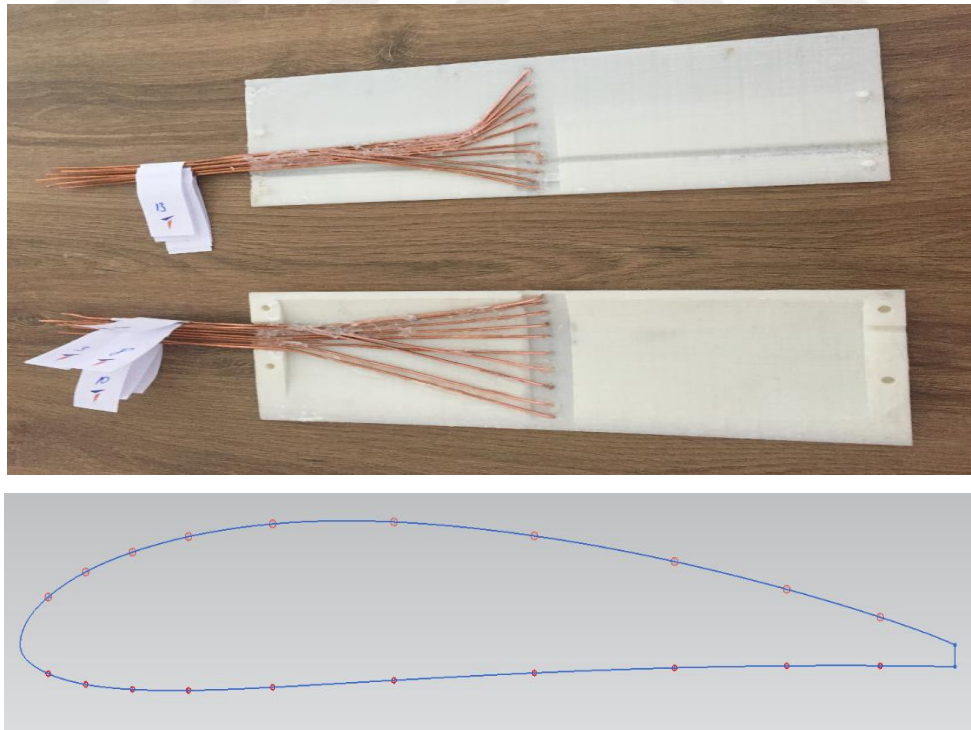
	<b>NACA 4415 Kanat</b>	<b>Küt Firar Kenarlı Kanat</b>
<b>Tork (Nm)</b>	4.42	5.12



## 6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma kapsamında NACA 4415 kanat profilinden türetilmiş firar kenarı % 2 oranında kalınlaştırılmış kanat profilinin deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney çalışmasında Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3 'de verilmiş olan 3D modelleme verilerinden 2. istasyon hız ve veter uzunluğu verileri kullanılmıştır. Bu istasyon verileri 2D HAD analiz çalışmasında kullanıldığı için doğru karşılaştırma yapılabilmesi için deney çalışmasında da aynı girdiler kullanılmıştır. Kanat profilinin veter uzunluğu 10 cm olacak şekilde plastik malzemeden üretilmiştir. Kanat uzunluğu, deney seti boyutlarına uyacak şekilde 30 cm olarak iki parça halinde üretilmiştir.

Şekil 6.1 'de görüldüğü üzere kanat profilinin üstünde ve altında 10 'ar adet basınç ölçme noktası bulunmaktadır. Profil üzerindeki basınçları ölçmek için iç çapı 0.8 mm olan bakır borular kullanılmıştır. Bakır borular, bükümü kolay olduğu için kullanılmıştır. Ayrıca bu borular büküldüğünde; büküm bölgesinde herhangi bir çatlak oluşmamış ve havanın geçişine problem oluşturacak şekilde kesitte daralma meydana gelmemiştir.



**Şekil 6. 1.** Türetilmiş NACA 4415 kanat profilinin parçaları ve basınç noktaları

Kanat üzerinde bulunan 20 adet basınç noktası, deney setinde bulunan manometre borularına bağlanmıştır. Deney 18 m/s hava akış hızında ve  $1.05 \text{ kg/m}^3$  hava yoğunluğunda gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.2 'de görüldüğü üzere kanat profili deney setine bağlanmıştır. İstenilen şartlarda oluşturulan hava akışına göre kanat üzerinde meydana gelen basınçlar manometreden mmSS olarak okunmuş;

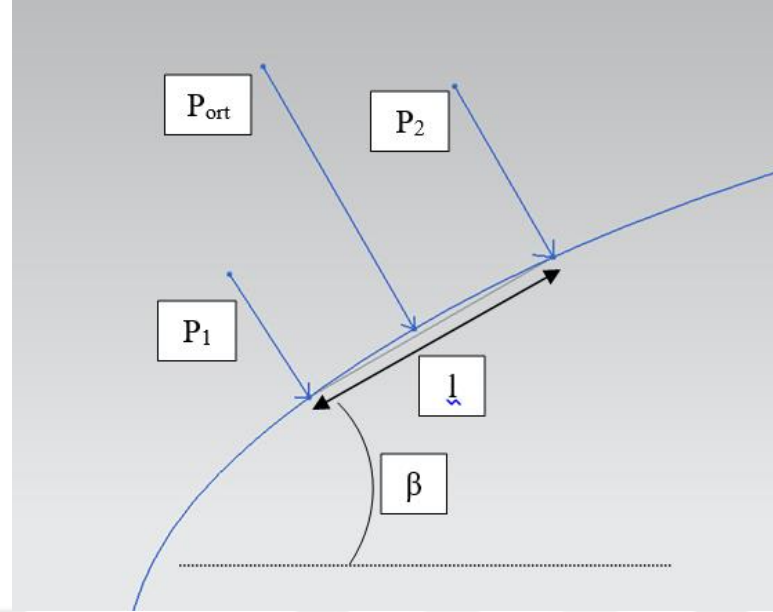
$$P_{\text{basınç}} = h \cdot \rho_{\text{su}} \cdot g \quad (6.1)$$

Denklemler ile basınçlar Pascal cinsinden elde edilmiştir. Denklemlerde bulunan h, manometre su yüksekliğini metre cinsinden;  $\rho_{\text{su}}$ , manometrede bulunan suyun yoğunluğunu  $1,000 \text{ kg/m}^3$  olarak ifade etmektedir.



Şekil 6. 2.Kanat profilinin deney seti üzerindeki bağlantısı

Deney; kanat profilinin  $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $14^\circ$ ,  $16^\circ$  ve  $18^\circ$  hücum açılarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. 3.Kanat profili üzerindeki basınç noktalarının gösterimi

Kanat profili üzerindeki basınç noktaları Şekil 6.3 'de gösterildiği üzere;

$$P_{ort} = (P_1 + P_2) / 2 \quad (6.2)$$

Denklemleri ile her iki basınç noktasındaki basınçların ortalaması alınmıştır. Daha sonra kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri;

$$F_L = \cos \beta \cdot P_{ort} \cdot l ; F_D = \sin \beta \cdot P_{ort} \cdot l \quad (6.3)$$

Denklemleri ile bulunmaktadır. Kaldırma kuvvet katsayısı;

$$C_L = F_L / (0.5 \cdot \rho_{hava} \cdot V^2 \cdot c) \quad (6.4)$$

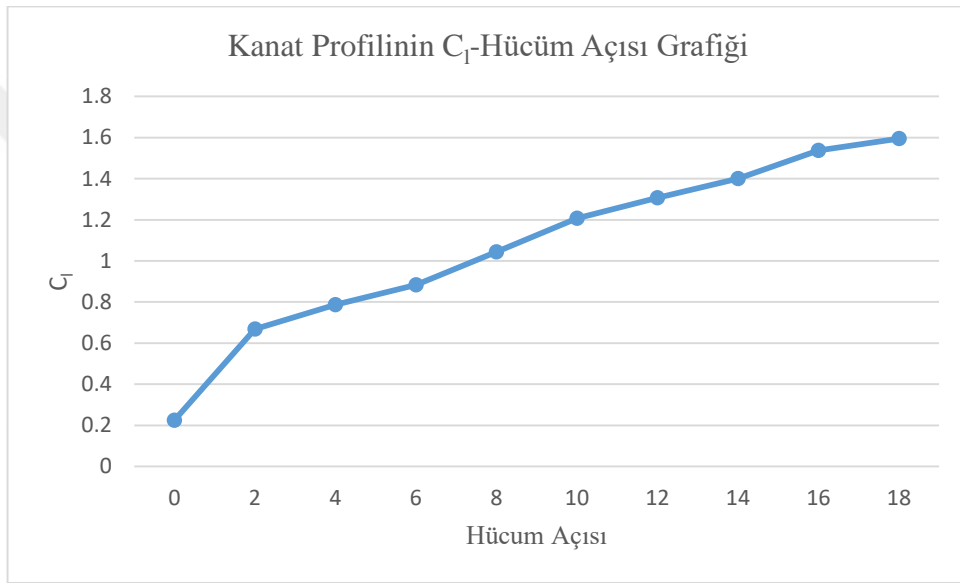
Denklemleri ile hesaplanmış olup sürüklenme kuvvet katsayısı;

$$C_D = F_D / (0.5 \cdot \rho_{hava} \cdot V^2 \cdot c) \quad (6.5)$$

Denklemleri ile hesaplanmıştır. Deney kanat profilinin uzatılması ile elde edildiği için formüllerde alan yerine veter uzunluğu (c) kullanılmıştır.

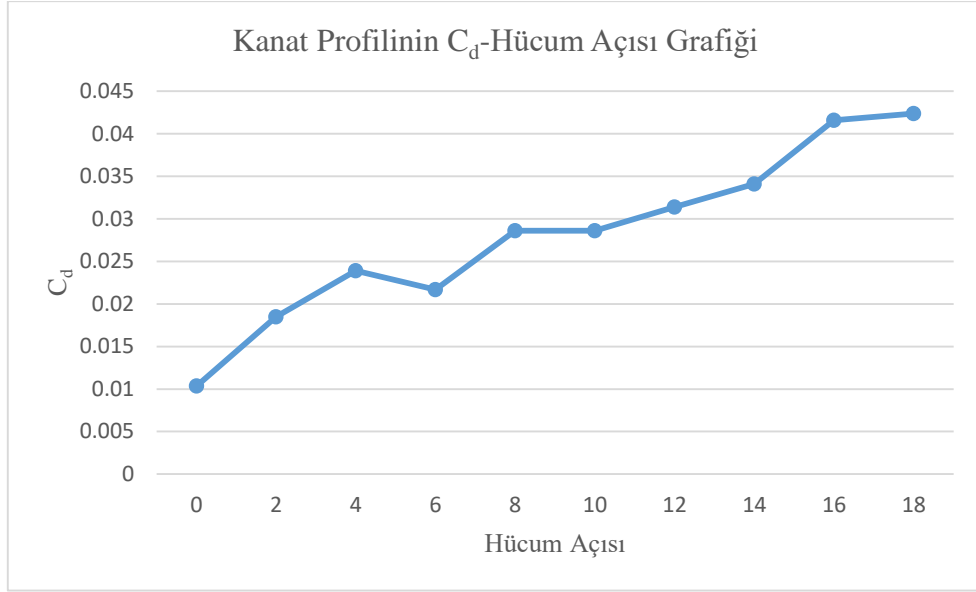
Yukarıdaki formüllerden her bir basınç noktası için bulunan kaldırma ve sürüklenme kuvvet katsayıları vektörel olarak kendi aralarında toplanarak; profil için toplam sürüklenme ve kaldırma kuvvet katsayıları hesaplanmıştır.

Küt firar kenarlı kanat için gerçekleştirilen deneyde elde edilen  $C_l$  sonuçları Şekil 6.4 'te hücüm açılarına göre belirtilmiştir. Grafiğe göre;  $6^\circ$  hücüm açısında  $C_l$  değeri yaklaşık 0.9 olarak elde edilmiştir,  $10^\circ$  hücüm açısında bu değer 1.2 'ye yaklaşmıştır. Deney son olarak  $18^\circ$  hücüm açısında gerçekleştirilmiştir. Burada kaldırma kuvvet katsayısı yaklaşık olarak 1.6 olarak elde edilmiştir. Elde edilen değerler uygun görünmektedir.



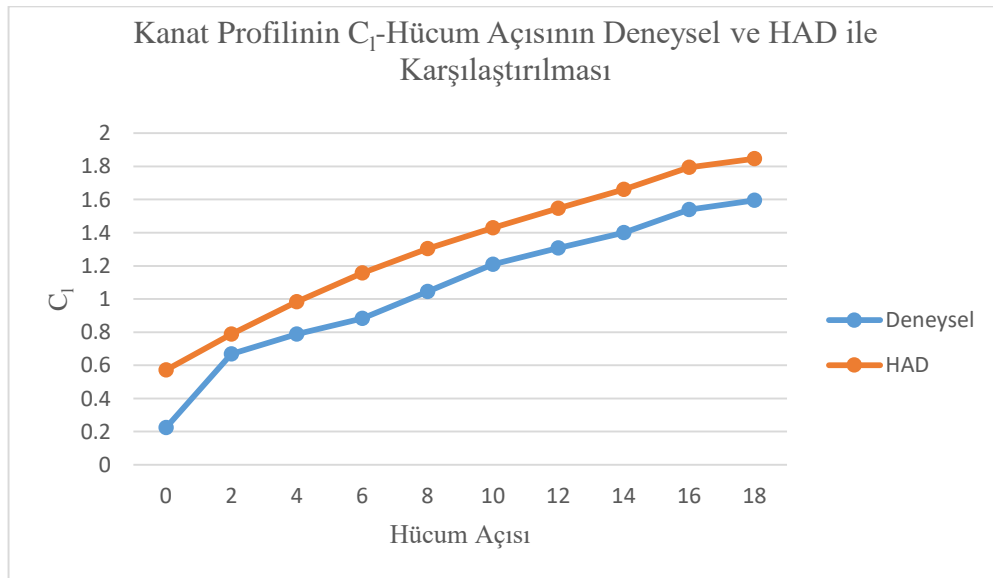
Şekil 6. 4.Küt firar kenarlı kanat profilinin  $C_l$ -hücüm açısının deneysel sonuçları

Küt firar kenarlı kanat için gerçekleştirilen deneyde elde edilen  $C_d$  sonuçları Şekil 6.5 'te gösterilmektedir. Grafiğe göre;  $0^\circ$  hücüm açısında  $C_d$  değeri yaklaşık 0,01 olarak elde edilmiştir.  $4^\circ$  hücüm açısına kadar bu değer 0.024 'e kadar çıkmıştır. Fakat  $6^\circ$  hücüm açısına kadar sürüklenme kuvvet katsayısı bir miktar düşerek 0.022 sonucu elde edilmiştir. Sonraki hücüm açılarında sürüklenme kuvvet katsayıları yükselişe geçerek  $18^\circ$  hücüm açısında 0.042 değeri elde edilmiştir.



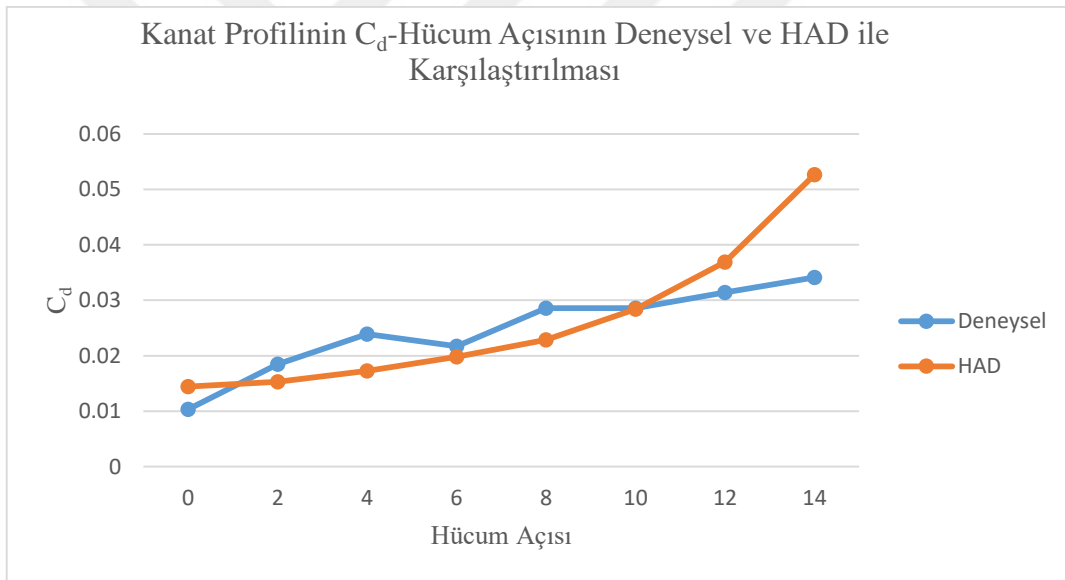
**Şekil 6. 5.**Küt firar kenarlı kanat profilinin  $C_d$ -hücum açısının deneysel sonuçları

Küt firar kenarlı kanat için gerçekleştirilen deneyde elde edilen  $C_l$  sonuçlarının HAD yöntemi ile elde edilen sonuçlarla kıyaslanması Şekil 6.6 'da gösterilmektedir. Sonuçlara göre HAD yöntemi ile elde edilen sonuçların, deneysel olarak elde edilen sonuçlardan biraz yüksek olduğu görülmektedir. Analiz sonuçları ile deneysel sonuçlarının normal şartlarda birebir olması beklenmez. Sonuçlar arasındaki fark ortalama % 11 dolaylarındadır. Bu da sonuçlar arasındaki farkın kabul edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir.



**Şekil 6. 6.**Küt firar kenarlı kanat profilinin  $C_l$ -hücum açısının deneysel ve HAD ile karşılaştırılması

Küt firar kenarlı kanat için gerçekleştirilen deneyde elde edilen  $C_d$  sonuçlarının HAD yöntemi ile elde edilen sonuçlarla kıyaslanması Şekil 6.7 'de gösterilmektedir. Sonuçlara göre HAD yöntemi ile elde edilen sonuçların, deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile  $12^\circ$  hücum açısına kadar % 3 oranında farklılık gösterdiği görülmektedir. Fakat  $14^\circ$  hücum açısından sonra deneysel olarak elde edilen sürüklenme kuvvet katsayısının HAD yöntemi ile elde edilen sonuçlara göre daha düşük seviyelerde artış yaptığı görülmektedir. Genel olarak hücum açısı arttıkça; kanat profili üzerindeki hava, kanadı daha erken terketmeye başlamaktadır. Bu sebeple oluşan girdaplar HAD yöntemi ile daha zor çözülebilmektedir. Fakat genel tabloya bakıldığında deneysel sonuçlar ile HAD yöntemi sonuçlarının arasındaki farkın kabul edilebilir seviyede olduğu görülmektedir.



Şekil 6. 7.Küt firar kenarlı kanat profilinin  $C_d$ -hücum açısının deneysel ve HAD ile karşılaştırılması

Hücum açısı arttıkça meydana gelen akış ayrılmalarındaki girdap ve türbülanslardan dolayı  $C_d$  değerindeki değişimler Şekil 6.7 'de görülmektedir.

#### **Deneysel çalışmanın belirsizlik analizi;**

Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların doğruluğu, ölçülen değerlerin doğruluğuna bağlıdır. Deneyler sırasında sonuçların doğruluğunu etkileyen farklı nedenlerden ortaya çıkabilecek hatalar olabilir. Deney sonuçlarında elde edilen hatalar;

deneyi yapan kişiden ve deney seti veya ölçü araçlarının yapısından kaynaklanabilir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyde iki farklı hata durumu mevcuttur.

Birincisi; yapılan deney çalışmasında, deney seti üzerinde bulunan ve kanadın üzerindeki basınç noktalarındaki basıncı hesaplamamıza yardımcı olan manometre bulunmaktadır. Manometrenin hareketli olmasından dolayı buradaki değerlerin yanlış okunma durumu olabilir.

İkincisi; kanadın üstünde ve altında bulunan basınç delikleri bir el aleti ile açıldı. Daha sonra bu deliklerin konumu bir elektronik kumpas ile ölçülerek 3D model üzerine aktarıldı. Buradaki ölçümler sırasında, ölçümü yapan kişiden kaynaklanan hatalar olabilir.

Bu çalışma kapsamında; belirlenen hataların deney sonuçlarına olan etkisini doğru yorumlayabilmek için belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. Belirsizlik analizi bize sonuçların hassasiyeti hakkında yöntemsel bir yaklaşım sunar. n adet bağımsız değişkeni olan bir ölçümde; ölçülecek boyut: R, ölçümü etkileyen değişkenler:  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , bağımsız değişken ile ilgili hata oranı:  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  olarak tanımlanabilir. Toplam hata oranı ise;

$$W_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.6)$$

Denklemler ile tanımlanabilir. Denklem 6.1-6.5 kullanılarak  $C_d$  ve  $C_l$ ;

$$C_d = (\sin \beta \cdot l \cdot \rho_{su} \cdot g \cdot (h_1 + h_2)) / (\rho_{hava} \cdot c \cdot V^2) \quad (6.7)$$

ve

$$C_l = (\cos \beta \cdot l \cdot \rho_{su} \cdot g \cdot (h_1 + h_2)) / (\rho_{hava} \cdot c \cdot V^2) \quad (6.8)$$

Olarak yazılabilir. Bu denklemlerde  $l$ , 1 mm; manometreden okunan  $h$  değerlerinin belirsizliği de 1 mm 'dir.  $C_l$  ve  $C_d$  'nin belirsizlik oranı  $0^\circ$  hücum açısında ve kanat profilinin üst bölgesindeki 6-7 basınç noktaları arasındaki ölçüm için hesaplanmıştır.  $C_d$  'nin belirsizlik oranı % 0.155 iken;  $C_l$  'nin belirsizlik oranı % 3.5 olarak hesaplanmıştır. Örnek olması açısından yapılan hesaplamalar Denklem 6.9-6.11 'de verilmiştir.



$$W_{Cd} = \pm \left[ \left( \frac{\partial Cd}{\partial l} wl \right)^2 + \left( \frac{\partial Cd}{\partial h_1} wh_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial Cd}{\partial h_2} wh_2 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.9)$$

$$W_{Cd} = \pm \left[ \left( \frac{0.01035}{0.015} 0.001 \right)^2 + \left( \frac{0.01035}{0.011} 0.001 \right)^2 + \left( \frac{0.01035}{0.01} 0.001 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.10)$$

$$W_{Cd} \times 100 = 0.155 \quad (6.11)$$



## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş olan 2D-3D analizler ve deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen veriler ve öneriler aşağıdaki başlıklarda özetlenmiştir.

### 7.1. Sonuçlar

Bu çalışma 1.44 m rotor çapında bir NACA 4415 kanat profiline sahip yatay eksenli rüzgâr türbin kanadının firar kenarının % 2 oranında kalınlaştırılması sonucunda elde edilen bir kanat profilinin elde edilmesi ve bu iki kanat profilinin kıyaslanması için yapılmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- QBlade programı ile NACA 4415 kanat profilinden optimum küt firar kenarlı bir kanat profili elde edilmiştir. Elde edilen optimum firar kenarı veter çizgisinin altında kalacak şekilde % 2 'lik kalınlığa sahiptir.
- Türetilen kanat profili ve NACA 4415 kanat profilinin HAD yöntemi ile 2D olarak analizleri gerçekleştirilmiş;  $C_l$ ,  $C_d$  ve  $C_l/C_d$  değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre türetilen kanat profilinin NACA 4415 kanat profilinden daha verimli olduğu belirlenmiştir.
- Türetilen kanat profiline ve NACA 4415 kanat profiline sahip kanatlar bir cad modelleme programı kullanılarak modellenmiştir.
- Modellenen kanatlar HAD yöntemi kullanılarak 3D analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre; küt firar kenarlı kanattan elde edilen tork 5.12 Nm iken; NACA 4415 kanat profiline sahip kanattan elde edilen tork 4.42 Nm dir. Türetilen profilin daha verimli olduğu belirlenmiştir.
- Türetilen kanat profilinin bir rüzgâr tüneline 2D deneysel çalışması yapılmıştır. Sonuçların, gerçekleştirilen HAD sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.

### 7.2. Öneriler

Bu tez çalışmasının sonucunda başka çalışmalarda dikkate alınmak üzere aşağıdaki öneriler verilebilir.

- Kanat profilleri arasında aerodinamik açıdan en verimli profilin bulunması için QBlade programının hızlı ve doğru sonuçlar vermesi açısından kullanılabilir.
- Bu çalışma kapsamında NACA 4415 kanat profili esas alınarak küt firar kenarlı bir kanat oluşturulmuştur; farklı kanat profilleri için küt firar kenarlı profiller için tasarım çalışmaları yapılabilir.



## KAYNAKLAR

- Ackerman, T., Soder, L., 2002, An Overview of Wind Energy Status, Renewable and Sustainable Energy Review, vol.6, p: 67-128.
- Aerodynamics For Students, Auld D.J., Srinivas K., 2008, Webtextbook, (Web Sayfası: <http://www.cam.ac.uk>),
- Anderson J. D., "Computational Fluid Dynamics", McGraw-Hill, 1995.
- Anderson J.D., "Fundamentals of Aerodynamics", McGraw Hill Book Company, New York, 1986.
- Ansys, 2007, Fluent Incorporated Fluent Version 12, User's Guide.
- Ansys, 2012, Ansys Theory Guide 12.0, ANSYS inc
- Ansys, 2015, Ansys Fluent Theory Guide 15.0, ANSYS inc.
- Burgman, S., Briicker, C., Shroder, W., 2006, Scanning PIV Measurements of a Laminer Separation Bubble, Experiments in Fluids, 41: 319-326.
- Büyükmert, A., 2006, Rüzgar Türbini Tahrikli Bir Isı Pompasının Kullanılabilirliği, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Canpolat, Ş., 2013, Rüzgar Enerjisi ve Isparta Şartlarında Prototip Bir Rüzgar Türbini Tasarımı, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Cengiz, Ç., 2010, Slatlı Kanat Profiline Etrafındaki Düşük Reynolds Sayılı Hava ve Su Akışlarının İncelenmesi ve Aerodinamik Performans Analizleri, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Chao, D. D., Cessna Aircraft Company, Wichita, KS, 2007, Computational Aerodynamic Analysis of a Blunt Trailing-edge Airfoil Modification to the NREL Phase VI Rotor
- Çelik, B., "Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Tasarım ve Prototip İmalatı", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 9-47(2001).
- Daradeli, S., "Rüzgar Enerjisi", Temiz Enerji Vakfı, Ankara, 5-22 (2001).
- Derya, H.T., 2010, İkili Kanat Profili Etrafındaki Düşük Reynolds Sayılı Hava ve Su Akışlarının İncelenmesi ve Aerodinamik Performans Analizleri, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Diwan, S.S., Ramesh, O.N., 2007, Laminar separation bubbles: Dynamics and control, Sadhana, 32, 103-109.
- Erişen, A., Bakırcı, M., NACA 0012 VE NACA 4412 Kanat Kesitlerinin Yeniden Tasarlanarak Had ile Analiz Edilmesi, Journal of Engineering and Technological

Science, 2014/1.

- Gaster, M., 1967, The structure and behaviour of separation bubbles, RC R and M, 3595.
- Genç, M.S., 2009, Kanat profilleri etrafındaki düşük Reynolds sayılı akışı kontrolü ve aerodinamik performansın incelenmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri , Enstitüsü, Doktora Tezi, 155 s.
- Güven, Ş.Y., Üçgül, İ., Şenol, R., (2004) Güneş Enerjisi Isı Uygulamaları ve Güneş Kulelerinin İncelenmesi. Mühendis ve Makine Haziran- sayı 533.
- Habalı S., M., “Local Design Testing and Manufacturing of small mixed Airfoil Wind Turbine Blades of Glass Fiber Reinforced Plastics”, Energy Conversion Management, 41, 16 May 1999, 249-28
- Hain, R., Kahler, C., Radespiel, J., 2009, Dynamics of Laminar Separation Bubbles at Low Reynolds Number Aerofoils, Journal of Fluid Mechanics, 630: 129-153.
- Hanağasıoğlu, M., 1999, Wind Energy in Turkey, Renewable Energy, vol.16, p.822-827.
- Hau E., "Windkraftanlagen", B. G. Toubner verlag, Stuttgart, 1996, 120-151
- Hoffmann, M. J., Ramsey, R. R., Gregorek, G. M., 1996, Effects of Grit Roughness and Pitch Oscillations on the NACA 4415 Airfoil, The Ohio State University
- Laitone, E.V., 2001, Wind tunnel tests of wings and rings at low Reynolds numbers, Fixed and Flapping Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications, Ed. T.J. Mueller, AIAA Progress Series 165, 594 pp.
- Katz, J., Plotkin, A., 1991, Low-Speed Aerodynamics from Wing Theory to Panel Methods, McGraw-Hill, Inc, 632 pp.
- Kaya, M. N., 2019, Eğimli Bir Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Kanadının Aerodinamik Tasarımı ve Optimizasyonu, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- King R.M., 2001, Study of an Adaptive Mechanical Turbulator for Control of Laminar Separation Bubbles, Degree of Masters of Science Thesis, Graduate Faculty of North Carolina State University, Aerospace Engineering, 109 pp.
- Köse F., Kaya M. N., 2012, The Importance of Renewable Energy Sources for Sustainable Development in Turkey, 1th International Conference Sustainable Business and Transitions for Sustainable Development, Konya.
- Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., 2000, Wind Energy Explained: Theory, design and application, Second Edition, Massachusetts University, USA.

- Martin O.L. Hansen, 2008, Chapter 2 2-D Aerodynamics“, Aerodynamics of wind turbine Second Edition, Earthscan, UK and USA.
- Menter, F.R., Langtry, R.B., Likki, S.R., Suzen, Y.B., Huang, P.G., Vólker, S., 2004, A correlation-based transition model using local variables: Part I Model formulation ASME-GT2004-53452, Proceedings of ASME Turbo Expo 2004, Vienna, Austria.
- Menter, F.R., 1994, Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA Journal, 32 (8):1598-1605.
- Modı, 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.
- Nash, J., Quincey, V., and Callinan, J., "Experiments on Two-Dimensional Base Flow at Subsonic and Transonic Speeds," ARC R&M No. 3427, Aeronautical Research Council, 1966.
- Nash, J, "A Discussion of Two-Dimensional Turbulent Base Flows," ARC R&M No. 3468, Aeronautical Research Council, 1967.
- 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
- Önder, M., 2006, Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini Kanadının Bilgisayar Destekli Tasarımı ,Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özcan, İ., 2011, Isparta İlinde Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi ve Bir Rüzgar Santrali Tasarımı, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özgener, Ö., “DEU MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ FEN ve MÜHENDİSLİK DERGİSİ” Cilt:4 Sayı:3 sh. 159- 173 Ekim 2002
- Özgür, M.A., 2006, Kütahya Rüzgar Karakteristiğinin İstatistiksel Analizi ve Elektrik Üretimine Uygulanabilirliği, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Petersen, EL., Mortensen, NG., Landberg, L., Hojstrup, T., Frank, HP., 1998, Wind Power Meteorology, Part I, Climate and Turbulance, Wind Energy, vol.1, p.25-45.
- Righter, R. W., 1996, Wind energy in America: A history, University of Oklahoma Press
- Rinioie, K., Takemura, N., 2004, Oscillating Behaviour of Laminar Separation Bubble formed on an Aerofoil near Stall, The Aeronautical Journal, 108: 153-163.
- Ronit K. Singh, M. Rafiuddin Ahmed, Mohammad Asid Zullah, Young-Ho Lee, 2011,

Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind Turbines.

- Saliveros, E., 1988, The Aerodynamic Performance of The NACA 4415 Aerofoil Section at Low Reynolds Numbers, Department of Aerospace Engineering University of Glasgow.
- Schubauer, G.B., Skramstad, H.K., 1947, Laminar boundary layer oscillations and stability of laminar flow, *Journal of Aeronautical Sciences*, 14: 69-78.
- Spera, D. A., 1994, *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts in Wind Turbine Engineering*, New York, ASME Press.
- Suzen, Y.B., Huang, 2000, P.G., An intermittency transport equation for modeling flow transition, AIAA-2000-0287, 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, 10-13 January 2000.
- Suzen, Y.B., 2005, Numerical simulations of transitional flows in low-pressure turbines using an intermittency transport model, University of Kentucky Department of Mechanical Engineering.
- Tani, I., 1964, Low Speed Flows Involving Bubble Separations, *Progress in Aerospace Sciences*, 5: 70-103.
- Tanner, M., "New Investigation for Reducing the Base Drag of Wings With a Blunt Trailing Edge," *Aerodynamic Drag*, AGARD-CP-124, 1973, pp. 12-1–12-9.
- Ushiyama, I. ve Nagai, H., 1988, "Optimum Design Configurations and Performance of Savonius Rotors" *Wind Engineering* Vol. 12 (1), 59-75.
- Van Dam, C. P., ve Kahn, D. L., 2005, *Trailing Edge Modifications for Flatback Airfoils*, Department of Mechanical and Aeronautical Engineering University of California
- Van Dam, C. P., Edward, A. M., Chao, D. D., Berg, D. E., 2008, *Computational Design and Analysis of Flatback Airfoil Wind Tunnel Experiment*, Prepared by Sandia National Laboratories
- Walker, J., F., Jenkins, N., "Wind Energy Technology", John Wiley & Sons, New York, 17-74 (1997).
- Walters, D.K., Leylek, J.H., 2005, Computational fluid dynamics study of wake induced transition on a compressor-like flat plate, *Transactions of the ASME*, 127,52-63.
- Wilcox, D.C., 1998, *Turbulence modeling for CFD*, DCW Industries, Inc., La Canada, California.
- Wiley, J., 1997, *Wind Energy Technology*
- Wind Power, 2003, *A Growing Renewable Energy Resource*, erişim:

<http://geology.wisc.edu/geo411/hassel-man.html>

White, F.M., 1991, Viscous fluid flow, Second edition, McGraw-Hill Inc., New York.

Yang, Z., Haan, L.F., Hui, H., 2007, An Experimental Investigation on the Flow Separation on a Low-Reynolds Number Airfoil. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno Nevada.

Yerebakan, M., 2001, Rüzgar Enerjisi, İstanbul Ticaret Odası Yayınları, Yayın No: 2001-33, İstanbul.

Yükselen, 2017, Aerodinamik Ders Notları, Erişim Tarihi: 03.02.2018.





**EKLER****EK-1. NACA 4415 Kanat Profilinin Koordinatları**

<b>x koordinatı</b>	<b>y koordinatı</b>
1.00000	0.00000
0.99893	0.00039
0.99572	0.00156
0.99039	0.00349
0.98296	0.00610
0.97347	0.00932
0.96194	0.01303
0.94844	0.01716
0.93301	0.02166
0.91573	0.02652
0.89668	0.03171
0.87592	0.03717
0.85355	0.04283
0.82967	0.04863
0.80438	0.05453
0.77779	0.06048
0.75000	0.06642
0.72114	0.07227
0.69134	0.07795
0.66072	0.08341
0.62941	0.08858
0.59755	0.09341
0.56526	0.09785
0.53270	0.10185
0.50000	0.10538
0.46730	0.10837
0.43474	0.11076
0.40245	0.11248
0.37059	0.11345
0.33928	0.11361
0.30866	0.11294
0.27886	0.11141
0.25000	0.10903
0.22221	0.10584
0.19562	0.10190
0.17033	0.09726
0.14645	0.09195
0.12408	0.08607
0.10332	0.07970
0.08427	0.07283
0.06699	0.06541
0.05156	0.05753

0.03806	0.04937
0.02653	0.04118
0.01704	0.03303
0.00961	0.02489
0.00428	0.01654
0.00107	0.00825
0.00000	0.00075
0.00107	-0.00566
0.00428	-0.01102
0.00961	-0.01590
0.01704	-0.02061
0.02653	-0.02502
0.03806	-0.02915
0.05156	-0.03281
0.06699	-0.03582
0.08427	-0.03817
0.10332	-0.03991
0.12408	-0.04106
0.14645	-0.04166
0.17033	-0.04177
0.19562	-0.04147
0.22221	-0.04078
0.25000	-0.03974
0.27886	-0.03845
0.30866	-0.03700
0.33928	-0.03547
0.37059	-0.03390
0.40245	-0.03229
0.43474	-0.03063
0.46730	-0.02891
0.50000	-0.02713
0.53270	-0.02529
0.56526	-0.02340
0.59755	-0.02149
0.62941	-0.01958
0.66072	-0.01772
0.69134	-0.01596
0.72114	-0.01430
0.75000	-0.01277
0.77779	-0.01136
0.80438	-0.01006
0.82967	-0.00886
0.85355	-0.00775
0.87592	-0.00674
0.89668	-0.00583
0.91573	-0.00502
0.93301	-0.00431
0.94844	-0.00364

0.96194	-0.00297
0.97347	-0.00227
0.98296	-0.00156
0.99039	-0.00092
0.99572	-0.00042
0.99893	-0.00011
1.00000	0.00000



**EK-2. Türetilmiş Kanat Profilinin Koordinatları**

<b>x koordinatı</b>	<b>y koordinatı</b>
1.00000	0.00000
0.99893	0.00039
0.99572	0.00156
0.99039	0.00349
0.98296	0.00610
0.97347	0.00932
0.96194	0.01303
0.94844	0.01716
0.93301	0.02166
0.91573	0.02652
0.89668	0.03171
0.87592	0.03717
0.85355	0.04283
0.82967	0.04863
0.80438	0.05453
0.77779	0.06048
0.75000	0.06642
0.72114	0.07227
0.69134	0.07795
0.66072	0.08341
0.62941	0.08858
0.59755	0.09341
0.56526	0.09785
0.53270	0.10185
0.50000	0.10538
0.46730	0.10837
0.43474	0.11076
0.40245	0.11248
0.37059	0.11345
0.33928	0.11361
0.30866	0.11294
0.27886	0.11141
0.25000	0.10903
0.22221	0.10584
0.19562	0.10190
0.17033	0.09726
0.14645	0.09195
0.12408	0.08607
0.10332	0.07970
0.08427	0.07283
0.06699	0.06541
0.05156	0.05753
0.03806	0.04937
0.02653	0.04118

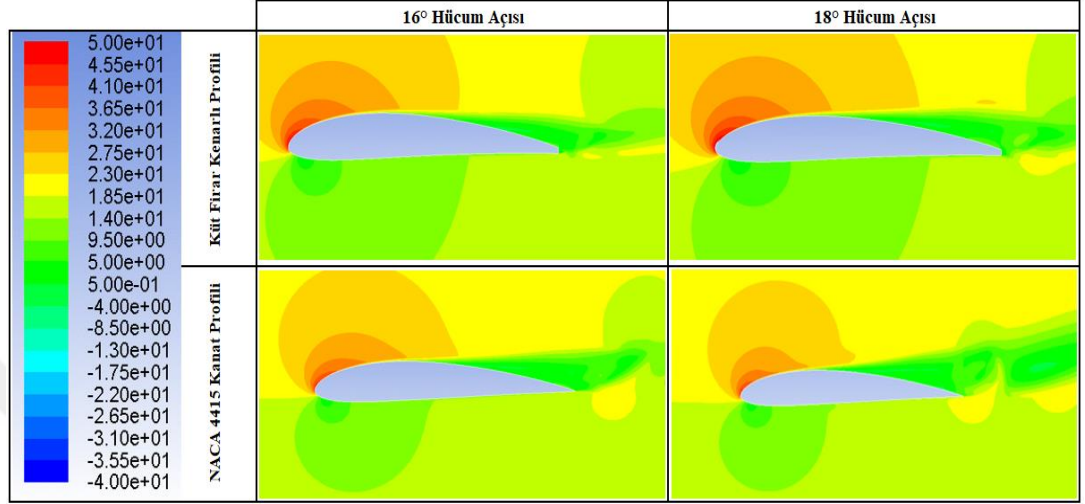
0.01704	0.03303
0.00961	0.02489
0.00428	0.01654
0.00107	0.00825
0.00000	0.00075
0.00015	-0.00211
0.00081	-0.00494
0.00227	-0.00817
0.00445	-0.01122
0.00730	-0.01406
0.01031	-0.01641
0.01411	-0.01892
0.01727	-0.02073
0.02176	-0.02297
0.02615	-0.02486
0.03103	-0.02675
0.03676	-0.02873
0.04217	-0.03039
0.04861	-0.03210
0.05436	-0.03343
0.06075	-0.03472
0.07231	-0.03664
0.08522	-0.03827
0.10987	-0.04034
0.13459	-0.04141
0.15932	-0.04177
0.18406	-0.04165
0.20880	-0.04116
0.23352	-0.04038
0.25824	-0.03938
0.28295	-0.03825
0.30766	-0.03704
0.33237	-0.03581
0.35708	-0.03457
0.38179	-0.03334
0.40650	-0.03213
0.43121	-0.03094
0.45592	-0.02978
0.48063	-0.02865
0.50535	-0.02757
0.53007	-0.02654
0.55479	-0.02555
0.57951	-0.02463
0.60423	-0.02376
0.62896	-0.02296
0.65369	-0.02223
0.67842	-0.02157
0.70315	-0.02098

0.72788	-0.02046
0.75262	-0.02002
0.77735	-0.01966
0.80209	-0.01937
0.82683	-0.01917
0.85157	-0.01904
0.87631	-0.01900
0.90104	-0.01903
0.92578	-0.01915
0.95052	-0.01935
0.97526	-0.01963
1.00000	-0.02000



### EK-3. NACA 4415 ve Küt Firar Kenarlı Kanat Profillerinin 16° ve 18° Hücüm Açılarındaki Basınç Dağılımları

NACA 4415 Kanat profillerindeki akış ayrılmaları düzensiz olduğundan dolayı bu bölgelerde girdaplara yol açmaktadır.



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Enis DİLMAÇ  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : BİTLİS/1987  
**Telefon** :  
**Faks** :  
**e-mail** : enisdilmac@gmail.com

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Ankara Anadolu Lisesi	2006
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi	2012
Yüksek Lisans	: Konya Teknik Üniversitesi	2019
Doktora	:	

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2012-2014	Met Mühendislik	Tasarım Mühendisi
2014-2016	Mega Teknik	Tasarım Mühendisi
2016-2018	FİGES	Tasarım Mühendisi
2018-2019	TUSAŞ	Tasarım Mühendisi
2019-...	EnginSoft Turkey	Tasarım Müdürü

### UZMANLIK ALANI

Fikstür Tasarımı, Mekanizma Tasarımı, HAD, CAD, Askeri Araç Alt Bileşenleri, NX, Catia, Solidworks, KeyCreator