



**T.C.  
BATMAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGÂR TÜRBİNİ İÇİN FARKLI TİP UÇAK  
KANAT PROFİLLERİNİN SAYISAL OLARAK  
İNCELENMESİ**

**Serkan YILDIZ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Kasım-2017  
BATMAN  
Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Serkan YILDIZ tarafından hazırlanan "Rüzgâr Türbini İçin Farklı Tip Uçak Kanat Profillerinin Sayısal Olarak İncelenmesi" adlı tez çalışması 02/11/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.




### Jüri Üyeleri

**Başkan**  
Doç. Dr. Hasan BAYINDIR

**Danışman**  
Yrd. Doç. Dr. Hasan DÜZ

**Üye**  
Doç. Dr. Eşref BAYSAL

### İmza

  
.....  
  
.....  
  
.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Doc. Dr. Behanin İSÇAN



Bu tez çalışması ..... tarafından ..... nolu proje ile desteklenmiştir.

## **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.

Serkan YILDIZ

**ÖZET**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RÜZGÂR TÜRBİNİ İÇİN FARKLI TİP UÇAK KANAT PROFİLLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**Serkan YILDIZ**

**Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hasan DÜZ**

**2017, 103 Sayfa**

**Jüri**

**Danışman Yrd. Doç. Dr. Hasan DÜZ**

**Üye Doç. Dr. Hasan BAYINDIR**

**Üye Doç. Dr. Eşref BAYSAL**

Petrol ve kömürün bulunması ile yüz yıldır yakılan fosil yakıtlar atmosfere zararlı egzoz gazları salmaktadır. Zamanla atmosferde biriken bu egzoz gazları güneş ışığını fazla absorbe ederek küresel ısınmaya neden olmaktadır. Küresel ısınmanın önüne geçilememesi durumunda ise yakın gelecekte mevsim değişikliklerinin ve çevre felaketlerinin yaşanması ise kaçınılmaz olacaktır. Küresel ısınma problemi ve fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi zorunlu hale getirmiştir. Bugün rüzgâr ve güneş enerjisi yenilenebilir enerjiye geçişte en büyük potansiyele sahip enerjiler olarak görülmektedir. Rüzgâr enerjisinden yararlanma daha ucuz ve yüksek verimlerde yapılabildiğinden güneş enerjisine göre, bugün en çok yararlanılan bir enerji türü olmuştur. Bugün gücü 1MW aşan rüzgâr türbinleri ile enerji üretimi yapılabilmektedir. Bir rüzgâr türbinin verimi doğrudan kullanılan kanadın performansına bağlıdır. Bir kanadın performansı ise rüzgâr hızına ve hücum açısına göre değişkenlik gösterebilmektedir. Her durumda en iyi performansa sahip bir kanat profili bulmak ise imkânsızdır. Genel olarak bir kanadın performansı  $C_L / C_D$  oranı ile ölçülmektedir. Burada  $C_L$  kaldırma kuvveti katsayısı ve  $C_D$  ise sürükleme kuvveti katsayısıdır.

Bu çalışmada rüzgâr türbinlerinde kullanılmak üzere farklı kanatçık ailesinden beş kanat profili [www.m-selig.ae.illinois.edu](http://www.m-selig.ae.illinois.edu) sitesinden seçilmiştir. Seçilen bu kanatlar farklı hücum açılarında ( $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ ) ve farklı rüzgâr hızlarında (4, 8, 16 ve 32 m/s) performansları sayısal olarak test edilmişlerdir. Sayısal sonuçlar rüzgâr hızının artması tüm kanat performanslarını azalan bir eğimde artırdığını ve tüm kanat profillerinin  $4^\circ \leq \alpha \leq 7^\circ$  arası hücum açılarında en büyük performansları sergilediklerini göstermiştir. Kanat yüzeyi üzerinden basınç katsayı dağılımlarının incelenmesiyle iki farklı kanadın profil dataları birleştirilmiş ve yeni bir hibrid kanat profili oluşturulmuştur. Çıkan sayısal sonuçlara göre hibrid kanat profili  $4^\circ \leq \alpha \leq 7^\circ$  hücum açılarında her iki kanat profilinden daha yüksek performans göstermiş ve kalan diğer hücum açılarında ise her iki kanadın düşük performans dezavantajlarını gidererek tüm hücum açılarında daha kararlı bir performans sergilediği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** NACA0012 kanat profilleri, sayısal yöntemler, sayısal yazılımlar, HAD, türbülans, RANS

## ABSTRACT

MS/Ph.D THESIS

### NUMERICAL INVESTIGATION OF DIFFERENT TYPE AIRCRAFT WING PROFILES FOR WIND TURBINE

Serkan YILDIZ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF BATMAN  
UNIVERSITY

THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY  
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Yrd. Doç. Dr. Hasan DÜZ

2017, 103 Pages

Jury

Advisor Yrd. Doç. Dr. Hasan DÜZ

Member Doç. Dr. Hasan BAYINDIR

Member Doç. Dr. Eşref BAYSAL

Upon found of petroleum and coal, the fossil fuels burned in century has left much amount harmful exhaust gases to atmosphere. In the course of time, the accumulation of these exhaust gases in the atmosphere than limits has caused global warming due to the behavior of more sun rays absorbed. So the existence of environmental disaster and season changes in the near future will be unavoidable if the global warming not interfered on time. The consciousness on finite fossil fuels and global warming problem is obligated us to utilize from the renewable energies as soon as possible. Today sun and wind energy is the most available energy source in the world so to transit to renewable energy. Today the wind energy has been the most utilized one differed from the sun due to the utilization made at low cost and at high efficiencies. Today the electrical energy can be produced from the wind energy by means of the wind turbines which power exceed 1MW. The efficiency of a wind turbine is depend directly on the performances of the airfoil used. However the performance of an airfoil is changeable with attack angle and wind velocity so it is impossible to find an airfoil which represents the best performance at every condition. In general the performances of an airfoil is measured with the ratio of  $C_L/C_D$ . Here  $C_L$  is the lift force coefficient and  $C_D$  is the drag force coefficient.

In this study five different airfoil has been selected from different airfoil family available on [www.m-selig.ae.illinois.edu](http://www.m-selig.ae.illinois.edu) so to use on wind turbines. Their performances of those selected airfoils is tested numerically at different attack angles ( $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ ) and different wind velocities (4, 8, 16 ve 32 m/s). Numerical results has shown that the all the airfoils performances increase at a decreasing gradient as the wind velocity increases and the whole airfoil profiles represent maximum performances at the attack angles of  $4^\circ \leq \alpha \leq 7^\circ$ . On the observation of the pressure distribution on airfoil surfaces, the profile data of two different airfoil profiles is combined to form a new airfoil named as hybrid. According to the numerical results obtained, hybrid profile has represent higher performance than two airfoil profiles at attack angles of  $4^\circ \leq \alpha \leq 7^\circ$  and has shown a more stable performance at other remain attack angles by eliminating the disadvantages of the two airfoil profiles.

**Key words:** NACA0012 wing profiles, numerical methods, numerical software, HAD, turbulence, RANS

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada yardımını esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Hasan DÜZ ve diğer bölüm hocalarına teşekkürlerimi sunarım.

Serkan YILDIZ  
BATMAN-2017



## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÖNSÖZ .....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	ix
1 GİRİŞ .....	1
2 RÜZGÂR TÜRBİNİ İÇİN FARKLI TİP UÇAK KANAT PROFİLLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ .....	3
2.1 Literatür Araştırması.....	3
3 TEMEL KAVRAMLAR .....	9
3.1 Akış ve Akışkan Özellikleri.....	9
3.2 Basınç.....	9
3.2.1 Kaymama koşulu – Viskoz akış bölgesi.....	10
3.2.2 Laminer – Türbülanslı akış.....	10
3.2.3 Navier Stokes denklemleri ve Süreklilik.....	13
3.2.4 Türbülanslı akışlar.....	14
3.2.5 Hız yasaları ve boyutsuz mesafeler .....	18
4 HE SAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD).....	20
4.1 Hesaplama Aşamaları:.....	21
4.2 Ağdan Bağımsızlık ve Ağ Oluşturulması.....	22
4.3 Sınır Koşulları.....	22
4.3.1 Wall (çeper) sınır şartı.....	23
4.3.2 İçeri ve dışarı akış sınır şartları .....	23
4.3.3 Diğer sınır koşulları.....	23
4.4 Laminer Akışlarda HAD Çözümlemeleri.....	24
4.5 Türbülanslı Akışlarda HAD Çözümlemeleri.....	24

4.6	Sayısal Çözümleme.....	25
4.7	RANS Türbülans Modelleri.....	27
4.7.1	RANS Modeller.....	27
4.7.2	Hibrid modeller.....	27
4.7.3	Laminar akış çözüm.....	28
4.7.4	Sıfır denklemliler model.....	28
4.7.5	Bir denklemliler model.....	29
4.7.7	K-omega modelleri.....	30
4.7.8	Reynolds gerilme modelleri.....	32
4.7.9	Büyük eddy simülasyonu.....	33
4.7.10	Ayrık eddy simülasyonu (DES).....	34
5	KANAT YAPISI VE HAVANIN KUVVETSEL ETKİLERİ.....	35
5.1	Havanın Kuvvetsel Etkileri.....	36
5.1.1	Sürüklenme kuvveti:.....	37
5.1.2	Kaldırma kuvveti:.....	38
5.1.3	Hücum açısı ( $\alpha$ ).....	39
5.1.4	Kanattaki kamburluk.....	40
5.2	Aerodinamik Performansı Artırma Yöntemleri.....	41
5.2.1	Kaldırma kuvvetini artırma yöntemleri.....	41
5.2.2	Aerodinamik performansı artırmak için:.....	41
6	SAYISAL ÇÖZÜMLEME.....	44
6.1	Sayısal Analizler ve Modelleme.....	45
6.2	Geometride Ağ Oluşturulması.....	47
6.3	Ağdan Bağımsız Çözüm.....	48
6.4	Sayısal Sonuçlar ve Deneysel Karşılaştırma.....	53
6.5	Sayısal Sonuçların Analiz Edilmesi.....	54
6.5.1	FX 84-W-218 sayısal sonuçları.....	56
6.5.2	Selig S8036 sayısal sonuçları.....	59
6.5.3	Fx-63-137 sayısal sonuçları.....	62
6.5.4	EPPLER 58 sayısal sonuçları.....	64
6.5.5	GOE 795 sayısal sonuçları.....	67
6.6	Kanat Performanslarının Karşılaştırılması.....	69



7 BASINÇ VE HIZ DAĞILIMLARI .....	75
8 HİBRİD KANAT PROFİLİ.....	90
8.1 Sonuçlar.....	94
9 ÖNERİLER.....	98
10 KAYNAKLAR .....	99
11 ÖZGEÇMİŞ .....	103



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### KISALTMALAR

DNS	: Direct Numerical Simulation (Doğrudan Sayısal Simulasyon)
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
RANS	: Reynolds Averaged Navier Stokes (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes)
LES	: Large Eddy Simulation (Büyük Eddy Simulasyonu)
PPRC	: Polipropilen Random Copolimer, plastik boru
RMS	: Root Mean Square (ortalama karekök)
SST	: Shear Stress Transport (kayma gerilmesi taşınımı)
SGS	: Subgrid-Scale (alt ağ ölçeği)
bkn	: bakınız

### SİMGELER

A	: alan, $m^2$
a,b	: denklem (5.4) 'teki değişkenler
C	: courant sayısı
$C_s$	: Smagorinsky sabiti
D	: boru çapı, m
$D_H$	: hidrolik çap, m
$f$	: Darcy sürtünme faktörü
g	: yerçekim ivmesi, $m/s^2$
I	: türbülans yoğunluğu
k	: türbülans kinetik enerjisi, $kg\ m^2/s^2$
L	: boru uzunluğu, m
$l$	: en büyük türbülans ölçek uzunluğu, m
m	: kütle, kg
$m'$	: kütleli debi, kg/s
P	: basınç, Pa
$P'$	: anlık basınç çalkantı değeri, Pa
$P'_{RMS}$	: anlık basınç çalkantı RMS değeri, Pa
$\bar{P}$	: zaman ortalamalı basınç değeri, Pa
$\Delta P$	: basınç farkı, Pa
Re	: Reynolds sayısı
$Re_D$	: boru akışında Reynolds sayısı
$Re_x$	: plaka üzerinden akışta Reynolds sayısı
$Re_{krt}$	: laminardan türbülansa geçiş kritik Reynolds sayısı
$Re_{gç}$	: Tam gelişmiş türbülanslı akışta geçiş Reynolds sayısı
$Re_\theta$	: momentum kalınlık Reynolds sayısı
T	: sıcaklık, $^\circ C$
t	: zaman, s
$\Delta t$	: zaman adımı
u, v ve w	: sırasıyla x, y ve z yönlerindeki anlık hız bileşenleri, m/s
$u', v', w'$	: sırasıyla x, y ve z yönlerindeki anlık hız çalkantı bileşenleri, m/s
$u'_{RMS}$	: çalkantı hız bileşeni RMS değerleri, m/s
$\bar{u}$	: zaman ortalamalı akış hızı, m/s
U	: ortalama akış hızı, m/s

$u^*$	: sürtünme hızı, m/s
$u^+$	: boyutsuz hız
$u_t$	: en büyük türbülans hız ölçeği
$\nu$	: kinematik viskozite, $m^2/s$
$X_{kr}$	: laminardan türbülansa geçişte kritik mesafe, m
$X_{gç}$	: türbülanslı boru akışında hidrodinamik gelişme mesafesi, m
$X_{gç, laminar}$	: laminer boru akışında hidrodinamik gelişme mesafesi, m
$X_{mak}$	: merkezi aksenal hızın maksimum olduğu akış mesafesi, m
$x$	: akış yönündeki mesafe, m
$w(x)$	: $x$ değişkeninin belirsizliği
$y^+, z^+, x^+$	: sırasıyla boyutsuz duvar, açısız ve akış yönlü mesafeler
$\rho$	: akışkan yoğunluğu, $kg/m^3$
$\eta$	: kolmogorov ölçü, en küçük türbülans ölçeği
$\kappa$	: von karman sabiti
$\mu$	: akışkan viskozitesi, $kg/m.s$
$\mu_t$	: türbülans viskozitesi, $kg/m.s$
$\mu_{sgs}$	: sgs viskozitesi, $kg/m.s$
$\tau$	: kayma gerilmesi, Pa
$\tau_d$	: duvar kayma gerilmesi, Pa
$\tau_{lam}$	: laminar kayma gerilmesi, Pa
$\tau_{türb}$	: türbülans kayma gerilmesi, Pa
$\varepsilon$	: pürüzlülük yüksekliği
$\varepsilon^+$	: boyutsuz pürüzsüzlük
$\varepsilon'$	: türbülans kinetik enerji yayılma oranı
$\omega$	: türbülans frekansı
$\Phi$	: değişken
DIC	: görüntü Bilgisi Korelasyonu (Digital Image Correlation)

### Alt indisler

$d$	: duvar
$D$	: deney
$gç$	: geçiş
$krt$	: kritik
$lam$	: laminar
$mak$	: maksimum
$türb$	: türbülans
$S$	: sayısal
RMS	: Root Mean Square, ortalama karekök
$c$	: Viter uzunluğu [m]
$S$	: Kanat alanı [ $m^2$ ]
$\delta f$	: Flap uzunluğu [%c]
$\beta$	: Flap açısı [ $^\circ$ ]
$\alpha$	: Hücüm açısı [ $^\circ$ ]
$\rho$	: Yoğunluk [ $kg/m^3$ ]
$\mu$	: Viskozite [ $kg/m s$ ]
$U_\infty$	: Serbest akım hızı [ $m/s$ ]
$Re$	: Reynolds sayısı [ $=Vpc/\mu$ ]
$C_p$	: Basınç katsayısı
$C_L$	: Kaldırma katsayısı

$C_D$	:Sürüklenme katsayısı
$C_M$	:Moment katsayısı
$C_L/C_D$	:Kaldırma oranı
$Ma_{cr}$	:Kritik Mach sayısı



# 1 GİRİŞ

Enerji yaşamın sürdürülebilmesi için bugün çok daha önemli hale gelmiştir. Fosil yakıt rezervlerinin sınırlı miktarda olduğu düşüncesi tedirgin edici bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Eğer yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma fosil yakıtlarının yerine geçecek kadar geliştirilemezse gelecekte enerji yetersizliğinden dolayı şehirlerde yaşam sürdürülemez hale gelebilecektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma, gelecekte karşılaşılabilecek enerji problemlerin çözümünde önemli bir etkiye sahip olacağı açıkça görülebilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş fosil yakıt tüketimini azaltabileceği gibi tamamıyla ortadan da kaldırabilir bu daha çok gelecek araştırmalara bağlıdır. Güneş, rüzgâr, dalga, jeotermal, hidrolik ve biokütle gibi enerjiler önemli yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Günümüzde en çok araştırılan ve devreye sokulmak istenen iki önemli enerji güneş ve rüzgâr enerjisidir. Güneş enerjisinden yararlanma ısıtma amaçlı ve elektrik üretim amaçlı olabilmektedir. Güneş enerjisi bol olmasına rağmen kesikli olması, güneş modüllerinin yüksek maliyetli olması ve verimlerinin düşük olması nedeniyle rüzgâr enerjisi kadar hayata geçirilememiştir. Araştırmalar daha düşük maliyetli ve daha verimli güneş modülleri üretmek üzerine yoğunlaşmıştır. Bugün rüzgâr enerjisinden yararlanma ise oldukça büyük kapasitelere ulaşmıştır ve elektrik enerjisi tüketiminin kayda değer bir payını karşılayabilecek duruma gelmiştir. Bugün Gücü 1MW aşan türbinler ile rüzgâr enerjisinden yararlanılabilmektedir. Rüzgârın güçlü olması gece gündüz her zaman esebilmesi bu enerjiden yararlanmayı daha cazip hale getirmiştir. Uluslar gelecekte enerji tüketimlerinin önemli bir kısmını rüzgâr enerjisinden sağlamayı hedeflemektedirler ve bu gelecek yatırım planlarında yer alabilmektedir. Rüzgâr ilk olarak yel değirmenlerinde tahıl öğütme, kuyudan su çıkarma veya yelkenlerle gemileri yürütme amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca 19.yy. başlarında alternatif elektrik üretiminde kullanılabilmiştir. Fakat petrolün bulunması rüzgâr enerjisinden yararlanmayı bir tarafa bırakmıştır. Çünkü enerji artık kolay ulaşılabilirdi ve istenilen güç petrol ile elde edilebilmekteydi. Bu nedenle bu tür yenilenebilir enerji kaynakları araştırılması ve geliştirilmesi kesintiye uğramıştır. Günümüzde petrol rezervlerinin sınırlı olması ve tüketiminin global ısınmaya yol açması, yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma ve enerjinin optimum düzeyde kullanılması gibi etkenlerin araştırılması ve geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarından

yararlanma, var olan enerjinin optimum düzeyde kullanılması, enerji tüketim makinelerinde verimliliğin artırılması gibi konular bilim ve mühendislik alanlarında başlıca araştırma konusu haline gelmiştir. Şimdilerde hükümetler gelecek planlarında enerjinin önemli bir kısmını yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamayı hedeflemektedirler, bunun için araştırmalara önem vermekte ve ödenek ayrılabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmada bugün rüzgâr enerjisi en çok hayata geçirilen olmuştur. Bugün bölgelerin rüzgâr enerji potansiyelleri araştırılmakta ve çizelgeler halinde kayda alınmaktadır. Rüzgâr enerjisi kara sahasında yararlanıldığı gibi sahilden uzak denizlerden de yararlanılabilmektedir. Bu gibi alanlarda genelde rüzgâr hızının daha yüksek olduğu 60 m ve üstü yüksekliklerde rüzgâr gücünden yararlanma vardır. Bu büyük kapasiteli rüzgâr türbinleri ile yapılmaktadır. Bu rüzgâr türbinleri genelde üç kanatlıdır. Fakat küçük ve orta kapasiteler içinde çeşitli rüzgâr türbin tasarımları da geliştirilmiştir. Rüzgâr türbinlerinde kanat profiline yapısı, rüzgâr enerjisinin döngüsel harekete dönüştürülmesinde, önemli bir enerji dönüşüm rolüne sahiptir. Bir rüzgâr türbinin performansı, rüzgâr enerjisi dönüşümündeki verimiyle ölçülmektedir. Rüzgâr türbinin verimi ise; kanadın performansına bağlıdır. Kanadın performansı ise; kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti katsayıları belirlemektedir. Genelde kanat performansları rüzgâr tünellerinde test edilmektedir. Şimdiki zamanlarda ise sayısal çözücü bilgisayar programları ile de simule edilmekte ve performanslar ölçülmektedir. Sayısal sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulukları test edilir. Deneysel yöntem zaman alıcı, maliyetli ve yeterince detay veremeyendir. Bu nedenle sayısal yöntemlerden yararlanma bilgisayarların gelişmesi ile hız kazanmıştır. Örneğin akışkan akışları FLUENT ve CFX gibi akış çözücü programlar ile çözülmektedirler. Bu çalışmada verimi daha yüksek olan rüzgâr türbinleri oluşturmak için farklı kanat profilleri performansları yönünden değerlendirilmiştir. Performanslar sayısal yöntemle CFX akış çözücü program kullanılarak ölçülmüştür. Burada performanslar farklı rüzgâr hızlarında ve farklı hücum açılarında sayısal olarak değerlendirilmiştir.

## 2 RÜZGÂR TÜRBİNİ İÇİN FARKLI TİP UÇAK KANAT PROFİLLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Enerjiye gereksinimin her geçen gün artması ve fosil yakıt tüketiminin neden olduğu küresel ısınma gibi etkiler global ölçekte yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılması ve kullanılması konusunda çalışmalara hız kazandırmıştır. Rüzgâr enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarından arasında güneşten sonra ikinci büyük enerji kapasitesine sahiptir. Rüzgâr enerjisinin elektriğe dönüşümü güneşe göre yüksek verimli ve az maliyetli olmaktadır. Bu nedenle günümüzde kurulu rüzgâr enerji dönüşüm sistemleri en büyük kapasitelerden biri olmuştur. Pek çok gelişmiş ülkelerde sahalara yayılmış çok sayıda rüzgâr türbini ile elektrik enerjisi üretilmektedir. Rüzgâr enerjisi elektrik üretiminden yeterince yararlanabilmek için düşük maliyetli yüksek verimli ve uzun ömürlü rüzgâr türbinlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında farklı geometriye sahip uçak kanat profillerinin rüzgâr türbin kanadı olarak kullanılabilmesi için performansları sayısal olarak incelenecektir. Bunun için farklı kanat profil ailesinden beş profil araştırılacak olup bir tane 'de hibrit kanat oluşturuldu. Bunlar düşük Reynolds sayılı kanat profilleri olacaktır. Kanatların performansları, düşük hücum açılarında ve farklı rüzgâr akış hızlarında sayısal olarak incelenecektir. Türbülanslı akış alanı RANS denklemleri ile çözülecektir. Farklı türbülans viskozite modelleri ile çözümler sağlanacak ve çıkan sonuçlarla türbülans modellerin performansları karşılaştırılacaktır. Burada amaç orta ölçekli rüzgâr türbinleri için uygun kanat profillerinin tespit edilmesidir.

### 2.1 Literatür Araştırması

Havanın kanat üzerindeki kaldırma kuvveti ( $C_L$ ) ve sürüklenme kuvveti ( $C_D$ ) katsayıları rüzgâr tünellerinde yapılan deneysel çalışma ile ölçülmektedir. Gelişmiş bilgisayarların ortaya çıkması ile bu katsayılar artık sayısal yöntemlerle ölçülebilmekte ve kanat üzerindeki hava akışının simülasyonu yapılabilmektedir. Akışkan akışlarını sayısal yöntem kullanarak çözen pek çok akış çözücü program geliştirilmiştir. Bu sayısal akış çözücü programlar ile pek çok kanat profili test edilebilmektedir. Uygulamada kanat üzerinden akışlar için pek çok sayısal ve deneysel çalışma bulmak mümkündür. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir. Örneğin; Parezanovic ve ark. (2006) rüzgâr türbinleri için değişik kanat profilleri oluşturmak amacıyla NACA

63(2)215, FFA-W3-211 ve A-AIRFOIL kanat profillerini  $C_L$  ve  $C_D$ 'nin hücum açısıyla olan değişimleri yönünden incelemişlerdir. Tangler ve Somers (1995) aynı şekilde yatay eksenli rüzgâr türbinleri için NREL serisi kanat profillerini türbin kanat kökünden kanat ucuna kadar kaldırma kuvveti ve sürtünme kuvveti değişimlerini incelemişlerdir. Jang ve ark. (1998) Gurney flap ismini verdikleri yüzde bir ile yüzde üç veter uzunluğu arasında değişen düz flaplı NACA 4412 kanat profili için sayısal çalışma yapmışlardır. Geissler (2003) yaptığı sayısal çalışmada NLR 7301 kanat profilinin üzerindeki transonik akışın titreşim etkisini Spalart-Allmaras türbülans modeli ile incelemiştir.

Bermudez ve ark (2002) geliştirmiş oldukları kod 2 boyutlu potansiyel akış ile 2 boyutlu türbülanslı sınır tabakayı birleştirip NACA 0012 ile NACA 0015 kanat profilleri üzerindeki kaldırma kuvveti değişimini belirlemede kullanmışlardır. Bekka ve ark. (2010) NACA 0012 kanat profili üzerindeki akışa düşük hücum açılarında bakmışlar ve Spalart-Allmaras modeli ile birlikte Baldwin-Lomax,  $k-\omega$ ,  $k-\omega$  SST türbülans modelini test etmişlerdir. Yapılan testlerin sonucunda  $k-\omega$  dışındaki modellerin aynı performansı göstererek deneysel verilere daha yakın sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. King ve Johnson (1985) Baldwin-Lomax modelinin yetersiz olduğu üzerinde durmuş, bu modeli iyileştirmeye çalışmışlardır. Gatski ile birlikte alternatif bir model sunmuşlardır. Bu modellerin tümü daimi analizle oluşturulan modellerdir. Hücum açısı yükseldikçe akıştaki titreşimler ile birlikte türbülansın artacağı, o yüzden bu modellerin yetersiz kalacağı eleştirileri yapılmıştır.

Bertagnolio ve ark. (2005) rüzgâr türbini kanatları için RISO-B1-18 kanat profili etrafındaki akışı incelemişler ve Detached Eddy Simulation ile çözümleme yaptılar. NACA 64A-006 profili üzerindeki akışa odaklanan bu çalışmada diğer çalışmalarda olduğu gibi kaldırma kuvveti değişimi temel alındı. Kanat profilleri üzerindeki akışın Large Eddy Simulation kullanılarak analiz edilmiş çalışmaları Dahlström ve Davidson (2000) tarafından LESFOIL adlı bir projede dosyalanmıştır. Bu araştırmalar LES 'in kanat profilleri üzerindeki akışa uygulanabilirliğinin araştırılması üzerinedir. Ayrıca son olarak Shan ve ark. (2005) yapmış oldukları Direct Numerical Simulation yolunun kullanıldığı bu çalışmada, NACA 0012 kanat profilinin sayısal çözümlenmeleri altı derecelik hücum açısında yapılmış ve akış ayrılmasından kaynaklanan girdaplar yüksek ölçekli paralel çalışan bilgisayarlar kullanılarak incelendi.

Selig ve Granahan (2000) Amerika'da düşük hızlı rüzgâr bölgelerinde kullanılmak üzere yüksek verimli, sessiz ve küçük rüzgâr türbinlerini tasarlamak amacıyla E387, FX 63-137 (C), S822 (B), S834, SD2030 (B) ve SH3055 kanat



profillerini aerodinamik ve aeroakustik durumlarını rüzgâr tüneline deneysel olarak test etmişlerdir. Ulusal alanda ise Güleren ve Demir (2011) farklı geometriye sahip EPPLER 625, EPPLER 664, CLARK Y, Eiffel 10 (Wright), FX 69-PR-281 ve NACA Munk M-4 kanat profilleri için yüksek Reynolds sayısında ve düşük hücum açılarında ( $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ ) sayısal çözümleme yapmışlardır. Kanat profilleri,  $C_L-\alpha$  ve  $C_L/C_D-\alpha$  değerleri yönünden performansları incelenmiştir.

Genç ve ark. (2008) simetrik flaplı NACA0012 kanat profili üzerindeki aerodinamik kuvvet ve basınç dağılımını değişik uzunluk ve değişik açılara sahip flaplar için sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal sonuçlar flaplı kanatların kullanılması ile aerodinamik performansın  $15^\circ$  'lik flap açısına kadar arttığını göstermişlerdir. Derya (2010) doktora tez çalışmasında hava ve su ortamında, farklı hücum açılarında, farklı Re sayılarında, büyük-küçük kanat arasının farklı uzaklıklarında ve farklı kanat genişliği oranlarında FLUENT TM programıyla kanat profili performans yönünden sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çalışmalarında türbülanslı akışı çözmek için Realizable k-omega modelini tercih etmişlerdir. Yapılan hesaplar sonucunda, hava ile suda kullanılan kanat profilinin, NACA4412 kanat profiline göre aerodinamik performans değerlerinin daha yüksek olduğu görüldü. Çalışmalarında rüzgâr hızı 12 m/s'de ve su hızı üç farklı Re sayısında incelenmiştir. Yapılan çalışmaların amacı, rüzgar türbinleri için en iyi değerle sahip kanat profili yapmak, tasarlanan profil sayesinde rüzgar ile hidrokinetik enerjiden elektrik enerjisi üretmektir. Avcı ve Yılmaz (2012) çalışmalarında yatay eksenli, üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde kanatlar üzerinde meydana gelen gerilmeleri ve bozulmaları üniform alüminyum alaşım ve kompozit malzemeler E-glass/epoxy için sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında NACA 4415 kanat profili üzerinden hava akışlarını gerçekleştirmişlerdir. Malzeme özelliklerinin kanat yapısı için ne kadar önemli olduğu bu çalışma ile görülmüştür (malzeme biliminin önemi göz ardı edilmemeli).

Güleren ve Demir'in (2012) yaptıkları sayısal çalışmada rüzgâr türbinleri için farklı geometriye sahip 6 kanat profili, yüksek Reynolds sayılarında ve düşük hücum açılarında ( $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ ) incelenmiştir. İncelenmiş olan kanat profilleri  $C_L/C_D-\alpha$  farklılığı yönünden değerlendirildiğinde CLARK Y kanat profilinin en iyi değerleri elde ettiği görülmüştür. Tümü daimi çözümlerinin yapıldığı araştırmada, daimi çözümlerinin geçerliliğinin kanadın profillerine göre değişik hücum açısı ile sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu açılardan daha yüksek olduğu durumlarda, daimi analizlerde yakınsamanın gerçekleşmesinin olanaklı olmadığı fark edilmiştir. Seber ve ark. (2008)

şekil değiştirebilen kanatlarının olduğu insansız hava araçlarının dizaynı üzerinde durmuşlardır. Özellikle çok kademeli işlerde bu türdeki hava makinaları, sabit bir kanat geometrisine sahip olan klasik tasarımlara göre daha yüksek uçuş performansı gösteren ve yapı esnekliklerinden dolayı anlık uçuş değişikliklerine çok iyi uyum sağlamaktadır. Hava araçlarının sahip oldukları yapısal esneklik, kontrolü olmadığında tehlikeli aeroelastik sorunlara yol açabilmektedir. Belirtilen nedenlerden ötürü çalışmalar işe uygun kanatlarda kamburluk ve burulma etkileri konularında tasarım ile geliştirme üzerine olmuştur.

Kılıç'ın (2012) yaptığı çalışmada çift-kanatlı bir sistemin sayısal analizini NACA 0012 profilleri kullanarak yapılmıştır. Bu amaçla potansiyel akım-sınır tabaka birleştirme yöntemi kullanan XFLR5 yazılımından yararlanılmış, ayrıca FLUENT hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı vasıtasıyla hesaplamalar yapılmıştır. Her iki yöntemle elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu amaçla iki NACA0012 profili deneylerdeki konfigürasyonlar dikkate alınarak yerleştirilmiş ve bu konfigürasyonun aerodinamik karakteristikleri bir kez Hess-Smith panel yöntemi ile bir kez de FLUENT yazılımı ile hesaplanmıştır. Özden ve ark. (2015) NACA 4412 kanat profilinden 0.3 metre uzun olan rüzgâr türbini kanadı olan, oluşan akış kaynaklı deformasyonları lisans bitirme tezi kapsamında deneysel ve sayısal olarak incelediler. Kullanılan rüzgâr türbini kanadı deney için 3D yazıcı ile plastik malzemeden yapıldı. Deneyde deformasyonları gözlemlemek için; DIC sistemi ile kanadın üzerinde doğrudan ölçüm yapıldı. Sayısal analizde ise kanat profili üzerinde oluşan deformasyonlar FLUENT programı kullanılarak hesaplanmıştır. Deformasyon testlerinde kanat uçlarında en yüksek deformasyonlar sayısal ve deneysel sonuçlarda da görülmüştür. Sonuçlarda rüzgâr türbini kanat tasarımında burulma açısının optimizasyonunun değerini ortaya çıkarmıştır.

Seber ve ark.(2008) çalışmalarında NACA 4412 profilinin farklı kamburlara sahip kesitleri ile kanadın aerodinamik özelliklerini sayısal olarak araştırmışlardır. Çünkü hava araçlarının havanın kuvvetsel etkileri verimi değişik uçuş koşullarında değişik kambur değerlerine ihtiyaç duyar. Genel olarak kanat profilinin sahip olduğu kambur, flap olarak adlandırılan mekanizmalar tarafından kontrol edilir fakat son zamanlarda flap tipi kumanda yüzeylerini kullanmak yerine, çalışmalar kanat kesitinin şeklini bütün olarak değiştirilmesi üzerinde durulmuştur. Değişken kamburlu kanatlar ile tüm uçuş sürelerinde yüksek performanslar sağlanabilecektir.

Gölcük ve ark. (2015), düşük irtifa uzun uçuş süreli ve güneş enerjili insansız hava aracının kanatçık tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Taşıma kuvveti sonucu oluşan sürüklenme kuvvetinin kanat uçlarında oluşturduğu girdapları azaltarak hava aracının verimliliğini artırması için kullanılan yapı kanatçık olarak ifade edilir. Yapmış oldukları çalışmada, düzgünleştirilmiş Wortmann FX 63-137 kanat kesiti kullanılarak oluşturulan 0.35 m veter uzunluğuna ve 5 m kanat açıklığına sahip bir kanat için kanatçık tasarımı açıklamışlardır. Yaptıkları çalışmada; güneş enerjisi ile çalışan bir İHA sisteminin kanatçık tasarımı üzerine çalışmışlar ve farklı kanatçık parametreleri HAD kullanılarak analiz edilmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre; taşıma kuvveti katsayısında %7.1'lik bir iyileştirme gözlemlemişlerdir.

Kaya ve Koç (2015) günümüzde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli rüzgâr türbinleri, rüzgâr türbin kanatları, kanat profili ve kanatların özellikleri incelemişlerdir. Kanat imalatında kullanılan malzemeler ile imalat yöntemlerini araştırmışlardır. Sarıgöl ve ark. (2006), düşük Reynolds sayısı rejiminde farklı kanat profilleri için çırpın kanat hareketinin sayısal simülasyonunu yapmışlardır. Özden ve ark. (2015), NACA 4412 kanat profilinden 0.3 metre uzunluğunda rüzgâr türbini kanadında oluşan akıştan kaynaklı deformasyonlar lisans bitirme tezi kapsamında deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deformasyon sonuçlarında sayısal ve deneysel sonuçlar arasından farklılıklar tespit etmişlerdir. Erler ve ark. (2008) yaptıkları bu çalışmalarında %12,5 kalınlığında bir eliptik profil ile NACA 0015 kanat kesitinin üzerine yerleştirilen sentetik jetlerin akış üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir.

Akgül ve Hacıoğlu (2010), yaptıkları çalışmada, bir İHA tasarımını etkileyen parametreleri incelemiş, geometrik ve tasarım hesaplarını yapmışlardır. Özyetiş Ender, Alemdaroğlu Nafiz (2013), 05 Mach hızında uçabilen yüksek hızlı jet motorlu bir insansız hava aracının tasarımı ve üretim faaliyetleri ile ilgili çalışma yapmıştır. Önen ve Çınar (2010), yaptıkları çalışmada, NACA4412 kanat profili üzerinde aerodinamik kuvvet-basınç dağılımlarını hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı FLUENT ile analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda flaplı profillerde daha küçük hücum açılarında en yüksek taşımanın elde edildiğini görmüşlerdir. Onat ve Çetin (2003), rüzgâr tünelineki kanat profilinin dikey hareketinin modellenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Beş çeşit kanat profili üzerinde çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonuçlarına göre rüzgâr hızı arttıkça sistemin yer değiştirme genliği artmıştır.

Şentürk (2007), rüzgâr türbininin performansını analitik ve nümerik olarak incelenmiştir. Yılmaz ve ark. (2016), farklı rüzgar türbin Kanat profillerini aerodinamik

performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Rodríguez ve Morales (2014), yaptıkları çalışmada, gerçek hava folyosunun aerodinamik özelliklerini iyileştirmek için hava folyoları değerlendirilmiştir. Erişen ve Bakırcı (2014), NACA 0012 ve NACA 4412 Kanat profillerinin yeniden tasarlayarak had ile analiz etmişlerdir. Akıncı ve ark. (2011), yapılan çalışmada Airbus A350 XWB uçağının kanat ribi ve yakıt tankı diyaframlarının tasarımı çerçevesinde; parçaların boyutlandırma, yapısal analiz, yorulma ve hasar tolerans analizleri gerçekleştirmişlerdir.

Rişvanoğlu (2010), çalışmasında NACA profil ailesini tasarlayan bir çeşit bilgisayar yazılımı yapmıştır. Cengiz (2010), bu yüksek lisans çalışmasında; slatlı kanat profili etrafındaki düşük reynolds sayılı hava ve su akışlarını ve aerodinamik performans analizlerini incelemiştir.

Vardar ve Alibaş (2006), bu çalışmalarında NACA 23012 rüzgâr türbin kanadı performans testlerini gerçekleştirmişlerdir. Soğukpınar (2017), yaptığı çalışmada SST türbülans modelini kullanılarak 4 rakamlı NACA kanat profilleri olan; 0008, 0009, 0010, 0012, 0015, 0018, 0021, 0024 nümerik olarak analiz etmiştir. Saçıkara (2015), Bu çalışmada iki boyutlu akışta üç elemanlı bir kanat profilinin belirli bir açığa sahip flap elemanının pozisyonu üzerinde değişiklikler yapılarak (Taşıma Katsayısı) değişimi, HAD analizleri ile sayısal olarak incelenmiştir. Bakırcı ve ark. (2015), çalışmalarında, NACA 23012 ve NREL S809 kanat kesitlerinin aerodinamik performanslarını analiz etmiş ve karşılaştırmışlardır. Karasu ve ark. (2013), kanat profilleri üzerinde düşük Reynolds sayısında çalışma yapmıştır. Sonuçlara göre, hücum açısı arttıkça kabarcığın patladığını ayrıca ayrılan akışın mümkün olmadığını göstermiştir.

Genç (2010), geçiş modelini kullanılarak yüksek reynolds sayısında ince bir aerofoil üzerindeki (NACA64A006) akışın sayısal benzetimini yapmıştır. Aslan ve Kurtuluş (2016), çalışmalarında, ince bir füze kanadının sabit hızlı ses-üstü uçuş koşullarında ayrıca değişik hücum açılarında HAD analizleri yapmışlardır.

### 3 TEMEL KAVRAMLAR

#### 3.1 Akış ve Akışkan Özellikleri

Akışların durağan halindeki ve hareket halindeki hareketini inceleyen bilim dalıdır. Ayrıca akışkanların diğer akışkanlar ve katı cisimlerle oluşturdukları sınır etkileşimlerindeki davranışlarını inceler. Uygulamada sıkıştırılmaz (yoğunluğu değişmeyen) geçerli olan akışkanların (sıvılar, su, düşük hızlarda akan gaz vb.) hareketleri ile ilgili çalışmalar genellikle hidrodinamik olarak sınıflandırılır. Hidrodinamiğin alt dalı olan hidrolik, sıvıların boru ve açık kanallardaki akışı ile ilgilidir. Yüksek hızlı gaz akışlarının olduğu sıkıştırılabilir akışlar için ise gaz dinamiği olarak ele alınır. Bu tez konusunda kanat üzerinden hava akışı gerçekleştirildiğinde hava akışı sıkıştırılabilir akış durumundadır. Eğer hava akışı için Mach sayısı 0,3 'ten ( $M < 0,3$ ) küçükse hava akışı sıkıştırılmaz akış olarak değerlendirilebilir.

#### 3.2 Basınç

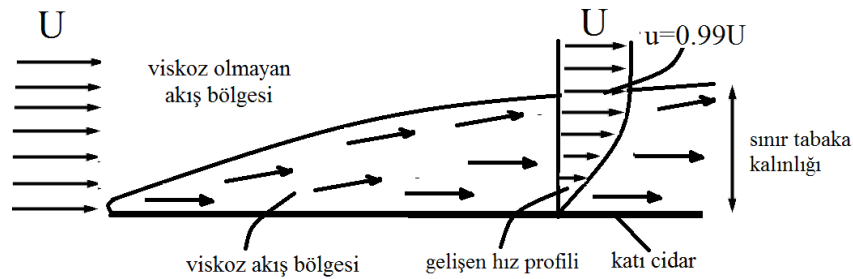
Birim alana gelen kuvvete basınç denir. Akışkanlarda, akışkanlar temas ettikleri yüzeylere basınç uygularlar. Basınç birimi alana gelen kuvvet olarak tanımlandığından,  $N/m^2$  birimine pascal ( $Pa$ ) denilmiştir.

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Burada  $P$  basınç,  $F$  kuvvet ve  $A$  ise temas yüzey alanıdır. Akışkan tarafından yapılan basınç etkin, vakum ve mutlak olmak üzere üç farklı şekilde okunabilir. Atmosfer basıncı atmosfer katmanının (hava katmanı) kendi ağırlığından dolayı yeryüzüne uyguladığı basınçtır. Atmosfer basıncının üstünde ölçülen basınçlara *etkin basınç* ve atmosfer basıncının altında ölçülen basınçlara ise *vakum basıncı* denir. Mükemmel vakum ( sıfır basınç) üzerinden ölçülen tüm basınçlara ise *mutlak basınç* denir.

### 3.2.1 Kaymama koşulu – Viskoz akış bölgesi

Akışların çoğu genelde akışkanların katı yüzeyler üzerindeki akışlarıdır. Yüzeyler üzerindeki akışın davranışını ve etkileşimini bilmek tasarım için önemli olup, etkileşimden dolayı oluşan sürtünme direncini yenecek kadar gerekli gücün hesabını yapmak veya oluşan sürtünme direncini azaltacak şekilde geometrisini modellemek de oldukça önemli olmaktadır. Deneysel sonuçlar yüzey üzerindeki akışlarda akış hızının tam yüzeyde sıfır olduğunu göstermiştir. Katı ile temas halinde olan akışkan viskozite etkilerinden dolayı yüzeye yapışır, kayma olmaz ve hız yüzeyde sıfır kabul edilir. Bu duruma kaymama koşulu denir. Bu nedenle kaymama koşulu yüzeyin normalinden itibaren viskoz etkiler sonucunda hızda bir azalmaya sebep olur. Viskoz etkilerin akış hızı üzerinde etkili olduğu bölgeye viskoz akış bölgesi veya hız sınır tabakası denir. Şekilde 3.1. görüldüğü gibi hız sınır tabakası içerisinde hız değişimi nedeniyle bir hız profili oluşur. Bu hız profilinde akış hızı sınır serbest akış hızının %99'una eşit olduğu noktaya kadar sınır tabaka denir. Sınır tabaka dışındaki bölgeye de viskoz olmayan akış bölgesi veya potansiyel akış bölgesi denir. Yapılan bu tanımlamalar, şekil 3.1. üzerinde de gösterilmiştir.

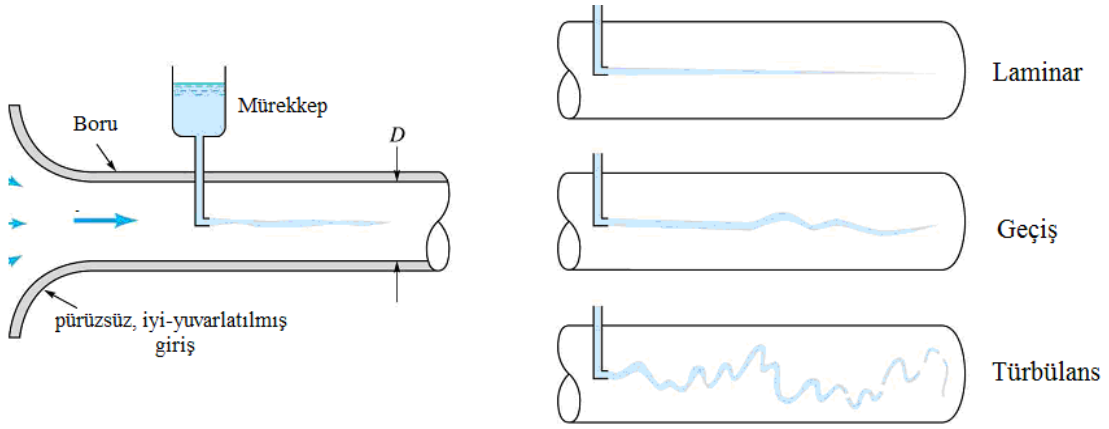


Şekil 3.1. Katı cidar üzerinde gelişen sınır tabaka (Erdoğan B, 2015)

### 3.2.2 Laminer – Türbülanslı akış

Osborne Reynolds (1842-1912) yaptığı deneysel çalışmalarda, akışın farklı biçimlerde aktığını göstermiştir. Deneylerinde boru içi akışa, Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi, mürekkep enjekte etmiştir. Enjekte edilen mürekkep düşük akış hızlarında çizgi şeklinde düz bir yol izleyerek akışa karışmamıştır. Akışın bu tür davranışına laminer akış demiştir. Akış hızı artırılıp belli bir kritik değeri geçmesiyle mürekkep düzenli bir yol izlememekte ve boru kesitindeki tüm akışa karışmıştır. Bu akışın bu tür davranışına

ise türbülanslı akış demiştir. Laminer ve türbülanslı akışlar arasında olup kararsız akış türüne de geçiş akışı demiştir.



Şekil 3.2. Osborne Reynolds (1842-1912)'un yaptığı deneysel boru akışında oluşan akış durumları (Erdoğan B, 2015)

Laminardan türbülansa geçiş; geometri, yüzey pürüzlülüğü, akış hızı, akışkan türü, yüzey sıcaklığı, titreşimler ve daha pek çok şeye bağlı kalabilmektedir. Osborne Reynolds'un yaptığı deneyler sonucunda akış türlerini belirlemede kullanılan "Reynolds" boyutsuz sayısı ortaya çıkmıştır. Reynolds sayısı akışkandaki atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanmıştır. Dairesel borulu akışlar için Reynolds sayısı aşağıdaki bağıntıyla ifade edilmiştir.

$$Re_d = \frac{\text{Atalet kuvvetler}}{\text{Viskoz kuvvetler}} = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (3.2)$$

Borulu akışların genel çoğunluğunda;

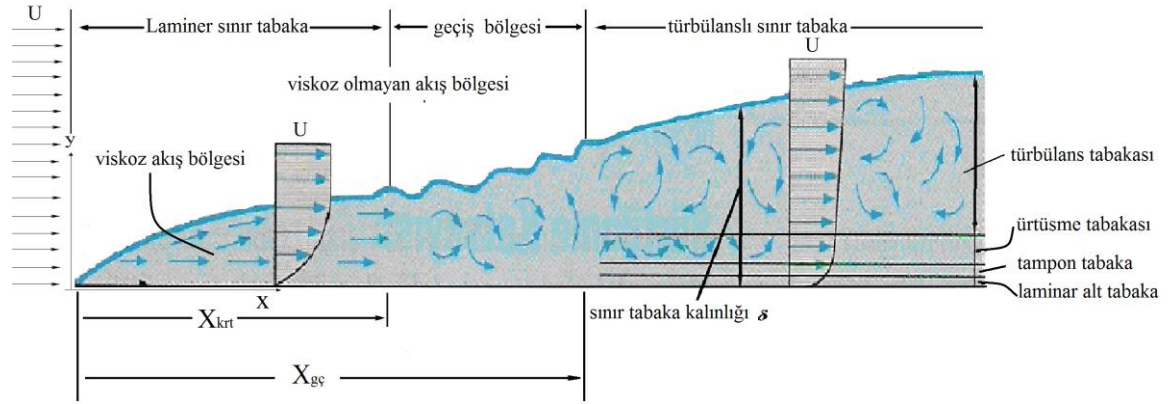
$Re < 2300$  laminer

$2300 < Re < 4000$  geçiş akışı ve

$Re > 4000$  türbülans akış olarak kabul edilmiştir.

Laminardan türbülansa geçişi analiz etmek için düz bir plaka yüzeyi üzerindeki akışın incelenmesinde yarar vardır. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi plakaya gelen akış düzgün  $U$  hızındadır. Plakanın girişinden itibaren plaka yüzeyine yakın cidarda kaymama

koşulunun etkisi ve viskoz etkiler sonucu, akış hızıyla ifade edilen, bir sınır tabaka gelişmiştir.



Şekil 3.3. Düz yüzey üzerindeki sınır tabaka gelişimi (Yeşil Ata, B. )

Şekil 3.3.'te görüldüğü gibi plaka girişinden kritik bir mesafeye ( $X_{krt}$ ) kadar gelişen akış laminerdir. Bu kritik mesafeden itibaren, belirli mesafe aralığı için, laminar-türbülans arası bir geçiş akışı olmaktadır. Bu geçiş mesafesinden ( $X_{ge}$ ) sonra akış tamamıyla türbülanslı akış olur. Düz plaka üzerindeki akışlarda Reynolds sayısı ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Re_x = \frac{\rho U x}{\mu} \quad (3.3)$$

Burada,  $U$  dış akım hızı,  $x$  ise plaka girişinden itibaren ölçülen mesafedir. Serbest akımlı pürüzsüz düz bir plaka yüzeyi üzerindeki akışta çok yüksek çalkantılar yaratıldığında  $Re_{kr} = 1 \times 10^5$  gibi bir kritik Reynolds sayısında laminar türbülans geçiş süreci başlayabilmektedir. Çalkantıların oluşmasına hiç izin verilmediği akışta ise laminar akış  $Re_{krt} = 1 \times 10^6$  gibi bir kritik Reynolds sayısına kadar sürebilmektedir (Erdoğan B 2015). Gerçek mühendislik akışlarında ise türbülansa geçiş, akımı serbest olan düz pürüzsüz plaka için, verilen değerlerden daha önce gelir. Yüzeydeki pürüzlülük, dış akım bozuklukları, gürültü, akustik, kararsız akışlar, titreşimler, sıcaklık değişimleri ve çeperin eğriliği gibi faktörler erken geçiş konumunu etkiler. Bu nedenle plaka üzerindeki akışlarda bir sınır tabakanın büyük olasılıkla laminar ( $Re_x < Re_{krt}$ ) ya da türbülanslı ( $Re_x > Re_{krt}$ ) olduğunu belirlemede aşağıdaki mühendislik kritik Reynolds sayısı kullanılır (Yeşil Ata, B.).



$$Re_{krt} = \frac{\rho U x}{\mu} \cong 5 \times 10^5 \quad (3.4)$$

Dolayısıyla sürtünme katsayısı hesaplamalarında bu kritik değerden daha düşük değerlerde laminer akış kabulü ve üstü değerlerde türbülans akış kabulü yapılır.

### 3.2.3 Navier Stokes denklemleri ve Süreklilik

Süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri akışların geneline uygulanan önemli akış denklemleridir. Süreklilik denklemi, herhangi bir kontrol hacim içerinden geçen akışkan kütle korunum yasası ile ifade edilirken, Stokes Navier denklemleri de Newtonun ikinci kanunun kontrol hacme uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar, hareket ya da momentum korunum denklemleridir. Dik eksenler sisteminde, sabit fiziksel özelliklere sahip (izotermal), Newton tipi, sıkıştırılmayan akış için; hareket ve süreklilik denklemleriyle ifade edilmiştir.

Süreklilik denklemi aşağıdaki gibidir

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (3.5)$$

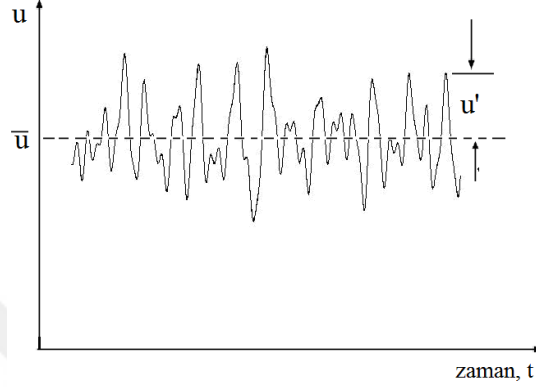
Navier Stokes denklemleri aşağıdaki gibidir. X yönünde momentum 3.6 denklemi ile ifade edilirse;

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.6)$$

Y ve z yönündeki momentum denklemleri de aynı şekilde olmaktadır.  $u$ ,  $v$  ve  $w$  sırasıyla  $x$ ,  $y$  ve  $z$  yönlerindeki hız bileşenleri,  $P$  akışkan basıncı ve  $g_x$   $x$  yönündeki yerçekimi ivmesidir. Denklemlerin tümüne yönetici denklemler denilmektedir. Akışların problemlerinin tümü yukarıdaki denklemler ile çözülmektedir.

### 3.2.4 Türbülanslı akışlar

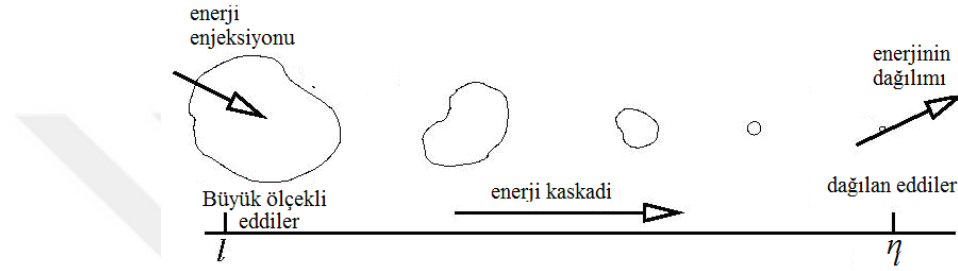
Türbülanslı akışlar, zaman ve konuma bağlı olarak düzensiz akış davranışı sergilerler. Akış içerisinde çalkantıların olması herhangi bir noktada ölçülen akış özellikleri zaman bağlı dalgalı değerler gösterirler. Türbülanslı bir akışta akış içerisinde bir noktada ölçülen hızın zamana bağlı anlık değerleri Şekil 3.4.'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.4.** Türbülanslı akışta belirli bir konumdaki anlık hızın zamana bağlı değişimi (Düz Hasan, 2013)

Burada, akış içerisindeki bir noktada anlık hız değeri zamana bağlı olarak dalgalı bir değişim göstermektedir. Burada dalgalı hız değerleri iki bileşene ayrılabilir. Bunlar zaman ortalamalı ( $\bar{u}$ ) hız bileşeni ve ortalama değerden sapma miktarı olan çalkantı hız bileşeni ( $u'$ ) 'dir.  $u'$  hızı akışın iç içe devamlı karışmasından dolayı anlık hızın artıp azalması sonucu oluşan hız bileşenidir. Deneysel gözlemler türbülanslı akışların zaman ve konuma bağlı olarak gelişen boyutsal yapılar içerdiğini göstermiştir. Bu yapılar akış içerisinde dönen akışkan bölgeleridir. Bunlara *eddy*, *girdap*, *türbülans ölçekleri* veya *türbülans çalkantıları* denir. Türbülans teorisinin temel sonucu olarak, bu yapıların tümünün aynı büyüklüklerde olmadıkları ve her aralıkta akış içerisinde var oldukları görülmüştür. Genel olarak türbülanslı akışta büyük eddylerin boyutları akış geometrisiyle ilişkili olan " $l$ " uzunluk ölçüsü ile ifade edilmektedir. Çepere bağlı türbülanslı akışlarda uzunluk ölçüsü akış geometrisine uyan (boru çapı gibi)  $L$  uzunluk ölçüsü ile ölçülmektedir. Aynı zamanda büyük ölçekli eddy'ler  $u_t$  (m/s) gibi bir hız ölçüsüne sahip olmasıyla,  $l/u_t$  oranıyla tipik bir zaman ölçüsüne ve  $u_t^2$  ile tanımlanan bir kinetik enerji ölçüsüne de sahip oldukları çıkarılabilmektedir. Büyük ölçekli eddy'lerin kinetik enerjileri ortalama akıştan sağlanırken küçük eddy'lerin kinetik enerjileri ise doğrudan ortalama akıştan sağlanmaz. Büyük eddy'lerin küçük eddy'lere bölünmesiyle

büyük eddy'lerin kinetik enerjisi küçük eddy'lere aktarılmış olur. Şekil 3.5.'te büyük eddy'lerin küçük eddy'lere dönüşümü gösterilmiştir. Türbülanslı akışın en küçük ölçeğine ulaşana kadar bu sürekli küçük eddy'lere bölünme işlemine enerji kaskad'i denir. Enerji kaskadi sonunda türbülanslı akışın en küçük eddy'leri parçalanarak kinetik enerjileri akış içerisinde moleküler düzeyde iç enerjiye yani ısı enerjisine dönüşür. Bu nedenle türbülanslı akışlarda, laminar akışlarda farklı olarak, türbülans çalkantılarından dolayı bir enerji kaybı söz konusudur. Uygulamalarda türbülanslı akışlarda sürtünme kayıpları daha yüksek olmaktadır.



Şekil 3.5. Büyük ölçekli eddy'lerden küçük ölçekli eddy'lere doğru enerji kaskadi (Düz H., 2013)

Büyük ölçekli eddylerin kinetik enerji kaybı, yayılma oranı  $\varepsilon$  ( $m^2/s^3$ ) ile gösterilir. En küçük eddy'lerin uzunluk ölçüsüne kolmogorov ölçü ( $\eta$ ) denir. Literatürde büyük eddylerin uzunluk ölçeği ölçümlerinde farklılıklar görülebilmektedir. Örneğin Eggels çalışmalarında 5400 ile 42000 aralığındaki Reynolds sayılı boru akışlarında büyük eddy'lerin uzunluk ölçüsü için  $l = 1/10 \times D$  değeri ve hız ölçüsü için de  $u_t = 1/15-1/20 \times U$  arasındaki değerleri kullanmıştır. Burada D boru çapı ve U serbest akım hızıdır. FLUENT programında ve Schlichting kitabında ise  $l = 0.07 \times D$  değeri kullanılmaktadır. Yapılan çok sayıda bilimsel çalışmalara rağmen türbülans teorisi halen büyük ölçüde çözülebilmemiş değildir. Türbülanslı akışta girdaplar; kütle, momentum ve enerjiyi akışın diğer bölgelerine taşır. Sonuç olarak türbülanslı akışlar laminar akışlara göre çok daha yüksek sürtünme direncine, ısı ve kütle geçişine sebep olur. Türbülanslı akışta belirli bir konumdaki anlık hızın zamana bağlı değişimi Şekil 3.4. 'de gösterilmişti. Bu anlık değerlerle türbülanslı akışları, analitik olarak, zamana bağlı çözmek imkânsızdır. Bu nedenle anlık hız değerleri ortalama hız ( $\bar{u}$ ) bileşenine ve çalkantı hız bileşenine ( $u'$ ) ayrılarak basitleştirme yapılmıştır. Ortalama değerler yeteri bir zaman süresince anlık hız değerlerinin aritmetik ortalaması olarak alınır.

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u dt \quad (3.7)$$

Anlık hız değeri gibi türbülanslı akıştaki tüm akış özellikleri ortalama ve çalkantı bileşenlerine ayrılarak basitleştirme yapılmaktadır.

$$P = \bar{P} + P' \quad T = \bar{T} + T' \quad \rho = \bar{\rho} + \rho' \quad (3.8)$$

Türbülanslı akışlardaki belirli bir konumdaki ortalama değerler laminar akışta olduğu gibi zamanla değişmeyen değerlerdir.

### 3.2.4.1 Türbülans kayma gerilmesi

Kayma gerilmesi akışkanın katı cidarla sürtünmesinde akış içerisinde akış tabakalarının birbiri üzerinden kayması sonucu akışa karşı olan akış gerilmelerini göstermektedir. Türbülanslı akışlarda kayma gerilmesi laminar akıştaki gibi aşağıdaki bağıntıdan hesaplanamamaktadır.

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.9)$$

Deneysel çalışmalar türbülanslı akışta kayma gerilmesinin laminar akıştakinden kat kat daha fazla olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla türbülanslı akışlarda diğer akışkan özellikleri gibi kayma gerilmesinin çözümü için zaman ortalamalı bileşen ve çalkantı bileşeni olarak, laminar kayma gerilmesi ve türbülans kayma gerilmesi olarak, iki kısma ayrılmaktadır.

$$\tau = \bar{\tau} + \tau' \quad (3.10)$$

$$\tau = \tau_{lam} + \tau_{turb}$$

Türbülanslı akışlardaki laminar kayma gerilmesi laminar akıştaki gibi;

$$\tau_{lam} = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (3.11)$$

ortalama değerler üzerinden hesaplanabilmektedir. Türbülans kayma gerilmesi ise uzun bilimsel araştırmalar sonucunda iki çalkantı hız bileşenin akış üzerindeki zaman ortalama etkileri olarak ifade edilmiştir (Yeşil Ata B. III/17. Viskoz Akışlar).

$$\tau_{\text{rb}} = -\rho \overline{u'v'} \quad (3.12)$$

Bu ifade de yer alan  $\overline{u'v'}$ , her iki yöndeki çalkantı hız bileşenlerinin çarpımlarının zaman ortalamasıdır.  $-\rho \overline{u'v'}$ ,  $\rho \overline{u'^2}$ ,  $-\rho \overline{u'w'}$  ve  $\rho \overline{v'^2}$  gibi değişik yönlerdeki türbülans gerilmelerine *Reynolds Gerilmeleri* denir. Türbülans kayma gerilmesini bulmaya yönelik 1877'de, Fransız matematikçi Joseph Boussinesq aşağıdaki bağıntıyı önermiştir.

$$\tau_{\text{rb}} = -\rho \overline{u'v'} = \mu_t \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (3.13)$$

Burada laminer kayma gerilmesine benzer bir çözüm yolu önerilmiştir. Bu bağıntıda  $\mu_t$  türbülans viskozitesi veya eddy viskozitesi denir. Türbülans viskozitesi akışkanın kinematik viskozitesi gibi bir akışkan özelliği olmayıp akış şartlarına bağlı bir değişken olmaktadır. Türbülans kayma gerilmesinin hesaplanması için türbülans viskozitesini bulmaya yönelik pek çok model geliştirilmiştir. Örneğin bu modellerden en çok tercih edilenleri k-epsilon ve k-omega modelleri olmaktadır. Bu modellere önümüzdeki konularda ayrıntılı bilgi verilecektir.

### 3.2.4.2 Trblanslı Navier-Stokes Denklemleri

Navier-Stokes denklemleri, Newton tipi, sıkıştırılabilir, sıkıştırılamaz, daimi, daimi olmayan her türlü akışa uygulanabilen en genel akış denklemleridir. Trblanslı akışların çözümü için akış alanı değişkenleri, ortalama ve çalkantı bileşenlerine ayrılıp Navier stokes denklemlerinde yerine yazıldıklarında aşağıdaki denkleme ulaşılmaktadır.

x yönünde:

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \rho g_x + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left( \frac{\partial u'^2}{\partial x} + \frac{\partial u'v'}{\partial y} + \frac{\partial u'w'}{\partial z} \right) \quad (3.14)$$

Bu denklemde parantez içindeki son terim Reynolds gerilmelerini göstermektedir. Bu Reynolds gerilmeleri anlık değerlerdir ve buda denklemin çözümünü zaman bağılı yapar. Denklemi zamandan bağımsız yapmak için denklemin zaman ortalaması alınmalıdır. Bu şekilde yeni sonuçlanan denklem tümüyle zamandan bağımsız olur ve denklemde Reynolds gerilmeleri de zaman ortalamalı değer halini alırlar.

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \rho g_x + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left( \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \quad (3.15)$$

Bu denkleme Reynolds ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemi denir. Yabancı literatürde ise, "RANS" denklemi denir. Bu denklem türbülanslı akışları ortalama değerler üzerinden değerlendirdiğinden çözümü basitleştirmektedir. Fakat burada bilinmeyenler Reynolds gerilmeleri olmaktadır. Bilinmeyen Reynolds gerilmeleri Boussinesq hipotezi ile modellenerek çözüm sağlanabilmektedir. Reynolds gerilmelerini çözmeye yönelik modellere ise türbülans modelleri denir. Türbülanslı akışların zaman ortalamalı değerler üzerinden çözümü her zaman tam doğru sonuç vermeyebilir. Bu daha çok türbülans gerilmeleri çözmek için türbülans modellerinde kullanılan ampirik katsayılarla bağılı kalmaktadır. Bu nedenle bir türbülanslı akışın tam çözümü ancak zamana bağılı anlık hareket denklemlerinin sayısal çözümünüyle mümkündür. Türbülanslı akışın tam çözümü en küçük ölçek olan Kolmogorov ölçeğe kadar akış çalkantılarının zaman ve konuma bağılı gelişmesinin çözülmesiyle mümkün olur. Bu da ancak doğrudan sayısal benzeşim (DNS) yöntemiyle mümkün olur. Fakat çok basit problemler dışında akışın DNS ile çözümleri bugünkü bilgisayarlarla mümkün olamamaktadır.

### 3.2.5 Hız yasaları ve boyutsuz mesafeler

Katı yüzey üzerinden akışlarda laminar sınır tabaka içerisindeki hız profili ile türbülans tabaka içerisindeki hız profili benzer değildir. Laminar hız profili analitik bağıntılarla ifade edilmesine karşın türbülans hız profili ise yarı ampirik bağıntılarla ifade edilmiştir. Sayısal bir çözümde sınır tabaka içerisindeki hız dağılımının doğru bir şekilde yakalanabilmesi için duvara yakın daha fazla kontrol hücresi yerleştirilmelidir. Bu nedenle türbülans hız profilinin iyi bilinmesi gerekir. Katı yüzey üzeri türbülanslı akışta oluşan hız profili duvar normali boyunca dört bölgeye ayrılmıştır. Bunlar, viskoz

alt tabaka, tampon tabaka, örtüşme tabakası ve türbülans tabakasıdır. Viskoz alt tabaka duvara cidarına bitişik ve kalınlığı saç teli kadar olan ince bir akış tabakasıdır. Bu akış tabakasında akış laminedir. Bu akış tabakasından itibaren türbülans etkiler laminer etkiyi bastırmaya başlar ve hız profili doğrusaldan logaritmik bir dağılıma sahip olmaya başlar. Bu nedenle türbülans hız profili iki ayrı yarı ampirik yasayla ifade edilebilmişlerdir. Laminar alt tabakadaki hız dağılımının çeper yasasına ve diğer tabakalardaki hız dağılımının ise logaritmik bir yasaya uyduğu görülmüştür.

$$\text{Çeper yasası: } \frac{u}{u_*} = \frac{yu^*}{\nu} \quad \Rightarrow \quad u^+ = y^+ \quad (3.16)$$

Burada  $u^+$  ve  $y^+$  boyutsuz hız ve boyutsuz mesafedir.  $u^*$  ise sürtünme hızıdır ve aşağıda gibi tanımlanmıştır.

$$u^* = \sqrt{\tau_d / \rho} \quad (3.17)$$

Burda ise;  $\tau_d$  duvar kayma gerilmesi ve  $\rho$  ise akışkan yoğunluğudur. Çeper yasasının,  $0 \leq y^+ \leq 5$  Aralığında pürüzsüz yüzeylerle yapılan deneylerle iyi uyum sağladığı görülmüştür. Logaritmik yasa ise aşağıdaki bağıntıyla ifade edilmiştir;

$$\text{Logaritmik yasa: } u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5 \quad (3.18)$$

logaritmik yasa  $y^+ > 30$  değerinden itibaren başlayan örtüşme ve türbülans tabakasının belirli bir kısmı için deney verileriyle çok iyi uyum sağladığı görülmüştür. Bu iki hız dağılım yasalarına duvar kanunları veya duvar fonksiyonları da denilmektedir. Bu nedenle sayısal bir akış analizinde duvara yakın hız dağılımının yakalanabilmesi için duvar bitişik ilk kontrol hacimlerinin boyutları boyutsuz mesafe  $y^+ < 1$  olacak şekilde yapılandırılmalıdır. Bu şekilde laminar alt tabakadaki hız dağılımını doğru bir şekilde yakalanabilir (Düz Hasan, 2013) .

#### 4 HE SAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD)

Akışın bulunduğu mühendislik sistemlerinin dizaynı ve çözümlenmesinde iki metot vardır. Bunlar deney ve hesaplama. Deney yapma, rüzgâr tüneli ve farklı şekilde test edilmesi gereken modellerin yapımını gerektirirken, diğeri ise diferansiyel akış denklemlerini analitik ya da matematiksel olarak çözmektir. Deney yapma, pahalıdır ve akış alanı için yeterince detaylı bilgi sunamamaktadır. Analitik çözüm ise ancak basit akışlara uygulanabilmektedir. Bunlara rağmen sayısal hesaplama basit-karmaşık her türlü problemi çözebilme yeteneğindedir. Sayısal yöntemler deneylerden farklı olarak, masrafsız, zaman kısıtlaması az olan ve akış alanı için detaylı bilgi sunabilen özelliklere sahiptir. Sayısal çalışmalar 1970'ten itibaren süper bilgisayarların ortaya çıkmasıyla gelişmeye başlamış ve deney yapma yerine artık sayısal çözümler tercih edilir olmuştur. Hesaplama akışkanlar dinamiği (HAD), diferansiyel akış denklemlerinin sayısal olarak çözülmesi ile ilgilenen ve çözümün bilgisayar ortamında gerçekleşmesini sağlayan bir bilim dalıdır. HAD yirmi yıl kadar süredir mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda büyük bir role sahip olmuştur ve gelecek uygulamaların gelişmesinde de önemi her geçen gün daha da artmaktadır. Bugün, akış alanları sayısal olarak çözümleniyor ve performans eğilim hesaplamaları yapılabiliyor. Bununla beraber, sayısal çözümlerin doğruluğu tam güvenilir değildir çünkü sayısal metotlar ve akış modelleme varsayımları deneysel doğrulamaya gereksinim duymaktadır. Sayısal çalışmada, akış alanı çok küçük boyuttaki kontrol hacim elemanlarına ayrılır. Bu elemanlar birbirlerine düğüm noktalarında bağlıdır. Bu şekilde, akış alanı, çok büyük sayıda düğüm noktalarından oluşmuş, bir ağ sistemi haline gelir. Ağ elemanları ağdan bağımsız çözüm elde edilinceye kadar boyutları küçültülür. Ağ elemanları oluşturulduktan sonra, akış alanı için sınır şartları, uygulanacak metotlar ve akış özellikleri girilir. En sonunda her eleman için Navier-Stokes denklemleri yazılır ve çözüm matrisi elde edilir. Oluşan matrisin bilgisayar yardımıyla çözülmesiyle akış alanı içerisindeki tüm elemanların hız, basınç ve sıcaklık gibi akış özellikleri elde edilir. Bu veriler ile akış özellikleri bilgisayar ekranında görsel ve sayısal olarak simule edilebilmektedir. Sayısal simülasyonlar bilgisayarda üç adımda gerçekleşir. Bunlar ön işleme (preprocessing), hesaplama (solution) ve ard işlemdir (post processing). Ön işlemede, akış alanı geometrisi oluşturulur ve çeşitli ağ oluşturma programları ile geometriye ağ atılması sağlanır. Hesaplama adımında ise, uygun sayısal yöntemler, uygun algoritmalar, akış özellikleri ve sınır şartları belirtilir ondan sonra hesaplama



alanı ağ çözücü program ile çözdürülür. Ard işlemede ise hesaplamada elde edilen veriler incelenmek üzere üç boyutlu görüntü ve animasyonlara dönüştürülür, grafik ve tablo olarak değerlendirilmesi yapılır. HAD yazılımları ile akışları çözmek basitken elde edilen deney sonuçları yanlış olabilir. Akış alanında ağ doğru oluşturulmamışsa ya da sınır koşulları, akış değerleri doğru girilmemişse sonuçların tamamı yanlış çıkabilir. O yüzden en iyi ağ yapısı bulunmalı, sınır şartları doğru belirlenmeli, ona göre çözüm yapılmalıdır. Elde edilen sonuçlar doğru değerlendirilmeli ve yorumlanması gerekir. Günümüz şartlarında deneysel analizler ile birlikte matematiksel olarak HAD çözümlenmeleri de uygulanır (Düz H., 2013).

#### 4.1 Hesaplama Aşamaları:

Hesaplama alanı belirlenir ve ağ oluşturulup, belirlenen bölge çok sayıda küçük parçalara bölünür.

En uygun ağ oluşturulduktan sonra, sınır şartları verilir.

Akışkan türü ve akışkan özellikleri ( sıcaklık, vd.) programa girilmelidir.

Sayısal değerler ve çözüm şeması belirlenir.

Akış alanındaki bütün değişkenler için başlangıç değerleri belirlenmelidir.

Ayrıca daimi olmayan akış hesaplamalarının doğru yapılabilmesi için başlangıç şartları doğru olarak girilmelidir.

İlk değerlerden başlayarak tüm mesh için denklemler (4.1.) ve (4.2.)' nin formları iteratif olarak çözülmeli.

Çözüm yakınsadığında hız ve basınç gibi akış alanındaki değişkenleri grafiksel olarak çizilebilir.

Akış alanındaki basınç düşümü vb. genel özellikleri, cismin üzerine etki eden kuvvetler ve momentler gibi farklı özellikleri de yakınsanmış çözümden hesaplanabilir.

Laminer akışta belirtilen adımlar takip edilerek elde edilmiş olan HAD çözümü, hareket denklemleri için kullanılan ayrıklaştırma şemasının doğruluğu, yakınsama seviyesi ve ağın çözünürlük derecesi ile sınırlı olarak tam çözüme yaklaşır. Türbülans akışlı HAD çözümleri için türbülans modelleri halinde ilave eklemeler yapılır. Türbülans modelleri, gelişmiş karışımı ve türbülans difüzyonunu modelleyen ilave transport denklemleri oluşturur. Bu ilave transport formülleri, kütle ve momentum formülleri ile beraber çözülür.

$$\nabla V = 0 \quad (4.1)$$

$$(V \cdot \nabla) \cdot V = \frac{-1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \cdot V \quad (4.2)$$

## 4.2 Ağdan Bağımsızlık ve Ağ Oluşturulması

HAD çözümünde birinci adım hesaplama alanındaki akış değişkenlerinin, hücrelerin tanımlanacağı doğru ağ oluşturmaktır. HAD yazılımları kendilerine özgü ağ oluşturma yolları vardır. İyi bir ağ zaman alıcıdır fakat daha doğru sonuçlara ulaşmak için gereklidir. Belirtilen nedenlerden dolayı HAD ağdan bağımsızlığı test edilmelidir. En standart yol; çözünürlüğü adım adım artırmak ve uygulama programını tekrarlamaktır. Belli zaman sonra sonuçlardaki farklılıklar iyice azalacak ve kayda değer farklılıklar olmayacaktır. Elde edilen değerlerde kayda değer bir değişim olmadığında, seçilen ağ uygun olacaktır. Eğer elde edilen çözümler arasında kayda değer farklar varsa başlangıçtaki ağın çözünürlüğü doğru değildir. Uygun ağ değeri elde edilene kadar ince ağlar verilmeye devam edilir. Uygun ağ yapısının elde edilene kadar verilen ince ağlar zaman alıcı ve yorucudur; fakat gereklidir.

## 4.3 Sınır Koşulları

Doğru bir HAD çözümünün yapılabilmesi için diğer önemli noktalardan birisi de sınır şartlarıdır. HAD çözümlemesi için hareket formülleri, hesaplama alanı ve ağında aynı olmasına karşın, modellenen akışın türü uygulanan sınır şartları tarafından belirlenir. Sınır şartları çözümün sağlanmasında anahtar görevi görmektedir. Bir akış alanının sınırlarındaki akış özellikleri bilinebilir ve bunlar sınır şartı olarak akışı çözümlemesinde önemli inputlar olmaktadır. Örnek: Bir boru akışında akış yüzeyleri 3 sınır şartı oluşturur. Boru giriş kesiti, boru çıkış kesiti ve boru cidarı yüzeyi boru akışının sınır yüzeyleri olmaktadır. Örnek: Boru girişinde hız dağılımı ve akış debisi bilinebilir bunlar giriş sınır şartı olarak girilir. Duvar yüzeyinde pürüzlülük yüksekliği ve duvar yüzeyinde kaymama koşulu (hız sıfırdır) duvar sınır şartı olarak sisteme tanımlanabilir. Boru çıkışı atmosfere açılıyorsa çıkışta akış atmosfer basıncında olacağından çıkış sınır şartı olarak atmosfer basıncı girilmelidir. Sınır şartının atanmasıyla sayısal çözümleme bu sınır şartlarına uygun olarak akış simülasyonunu

gerçekleştirir. Bazı durumlar akışın tümünü çözmemize gerek olmaz akış simetrisinden veya periyodikliğinden yararlanarak simetrik sınır yüzey veya periyodik sınır yüzeyi sınır şartı olarak sisteme girilebilir. Bu şekilde çözüm kısa zamanda tamamlanır. Bir akışın sayısal çözümü için altı tane sınır şartı vardır. Bunlar, giriş, çıkış, duvar, simetrik, serbest yüzeyler ve periyodiklik sınır şartlarıdır.

#### **4.3.1 Wall (çeper) sınır şartı**

Çeperde (Wall) ait olan sınır şartı, en basit sınır şartıdır. Çeperden akışkan geçemeyeceği için wall yüzeyinde hızın normal bileşeni sıfır, kaymama koşulu nedeniyle de durağan bir wall üzerindeki teğet sel hız bileşeni de sıfır kabul edilir. Enerji denklemi çözümlenebiliyorsa, wall sıcaklığı veya wall ısı akısı da belirtilmeli. Türbülanslı akış çözümlüyorsa çeperdeki pürüzlülük sınır tabakayı etkileyeceği için çeperdeki pürüzlülükte hesaplanmalıdır.

#### **4.3.2 İçeri ve dışarı akış sınır şartları**

Akışkanın hesaplanacak alana girdiği yere; içeri akış, hesaplanacak alandan çıktığı yere; dışarı akış denir. Belirtildiği gibi iki seçenek söz konusudur. Bunları genelde hızı belirlenmiş şartlar ya da basıncı belirlenmiş şartlar olarak ayrılabiliriz. Hız girişinde (velocity inlet) giriş yüzü boyunca giren akışın hızı belirlenir. Eğer enerji veya türbülans denklemleri çözülecekse, akışkanın sıcaklık ve türbülans özelliklerinin de belirlenmesi gerekir. Bir basınç girişinde (pressure inlet) giriş yüzü boyunca toplam basınç belirlenir. Bir basınç çıkışında (pressure outlet) ise akışkan hesaplama bölgesinden dışarı akar. Statik basıncı çıkış yüzü boyunca belirtmeliyiz. Çoğu durumda bu basınç atmosferik basınçtır. HAD uygulamasındaki yaygın durum, hesaplama bölgesi sınırının bazı kısımları boyunca bir veya daha fazla sayıda sınır şartları belirtilir.

#### **4.3.3 Diğer sınır koşulları**

Hesaplama alanının bazı sınırları ne çepere ne de giriş ya da çıkış sınır şartlarına uymaz. Bu bir çeşit simetriyi ya da sürekliliği yerine getirirler. Örnek: Şeklin tekrarlanması gerekli ise, süreklilik sınır şartı uygun olacaktır. Süreklilik sınırın bir yüzü boyunca olan akış alanı değişkenleri, aynı şekle sahip ikinci bir yüze sayısal olarak

bağlanır. Böylece birinci süreklilik sınırdan ayrılan akış özellikleri (hız, basınç vb.) aynı olan ikinci süreklilik sınıra giren (sınırı aşan) gibi kabul edilebilir. Süreklilik sınır şartları hep çiftler halinde olur ve turbo makina kanatları arasındaki akış ya da bir ısı eşanjörü boru demeti arasından geçen akış gibi tekrarlayan geometrileri olan akışlar için gayet kullanışlıdır. Simetri düzlemini akıllıca seçersek hesaplama alanının büyüklüğünü yarı yarıya düşürebiliriz.

#### **4.4 Laminer Akıslarda HAD Çözömlömleri**

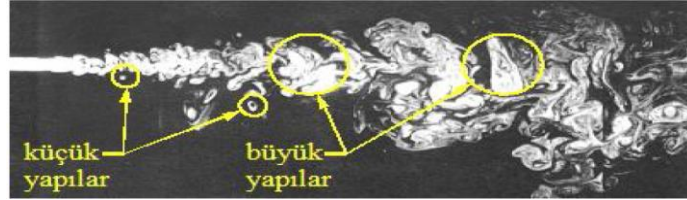
Sıkıştırılmaz, sürekli ya da sürekli olmayan laminer akış hesaplamalarında HAD yazılımları çok iyi şekilde çalışırlar. Fakat ağ çok iyi çözünürlükte olmalı ve sınır şartları en ideal fonksiyonda tanımlanmalı.

#### **4.5 Türbölanslı Akıslarda HAD Çözömlömleri**

Türbölanslı akıslarda HAD simölasyonları laminer akış simölasyonlarından daha zordur. Türbölanslı akışta, akış alanının özelliklerinin değışken olması, sürekli olmaması ve 3D olmasıdır. Türbölanslı akışın tüm yönlerinde türbölans girdapları denilen gelişigüzel, girdaplı yapılar ortaya çıkar. Buna karşın girdaplarda boyutsal farklar ve zaman ölçeği değışiklikleri olmaktadır. Reynolds sayısı büyödükçe türbölanslı akışın DNS hesapları da zorlaşmaktadır. Bundan dolayı, türbölanslı akıslarda yüksek Reynolds sayılı, akış alanlarının simölasyonunu yapmak için bazı basitleştirici kabuller yapılmalı. Large Eddy Simulation yönteminde de. Bu yöntem de türbölans girdaplarının büyük ölçekli daimi olmayan özellikleri zamana bağlı olarak çözölür. Küçük ölçekli türbölans girdapları ise zamandan bağımsız modellenir. Bunlardan farklı olarak diğer bir yol da, RANS yöntemiyle akış alanını çözmektir. Burada hiç bir türbölans girdabının zaman ve konuma bağlı gelişmesi çözölmez. Burada akıştaki türbölans etkisi zaman ortalamalı değerler üzerinden akış alanına etkilettirilir. RANS denklemlerinde ortaya çıkan Reynolds gerilmeler modellenerek akış alanı çözölür. Bu yöntemde oluşturulan modeller deneysel sabitlere dayalı yaklaşımlardır.

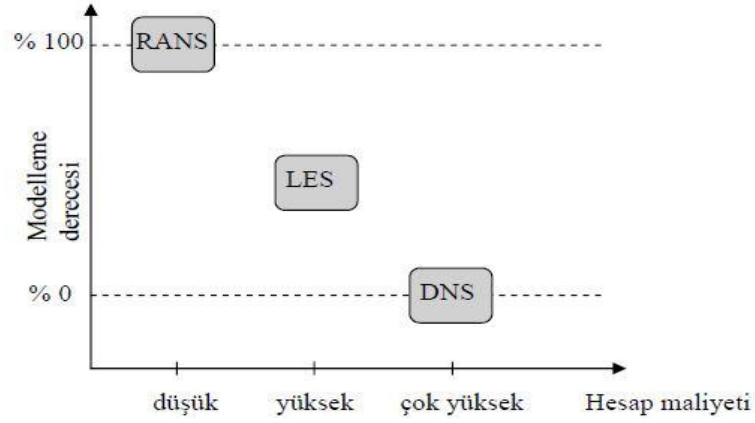
## 4.6 Sayısal Çözümleme

Türbülans harekete yaklaşımın en basit yolu zaman içerisinde Navier-stokes denklemlerini sayısal yöntemlerle çözmektir. Türbülans hareketin simule edilmesinde türbülans hareketin tüm enerji spektrumu çözülmüş olmalıdır ve türbülans hareket hakkında her detaylı bilgi öğrenilmelidir. Bu yaklaşıma direk sayısal simülasyon (DNS) denir. Türbülans hareket, en büyük " $l$ " uzunluk ölçeğinden kolmogorov ölçüsü " $\eta$ " 'e kadar, çok büyük ve çok küçük hareket ölçeklerini içermektedir. Yüksek hesaplama maliyeti nedeniyle DNS yöntemi ancak bilimsel araştırmalarda ve Türbülans modellerinin test edilmesinde kullanılabilir. Türbülans girdapların gelişmesini zamana bağlı olarak çözen diğer bir yaklaşım ise LES yöntemidir. Bu yaklaşımda büyük ölçekli girdap hareketleri sayısal olarak zamana bağlı çözülürken ve küçük ölçekli hareketler ise zamandan bağımsız modellenir. Bu amaçla, Navier-Stokes denklemleri frekans sahası içerisinde yazılmıştır. Şekil 4.1.'de akışa enjekte edilen bir boyanın dağılmasında küçük ve büyük Türbülans gösterilmiştir. Büyük ölçekli yapılar (düşük frekanslı ve yüksek dalga boylu olanlar) frekans sahası içerisinde değerlendirilirken küçük ölçekli yapılar (yüksek frekanslı ve düşük dalga boylu yapılar) ise filtrelenir ve RANS Türbülans modelleri ile hesaplanır.



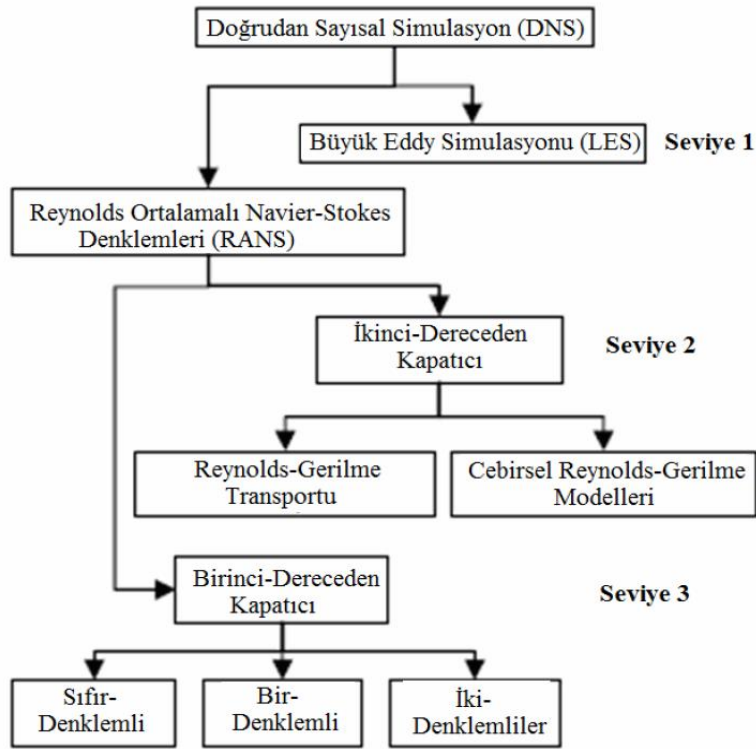
Şekil 4.1 Akışa enjekte edilen bir boyanın dağılmasında küçük ve büyük Türbülans (Düz H., 2013)

DNS de olduğu gibi LES çözümdeki yüksek hesaplama maliyeti de LES kullanımını sınırlamaktadır. Bu iki yöntem dışında türbülans akıştaki tüm türbülans ölçekleri modelleyerek çözen RANS yöntemi vardır. Bu yöntemin hesaplama maliyeti diğer iki yönteme göre çok düşük kalmaktadır. Bu nedenle türbülans akışlarının çözümünde en çok kullanılan yöntem olmuştur. Burada akış alanındaki türbülans etkiler zamandan bağımsız olarak daimi bir akış alanı kabulü ile çözülür. Bu modellere RANS Türbülans modelleri denir. Modelleme derecesi ve hesaplama maliyeti yönünden bu üç sayısal metot karşılaştırıldığında aşağıdaki grafik ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.2. Sayısal üç Türbülans çözme metodunun hesaplama maliyeti ve modelleme derecesi yönünden karşılaştırılması (Düz H., 2013)

Türbülanslı akışları çözmeye yönelik tüm yöntemler aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır.



Şekil 4.3. Türbülans modelleme seviyeleri (Düz Hasan, 2013)

Şekil 4.3.'te verilen türbülans çözüm yöntemlerinin matematiksel temelleri ve uygulama alanları ise aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

## 4.7 RANS Türbülans Modelleri

RANS türbülans modelleri birinci dereceden kapatıcı ve ikinci dereceden kapatıcı modeller olarak iki kısma ayrılır. Birinci dereceden kapatıcı modeller Boussinesq hipotezine göre modelleme yaparken ikinci dereceden modeller ise Boussinesq hipotezini kullanmazlar. Bugün ANSYS paket programında CFX akış çözücü programda kullanılan birinci dereceden ve ikinci dereceden türbülans modelleri aşağıda sıralanabilir.

### 4.7.1 RANS Modeller

#### 4.7.1.1 Eddy-viskozite modeller

- Sıfır denklemlerli model
- Spalart almaras modeli (bir denklemlerli model)
- Standard k- $\epsilon$  modeli
- RNG k- $\epsilon$  modeli
- Standard k- $\omega$  modeli
- Baseline (BSL) yerel k- $\omega$  modeli
- SST yerel k- $\omega$  modeli

#### 4.7.1.2 Reynolds-gerilme modelleri (RSM)

- Launder, Reece and Rodi üretim izotropizasyon modeli (LRR Reynolds gerilmeleri)
- Launder, Reece and Rodi sanki-izotropik modeli (QI Reynolds gerilmeleri)
- Speziale, Sarkar and Gatski Modeli (SSG Reynolds gerilmeleri)
- SMC- k- $\omega$  modeli (Omega Reynolds gerilmesi)
- Baseline (BSL) Reynolds gerilme modeli
- Explicit cebirsel Reynolds Gerilme Modeli (EARSM)

#### 4.7.2 Hibrid modeller

- LES
- Detached Eddy Simulasyonu (DES)

- Scale-Adaptive Simulasyonu (SAS)
- Kaldırma kuvveti Türbülans Modeli

### 4.7.3 Laminar akış çözüm

Laminar akışlar Navier-Stokes denklemleri tarafından doğrudan çözülür herhangi bir modellemeye gereksinim yoktur. Laminar akışın simülasyonu için bir türbülans modeli gerekmez. Sadece düşük Reynolds sayılı akışlara uygulanır ( boru akışı için laminar akış rejimi  $Re < 2000$  'dir.). Çözücü programda "Output" dosyasında maksimum Reynolds sayısının laminar akış rejiminde olup olmadığı daima kontrol edilmelidir. Eğer laminar akış için simülasyon kurulmuşsa, fakat gerçek akış türbülanslı ise, yakınsama zordur ve simülasyon gerçek çözüme ulaşmaz.

### 4.7.4 Sıfır denklemlerli model

Mevcut türbülans modelleri arasında en basit ve en hızlı sonuç veren modeldir. Bu modelde sabit bir türbülans viskozitesi tüm akış alanı için hesaplanır. Türbülans viskozitesi türbülans hız ölçeği ( $u_t$ ) ve Prandtl ve Kolmogorov tarafından önerilen türbülans uzunluk ölçeğinin ( $l$ ) bir ürünü olarak aşağıdaki gibi modellenir.

$$\mu_t = \rho f_\mu u_t l \quad (4.3)$$

Burada,  $f_\mu$  oransal bir sabittir ve  $l$  ise uzunluk ölçeğidir. Sıfır denklemlerli model kullanımı basittir, çok kısa zamanda yaklaşık sonuçlar üretebilir ve yüksek ileri türbülans modelleri kullanan simülasyonlar için iyi bir başlangıç tahmini sağlar. Bu modelde tüm akış alanı için sabit bir türbülans viskozitesi hesaplanır. Eğer kullanıcı tarafından bir türbülans viskozitesi belirtilmemişse, bu değer çözücünün hesaplanan değeri yerine kullanılır. Akış problemlerin son sonuçlarını elde etmek için bu model kullanılmamalıdır.



#### 4.7.5 Bir denklemlı model

Bu modele Spalart-Allmaras modeli denir. Bu modelde Türbülans viskozitesi aşağıdaki formül modeller.

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{v1} \quad (4.4)$$

Burada  $\tilde{\nu}$  transport deĐiŐkenidir. Bu modelde,  $\tilde{\nu}$  yakın-duvar bölgesi dışında türbülans kinematik viskozitesine benzerdir.  $f_{v1}$  viskoz sönümleme fonksiyonudur ve bir transport denklemi ile modellenmektedir. Spalart Allmaras modeli çözüm için tek transport denklemini kullanan basit tek denklemlı bir modeldir. Bu model özellikle duvar sınırlı akışları içeren havacılık uygulamaları için geliştirilmiştir. Bu yüzden pozitif basınç gradyanına sahip sınır tabakalarda iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür. Aynı zamanda turbo makinalarda da önem kazanmaya başlamıştır. Orijinal formu olarak; düşük Reynolds sayılı bir modeldir.

#### 4.7.6 İki denklemlı modeller

İki denklemlı modeller de Boussinesq hipotezine dayalıdırlar. Bu modeller, hesaplama doğruluğu ve sayısal çaba arasında iyi bir uyıŐma sağladıklarından çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu modellerde iki ayrı transport denklemi oluşturulur. Bu yüzden iki denklem ifadesi kullanılmıştır. İki denklemlı modeller k- $\epsilon$  (k-epsilon) ve k- $\omega$  (k-omega) olarak iki farklı Şekilde modellenmiŐtir.

##### 4.7.6.1 K-epsilon modelleri

Bu modelde  $k$  türbülans kinetik enerjisi ve epsilon ( $\epsilon$ ) ise türbülans eddy yayılma oranıdır. k-epsilon modeli türbülans viskozitesini, türbülans kinetik enerjisi ve yayılma oranının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi modeller.

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.5)$$

Burada  $c_\mu$  model sabitidir. Bağıntıdaki  $k$  ve  $\varepsilon$  değerleri k-omega modeline benzer iki ayrı diferansiyel transport denklemi ile modellenerek hesaplanır. En çok vaat veren türbülans modellerinden biri olan k-epsilon modeli endüstrinin standart bir modelidir. Duvar sınırlı akıslarda doğruluğu ve sağlamlığu sağlamak için k-ε modeli ölçülebilir duvar fonksiyonlarını (çeper yasaı ve logaritmik yasa) kullanmaktadır. Bu duvar fonksiyonlarının geçerli olabilmesi için boyutsuz duvar mesafesinin  $y^+ < 300$  olması veya sınır tabaka içerisinde duvar normali boyunca minimum 10 tane düğüm noktasının bulundurulması istenir. Bu model, sınır tabaka içerisindeki hız profiline duvar fonksiyonlarıyla oluşturulmasını sağlayan bir modeldir. Bu nedenle sınır tabakanın doğrudan çözümlenmesinin gerekmediği akış türlerinde çabuk çözüm sağlar. Bu modellerin uygun olmadığı bazı uygulamalar ise aşağıda verilmiştir.

- Sınır tabaka ayrılmalı akışlar
- Ani değişimli akışlar
- Çevrıntili akışlar
- Eğik yüzeyler üzerindeki akışlardır.

k-epsilon modellerinden biri olan RNG k-epsilon Modeli ise standart k-ε modeline karşı bir alternatiftir. Genelde standart k-ε modeliyle karşılaştırıldığında az iyileşme sağlamıştır.

#### 4.7.7 K-omega modelleri

K-omega modelinin avantajlarından biri düşük-Reynolds sayılı hesaplamalar için yakın duvar işlevinin olmasıdır. Bu ifadede "düşük Reynolds sayılı" duvara yakın hız düşüktür ve bu yüzden bu hız ile hesaplanan Reynolds sayısı düşük olmaktadır. Bu modellerde duvara yakın sınır tabaka, duvar fonksiyonları devreye sokmadan, yüksek çözünürlüklü ağ ile çözüldüğünden (laminar alt tabakanın çözümlenmesi) bu gibi modellere düşük Reynolds sayılı modeller denilmiştir. k-omega modeli, türbülans viskozitesini türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ) ve türbülans frekansı ( $\omega$ ) ile ilişkilendirerek aşağıdaki gibi modeller.

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (4.6)$$

Bağıntıda yer alan türbülans kinetik enerjisi ve türbülans frekansı iki ayrı transport denklemi ile hesaplanır.

k-denklemleri:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v} k) = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P_k - \dot{\beta} \rho k \omega + P_{kb} \quad (4.7)$$

$\omega$  -denklemleri:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v} \omega) = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial y} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \dot{\beta} \rho \omega^2 + P_{\omega b} \quad (4.8)$$

$P_{kb}$  ve  $P_{\omega b}$  kaldırma kuvvetlerinin etkisini göstermektedir.  $P_k$  ise viskoz kuvvetler nedeniyle oluşan türbülans üretimini göstermektedir. Türbülans modellemede ana problemlerden biri pürüzsüz bir yüzeyden akış ayrılmasının doğru tahmin edilmesidir. Standart k- $\epsilon$  modelleri pozitif basınç gradyanına sahip akışlarda yüzeyden akış ayrılmasının yerini ve miktarını tahmin etmede yetersiz kalmaktadır. Akış ayrılması ise pek çok teknik uygulamada yer alır, özellikle uçak aerodinamiğinde, çünkü bir uçağın uçuşu kanatlardan akış ayrılması ile kontrol edilmektedir. Bu sebepten, aerodinamik topluluğu bu uygulama için çok sayıda ileri türbülans modeli geliştirmiştir. Geliştirilen yeni modeller çok sayıdaki testte ve endüstriyel uygulamalarda ayrılmayı önemli bir şekilde doğru tahmin etmişlerdir. Ayrılmanın tahmin edilmesi pek çok teknik uygulamada hem iç ve hem de dış akışlarda çok önemli olmaktadır. Bu alanda en çok vaat veren iki denklemler k-omega (k- $\omega$ ) denklemlerine sahip modellerdir. k-omega denkleminin avantajlarından biri yakın duvar işlevidir. Bu işlev, düşük Reynolds sayılı formlardan duvar fonksiyonlarına geçişi düzgün bir şekilde sağlamaktadır. Bu işlev yüksek çözünürlüğe sahip duvar sınırlı akışlarda doğrudan çözüm sağlarken kaba ağlara sahip duvar sınırlı akışlarda ise duvar fonksiyonlarını işletir. k-omega modelindeki eksikliklerin giderilmesi için iki model daha geliştirilmiştir.

**Bunlar:**

- Baseline (BSL) k-Omega Modeli ve

- Shear-stress transport (SST) k-Omega (Kayma Gerilmesi Taşınım) modelidir.

Bu tez çalışmasında kanatlar üzerinden akış ayrılmalı bir akış olduğundan, sayısal çözüm için k-omega SST modeli tercih edilmiştir. SST k-omega modeli ile ilgili ayrıntılı bilgi aşağıda açıklanmıştır.

#### **4.7.7.1 SST k-omega modeli**

SST k- $\omega$  modeli, akış ayrılmasının yerini ve miktarını yüksek doğrulukta tahmin etmek için tasarlanmış bir modeldir. SST k- $\omega$  modeli akış ayrılma tahminlerinde büyük bir iyileşme sağlamıştır. Bu modelin yakın duvar işlevinden yararlanmak için sınır tabaka içerisinde minimum 15 düğüm noktası veya  $y^+ < 1$  olacak şekilde duvara yakın ağ çözünürlüğü sağlanması istenmektedir. Yine ayrıca bu modelin duvar fonksiyonlarından yararlanmak için  $y^+ < 300$  olacak şekilde duvara yakın ağ çözünürlüğü oluşturulmalıdır.

#### **4.7.8 Reynolds gerilme modelleri**

Reynolds Gerilme Modelleri Boussinesq hipotezini kullanmazlar fakat Reynolds gerilmelerinin her bileşeni için ve yayılma oranı için transport denklemi yazarak doğrudan Reynolds gerilmelerini çözerler. Reynolds gerilme modeli büyük akım yolu eğriliğine sahip ve çevrintili üç boyutlu karmaşık türbülanslı akışlar için avantajlıdır. Fakat model daha karmaşıktır, yoğun hesaplamalıdır, eddy-viskozite modellerine göre daha zor yakınsamaktadır. Reynolds gerilme modeli aşağıda verilen akış türlerini kapsamaktadır.

- Çevrintili akışlar
- Güçlü akım yolu eğriliğine sahip akışlar
- Kaldırma kuvvetlerinin etkili olduğu akışlar
- İkincil akışlar

Teorik olarak Reynolds gerilme modelleri karmaşık akışlara daha uygundur, bununla birlikte, uygulamalar iki-denklemlilik modellere karşı tamamıyla mükemmel olmadıklarını da göstermiştir.

#### 4.7.9 Büyük eddy simülasyonu

Türbülanslı akışlar geniş bir aralığa sahip çevrinti (eddy) ölçeklerine sahiptirler. Büyük ölçekli eddy'ler küçük ölçekli eddy'lere göre daha enerjiktir. Türbülans spektrumundaki tüm ölçekler DNS ile doğrudan çözülebilmektedir fakat DNS'nin yüksek hesaplama maliyeti onu düşük Reynolds sayılı akışların çözümünde sınırlı bırakmıştır. LES çözümde ise, büyük ölçekli eddy'ler doğrudan çözülür ve küçük ölçekli eddy'ler ise RANS denklemlerinde modellenir. Bu nedenle LES DNS ye karşı bir alternatif olmaktadır. Sadece büyük eddy'leri çözmek, DNS' den farklı olarak, daha az ağ elemanı kullanılması anlamına gelir. Bununla birlikte LES, RANS ile çözümler için sağlanan ağdan çok daha küçük boyuttaki ağlara gereksinim duyar. Ayrıca, LES türbülanslı akış için zamana bağlı çözüm sağlar. Sonuç olarak, LES çözümün hesaplama maliyeti RANS çözümünden çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle LES ile çözümler genellikle paralel hesaplama veya yüksek başarımlı bir bilgisayarın kullanılmasını zorunlu kılar. LES ile bir çözüme başlamadan önce onun en uygun çözüm yolu olup olmadığı düşünülmelidir. LES aşağıdaki problem türleri için uygun görülebilir.

- Kararsız olacağı düşünülen akışlar, çevrinti oluşturan akışlar
- Hortuma benzer yapıların etkisiyle kararsız olacağı düşünülen akışlar
- Kaldırma kuvvetinin etkili olduğu akışlar, alttan ısıtma ile oluşan dengesiz bölgeler veya daha ağır akışkan altında kalan daha hafif akışkanların hareketi gibi
- RANS yaklaşımının başarısız olduğu akışlar (örneğin anizotropik türbülans içerenler)
- Kimyasal reaksiyonlar veya mikro-karışma gibi küçük ölçekli işlemlerde küçük türbülans yapılarının görüntülenme ihtiyacı
- Akıştaki sesin hesaplanması
- Diğer dalgalı bilgiler gerekiyorsa (dalgalı basınç kuvvetleri gibi).

#### 4.7.10 Ayrık eddy simülasyonu (DES)

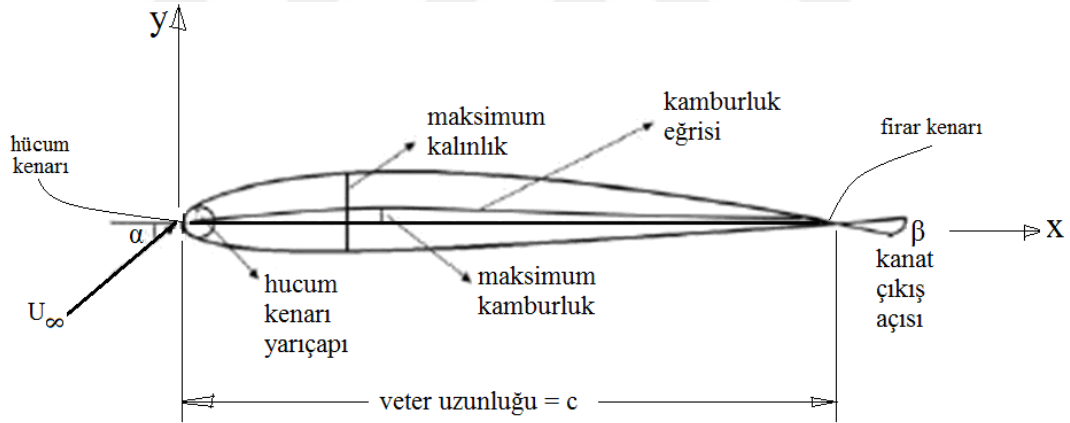
Bu yöntemde RANS ve LES formülleri akış alanının ayrı bölgelerinde kullanılarak hibrid bir çözüm sağlarlar. Duvar sınırlı akışlarda sınır tabaka içerisindeki akış alanı RANS modelle çözülürken sınır tabaka dışındaki bölge ise LES ile çözülür. İkisi arasındaki sınır çizgisinin tahmini ise RANS çözümden gelen bilgilerle olmaktadır. Burada, DES'in LES üzerindeki tek avantajı yüksek Reynolds sayılarda bilgisayar işleme zamanını yüksek bir şekilde azaltmasıdır. DES metodu, RANS formülünde k-omega SST modelini kullanır. Özellikle akış ayrılmalarının yüksek olduğu akışlarda ve duvar sınırlı yüksek Reynolds sayılı akışlarda DES tercih edilmektedir. DES aşağıda verilen mühendislik uygulamaları için önerilmektedir.

- Aerodinamik olmayan kütlelerin etrafındaki akış ( bina, köprü gibi)
- Yerde giden araçların etrafındaki akış ( araba, tren, kamyon gibi)
- Ses çıkaran nesnelerin etrafındaki akış (araba aynası gibi)

DES modeline benzer hibrit çözümler sağlayan başka modeller de geliştirilmiştir. Bunların modellenme derecesi azalan yönde sıralandığına URANS, SAS, DES ve LES sırasında olmaktadır.

## 5 KANAT YAPISI VE HAVANIN KUVVETSEL ETKİLERİ

NACA uçaklar ile ilgili çalışmalar yapmaktadır. Uçak kanatları ve çeşitli cisimlerin hava ile etkileşimlerini araştıran NACA, zamanla birçok rüzgâr tüneli inşa etmiş ve ABD'nin bütün savaş uçaklarının tasarımlarını yönlendiren bir kurum haline gelmiştir. NACA kanat profillerini Şekil 5.1.'de ki gibi tanımlamıştır. Binlerce kanat çeşidi bu özelliklerin değiştirilmesiyle ortaya çıkarılmıştır. Farklı kanatlar farklı uçuş tipleri için farklı performansa sahip olabilmektedir. Bazı uçuşlarda kaldırma kuvveti önemli olurken bazı uçuşlarda ise sürükleme kuvveti azaltılmaya çalışılır. Bu şekilde pek çok uygulama için değişik şekillerde kanatlar tasarlanmıştır. Şekil 5.1.'de gösterildiği gibi veter (kanadın boyu) uzunluğu hücum kenarını ile firar kenarını birleştiren bir doğrudur. Kanat profilinin alt ve üst yüzey sınırlarına eşit uzaklıkta çizilen eğriye kamburluk eğrisi denir. Burada  $\alpha$  hücum açısı ve  $\beta$  açısı ise kanat çıkış açısıdır. Kanadın kalınlığı maksimum kalınlık ve kamburluk eğrisi ile veter uzunluğu arasındaki kalınlık maksimum kamburluktur.

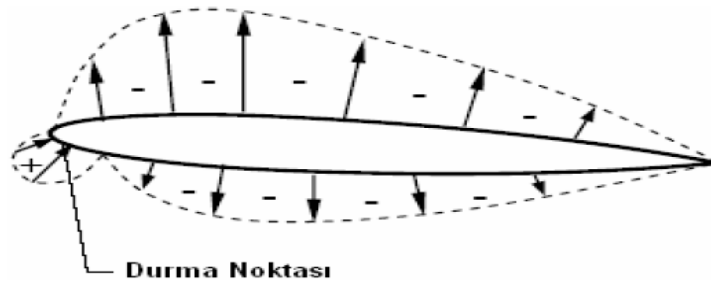


Şekil 5.1. Kanat profili karakteristikleri (Geissler, 2003)

NACA kanat profillerini dört dijit serilerinin gösterimi; Örnek: NACA0012 kanadının, sağında ilk iki basamak, kanatta maksimum kalınlığını gösterir. Bu da veter uzunluğunun yüzde katı olarak belirtilmiştir. Yani bu kanatta veter uzunluğu 0.12 katıdır. Kanadın maksimum kamburluğunu soldan ilk basamak belirtir, kanadın maksimum kamburluğunun olduğu yeri, soldan ikinci basamak gösterir ve bu tarif veter uzunluğunun katı olarak hücum kenarından uzaklığını gösterir.

## 5.1 Havanın Kuvvetsel Etkileri

Havadan daha ağır olan uçağın havada uçabilmesi için taşıma kuvvetine ihtiyaç vardır. Taşıma kuvvetinin kaynağı uçak motorunun ürettiği itici kuvvet ile uçağın elde ettiği hızdan dolayı uçağın yüzeyleri üzerinde oluşan hava akımlarıdır. Kanadın geometrisi sayesinde üzerinde oluşan basınç dağılımı, uçağın havada kalmasını sağlar. Cisim üzerindeki aerodinamik kuvvetler, bu basınç dağılımı ve kayma gerilmeleri sayesinde meydana gelir. Kanat profilinin geometrisine bağlı olarak oluşan bu aerodinamik kuvvetler değişmektedir. Bir uçak ya da benzeri bir cismin etrafından geçen havanın izlediği yol bu cisim tarafından değiştirilir. Bu sayede havanın yerel hızı değişmiş olur. Cismin çevresinde çeşitli noktalardaki farklı hızlar, Bernoulli denkleminde göre cisim çevresinde her noktada değişen bir basınç dağılımına neden olur. Şekil 5.2.'de basınç dağılımındaki negatif işaretler basınçtaki düşümü göstermektedir. Pozitif işareti, basınç dağılımı hücum kenarına çarpan havanın oluşturduğu statik basınçtan kaynaklanmaktadır. Durma noktasında havanın hızı sıfıra eşit olduğundan dinamik basınç sıfırdır ve statik basınç toplam basınca eşittir.



Şekil 5.2. Düşük hücum açısına sahip kanat profili etrafındaki basınç dağılımı (Geissler, 2003)

Şekilde gösterildiği gibi bir kanat alt yüzündeki basınç üst yüzündeki basınçtan daima yüksek olur. En düşük basınç akışın üst yüzeyde hızlandığı yerde oluşur. Buda hücum kenarına yakın bölgedir. Çünkü akış burada hala laminardır ve statik basınç dinamik basınca dönüşmektedir. Hücum kenarının ön tarafında ise akış hızının düştüğü bölgedir. Burada akış durduğu için buradaki basınca durma basıncı denir. Burada dinamik basınç statik basınca dönüşmektedir. Hafif bir pozitif hücum açısı ile bu basınç kaldırma kuvvetine yardımcı olmaktadır. Genellikle kanat profili etrafındaki basınç dağılımı, denklem (5.1)'deki gibi boyutsuzlaştırılır ve bu da basınç katsayısı olarak belirtilir.



$$C_p = \frac{(P - P_\infty)}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (5.1)$$

Bu denklemde;

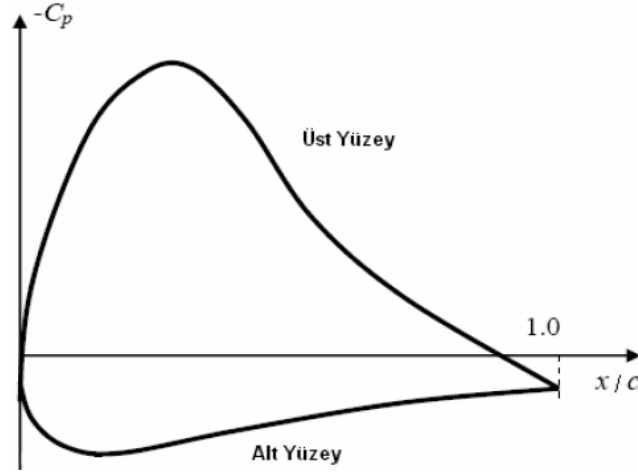
$P$  = kanat yüzeyindeki mutlak basınçtır.

$P_\infty$  = serbest akım basıncı veya atmosfer basıncıdır.

$P - P_\infty$  = kanat yüzeyinde oluşan etkin basınçtır

$U_\infty$  = serbest akım hızıdır.

Şekil 5.3.'te kanadın alt ve üst yüzeyinde basınç katsayısının kanat profilinin veter uzunluğu boyunca değişim grafiği verilmiştir. Veter uzunluğu, kanat profilini hücum (önden) kenarı ile firar (arkadan) kenarını birleştiren hattır.



Şekil 5.3. Basınç katsayısının kanat boyu uzunluğunca değişimi (Geissler, 2003)

Basınç kuvvetleri hava ile cisim yüzeyi arasındaki sürtünme kuvvetleri bileşkeleri cisim üzerinde bir bileşke kuvvetle moment oluşturur. Cisme etkiyen kuvvet ve momente aerodinamik kuvvet ve moment adı verilir. Oluşan bu kuvvetler;

### 5.1.1 Sürükleme kuvveti:

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A \quad (5.2)$$

$$A = w * c$$

$C_D$  sürüklenme kuvveti katsayısıdır  $w$  ise kanat genişliğidir.  $F_D$  kanada etkiyen yatay kuvvet olmaktadır. Bir uçak için düşünüldüğünde uçağın hareketini engelleyen direnç kuvvetleridir.

### 5.1.2 Kaldırma kuvveti:

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A \quad (5.3)$$

$C_L$  sürüklenme kuvveti katsayısıdır.  $F_L$  kanada etkiyen düşey yönlü kuvvetlerdir (Denklem 5.3). Bir uçağı yerçekimine karşı havada tutan veya yükselmesini sağlayan düşey yönlü aerodinamik kuvvettir. Sürüklenme katsayısı aşağıda gösterildiği gibi kanat yüzeyine etki eden toplam sürtünme ve basınç kuvvetlerinin  $x$  yönündeki (yatay yönündeki) bileşke kuvvetinin boyutsuzlaştırılmış halidir. Kaldırma katsayısı da yine kanat yüzeyine etki eden toplam sürtünme ve basınç kuvvetlerinin  $y$  yönündeki (düşey yönde) bileşke kuvvetinin boyutsuzlaştırılmış halini göstermektedir.

$$C_L = C_N \cos \alpha - C_A \sin \alpha \quad (5.4)$$

$$C_D = C_N \sin \alpha + C_A \cos \alpha \quad (5.6)$$

Bu denklemlerde,  $\alpha$  hücum açısını,  $C_N$  kanat profili üzerindeki normal kuvvet katsayısını,  $C_A$  aksel yönde kuvvet katsayısını ve  $C_P$  kanat yüzeyindeki basınç katsayısını göstermektedir. Denklemde  $C_N$  ve  $C_A$  aşağıda gösterildiği gibi kanat yüzeyi boyunca yerel oluşan basınç ve sürtünme kuvveti katsayılarının entegre edilmesiyle oluşmaktadır.

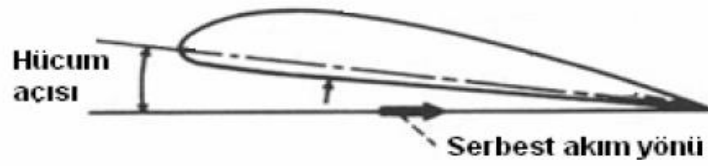
$$C_N = \frac{1}{c} \left[ \int_0^c (C_{p,alt} - C_{p,üst}) dx + \int_0^c (C_{f,üst} \frac{dy_{üst}}{dx} - C_{f,alt} \frac{dy_{alt}}{dx}) dx \right] \quad (5.7)$$

$$C_A = \frac{1}{c} \left[ \int_0^c (C_{p,üst} \frac{dy_{üst}}{dx} - C_{p,alt} \frac{dy_{alt}}{dx}) dx + \int_0^c (C_{f,üst} + C_{f,alt}) dx \right] \quad (5.8)$$

Burada  $C_f$  kanat yüzeyindeki sürtünme kuvveti nedeniyle oluşan sürtünme katsayısıdır.

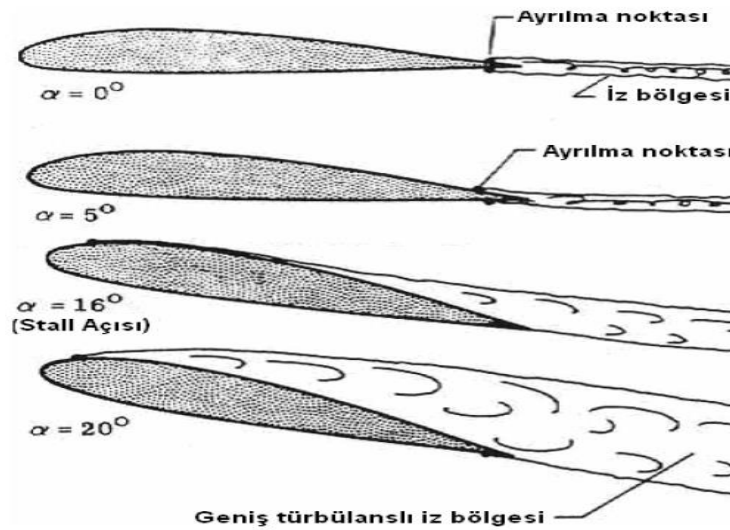
### 5.1.3 Hücüm açısı ( $\alpha$ )

Hava aracının hız vektörü ile kanat veter yönü arasında kalan açığa hücüm açısı denir. Şekil 5.4.'te gösterildiğı gibi. Kaldırma kuvveti (CL) hücüm artışıyla paralel artar. Bu açının belirli bir değeri geçmesi ile akım çizgileri kanat üzerinde tutunamamaktadır.



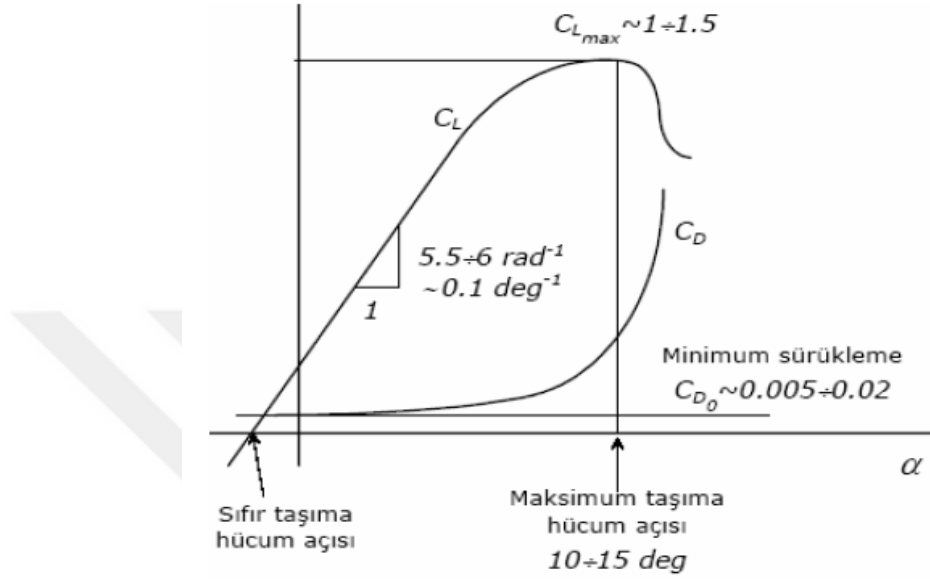
Şekil 5.4. Hücüm açısı ( $\alpha$ ) (Geissler, 2003)

$0^\circ$  hücüm açısına sahip bir kanat profilinde firar kenarında akım ayrılmaları başlar ve kanat arkasında iz bölgesi oluşur Şekil 5.5.'te gösterildiğı gibi. Hücüm açısı arttırıldıkça ayrılma noktası hücüm kenarına yaklaşır ve yaklaşık  $12-16^\circ$ lik hücüm açısına ulaşıldığında akım ayrılması (stall; düşme) başlar. Stall açısı türbülansın başladığı açıdır. Stall açısından daha fazla, hücüm açısının arttırılmasıyla kaldırma kuvveti azalır ve sürüklenme kuvveti hızla artar. Hücüm açısı küçüldüğünde kaldırma kuvveti azalır, uçağın hızı arttırıldığında kaldırma kuvveti artar.



Şekil 5.5. Kanat profili etrafındaki akış ve hücüm açısının değışimi (Geissler, 2003)

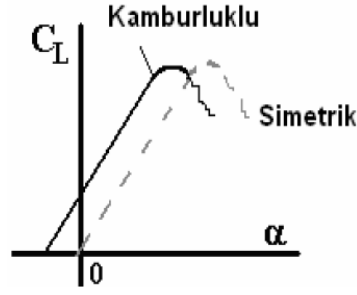
Şekil 5.6.'da kaldırma katsayısının stall (uçak irtifa kaybeder) açısına kadar arttığı ve bu açı değerinden sonra düşmeye başladığı görülmektedir. Ayrıca hücum açısının artışı ile ayrılma noktasının hücum kenarına yaklaşması sonucu sürükleme katsayısı ( $C_D$ ) artmakta olduğu görülmektedir.



Şekil 5.6. Aerodinamik katsayıların hücum açısı ile değişimi (Geissler, 2003)

#### 5.1.4 Kanattaki kamburluk

Uçak kanadında % 0-5 aralığında kamburluğa rastlanmakta. Kompresör ve türbinlerde daha fazla kambur profiller gözlemlenebilmekte. Hücum kenarı ile firar kenarını birleştiren doğruya veter çizgisi denir. Kanat üst yüzeyi ile alt yüzeyi arasındaki orta noktaları birleştiren eğriye kamburluk eğrisi denir. Kamburluk eğrisi ile veter doğrusu arasındaki maksimum mesafe kamburluktur; Şekil 5.1.'de görüldüğü gibi. Kanat profiline kamburluk verilerek üst yüzeyde alan artırılır ve bu şekilde havanın hızı artırılmış olur. Hava hızının artırılması ile Bernoulli denkleminde basınç daha fazla düşürülmektedir. Bu şekilde alt yüzey ile üst yüzey arasında basınç farkı artmakta ve sonuçta kaldırma kuvveti ( $C_L$ ) artırılmış olur.



Şekil 5.7. Simetrik kanatta elde edilmiş olan kaldırma kat sayısı ve Kamburluk değişimi (Geissler, 2003)

## 5.2 Aerodinamik Performansı Artırma Yöntemleri

Bir uçak kanadı ya da türbin kanadın performansı  $\frac{C_L}{C_D}$  oranıyla ölçülmektedir.

Kanadın aerodinamik performansı artırmak için:

- Kanat profili etrafında oluşan kaldırma kuvvetini ( $C_L$ ) arttırmak ve
- Sürüklenme kuvvetini ( $C_D$ ) azaltmak en iyi yöntemdir.

### 5.2.1 Kaldırma kuvvetini artırma yöntemleri

- Kanat profili etrafındaki basınç dağılımını arttırmak
- Profil etrafındaki sınır tabaka kalınlığının düşürülmesi ya da
- Türbülanslı sınır tabakanın firar kenarı civarına taşınması ile sağlanabilir.

### 5.2.2 Aerodinamik performansı artırmak için:

- Hücum açısı ( $\alpha$ ) arttırılabilir
- Kanat profiline kamburluk verilebilir ya da
- Yüksek kaldırma aygıtları kullanılabilir.

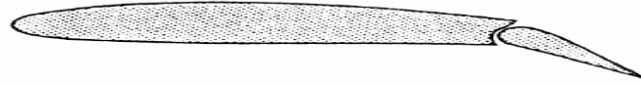
#### 5.2.2.1 Yüksek kaldırma araçları

Kanat profillerinde yüksek kaldırma, düşük sürüklenme ve sağlam bir yapının olması için çalışmalar yürütülmektedir. 50 yıla yakındır kullanılan klasik kanat profillerinde en fazla  $C_L$  1,4 ile 1,5 ve en düşük  $C_D$  ise 0.01'dir. Bu kanat profillerinin hepsi üretim kusurlarından dolayı pürüzlülük açısından hassasiyeti oldukça düşüktür.

Bunların  $C_M$ leri oldukça düşük seviyededir öyle ki kanat yüksek hızda çok yüksek bükülmeye dayanamaz.

### 5.2.2.2 Flaplar

Kamburluk uygun bir şekilde arttırılarak, maksimum kaldırma kuvveti arttırılmış olur. Uygulamada bu durum, kanat profiline üst yüzeyini kambur yapmakla ya da kanat profiline arkasını bükerek yapılır bükülen malzemeye flap denilmektedir. Kanat firar kenarına eklenmiş olan flap kanat profiline şeklini değiştirir, flap çeşitleri şekil 5.8.-5.9. da gösterilmiştir.

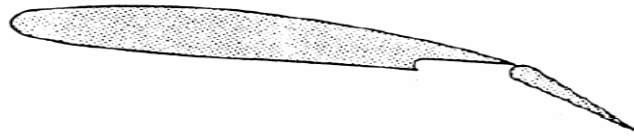


Şekil 5.8. Düzgün Flap (Geissler, 2003)



Şekil 5.9. Yarıklı şekilde Flap (Geissler, 2003)

$15^\circ$  hücum açısı ile bu flaplar kullanıldığında kaldırmadaki kuvvetinde orta seviyede artış olur. Şöyle ki  $C_L=2,2$  olur. Belirtilen değer kanat genişliğince 1,9 dur.  $15^\circ$  hücum ( $\alpha$ ) açısının üstündeki açılarda üst yüzeyde bu flapda stall (düşme) olur. Hava akımı, sınır tabaka nedeniyle meydana gelen doğrultudaki ani değişikliklerin üstesinden gelecek kadar yeterli momentuma sahip değildir. Sürükleme artışı ( $C_D$ )  $15^\circ$ 'den daha yüksek hücum açılarında çok önemli olur ve bundan dolayı kaldırma katsayısında artış olmayacaktır. Kayan flap ile düz ve yarıklı flapın bu sorunu aşılmıştır şekil 5.10.



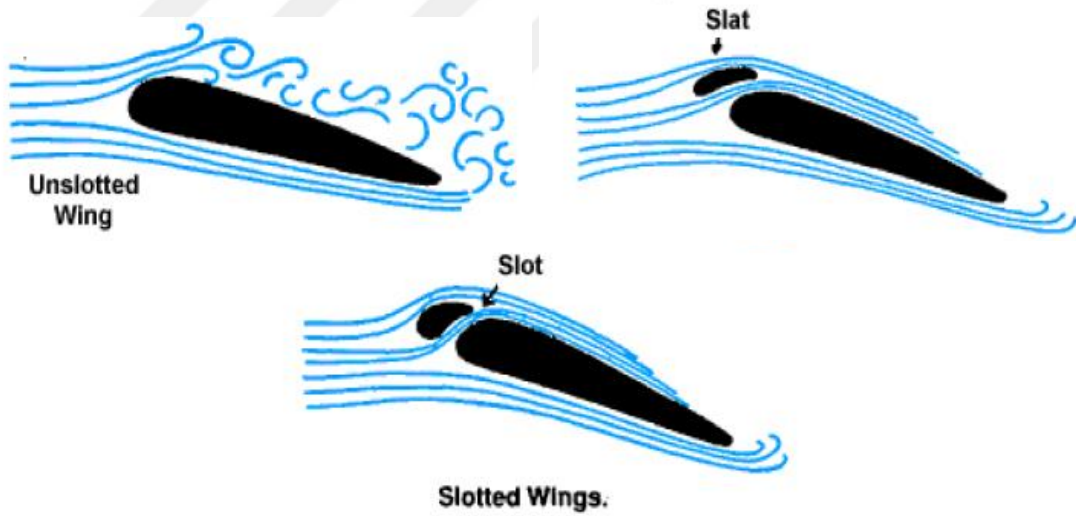
Şekil 5.10. Kayan şekildeki Flap (Geissler, 2003)

Yarıklı flap kanat profiline hücum kenarında bir boşluk oluşturur. Koni şeklindeki boşluktan havanın hızlanması sağlanır. Hızlanan hava üst yüzeyde oluşan sınır tabakaya

doğru hareket eder ve sınır tabakanın oluşmasını geciktirir. Bu şekilde kanat profillerinde flapların kullanılması 25°'lik hücum açısına kadar verimli hale gelebilmektedir.

### 5.2.2.3 Slot ve slat

Slot: kanadın hücum tarafında sabit olan açıklık kısmına denir. Slat: kanadın Hücum tarafında hareketli olan açık kısma denir. Şekil 5.11. Kimi uçaklarda hücum kenarlarında yalnızca slat, başkalarında da slat ve flap beraber kullanım alanı bula bilmektedir. Slatlar firar kenarı flapları ile birlikte kullanılarak (kanat profili değişmiş olur) uçağın kaldırma kuvveti artırılır. Slatların diğer bir görevi de, uçakta hücum açısının artışıyla ile oluşan stall olayı önlenmiş olur. Slat ile sınır tabakanın kontrolü sağlanmakta ve sınır tabaka üzerine hızlandırılmış hava gönderilerek sınır tabakayı kanadın gerisine iter, bu şekilde hava akımını kanadın profiline yapıştırmak için ekstra lokal türbülans olmaksızın hava akışına izin verilmiş olur.



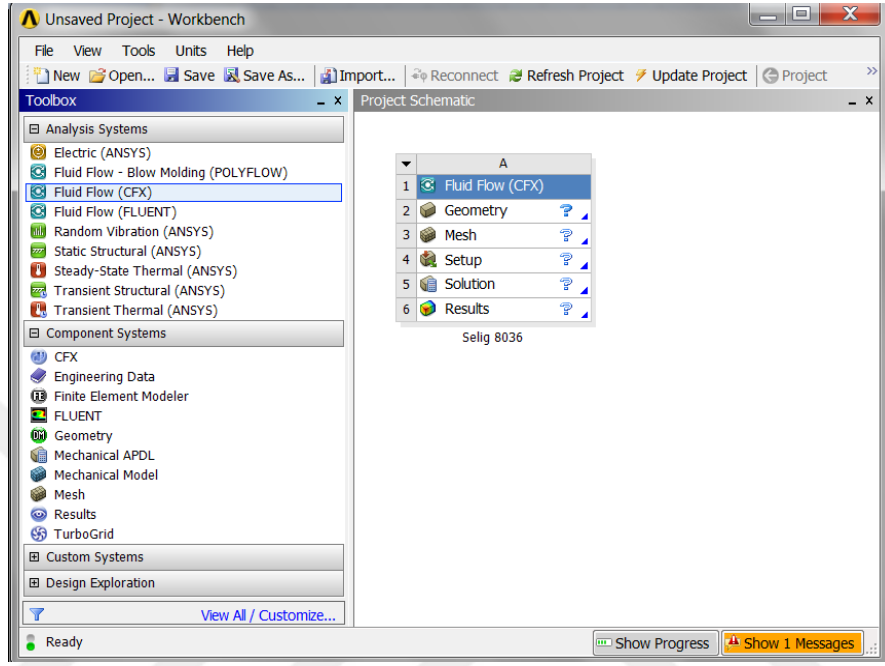
Şekil 5. 11. Slat ya da Slot kullanımı ile kanat profili etrafındaki akış kontrolünün gösterimi (Geissler, 2003)

## 6 SAYISAL ÇÖZÜMLEME

Kanat profiline bağılı olarak rüzgâr enerjisinden faydalanılır. Bundan dolayı uçaklarda kullanılan kanat profilleri, rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Bu kanat profilleri farklı hava hızlarında ve farklı hücum açılarında farklı performanslar gösterebilmektedir. Rüzgârın farklı hızlarda ve farklı açılarda esmesi, kanat performanslarını etkilediğinden, her durumda en iyi performansı gösterecek bir kanat profili bulmak neredeyse imkânsızdır. Farklı uygulamalar için pek çok rüzgâr türbini kanadı oluşturulmasına rağmen daha yüksek verimli rüzgâr türbinleri oluşturmak amacıyla yeni kanat profillerinin araştırılması gerektiği görülmüştür. Rüzgâr türbini kanatlarının gelişimi daha çok uçak kanat profili serileri üzerine kuruludur. Örneğin NACA230, NACA44, NACA63-2, NACALS ve FX kanatları bunlardan birkaçı sayılır. Bunlardan başka rüzgâr türbinleri için özel oluşturulmuş bazı kanatlar vardır. Örneğin NRELS serili kanatlar Amerikalılar tarafından, DU serili kanatlar Almanlar tarafından, RISO serili kanatlar ise Danimarkalılar tarafından ve FFA-W serili kanatlar ise İsveçliler tarafından dizaynı yapılmış özel kanatlardır. Bu tez çalışmasında uçaklar için tasarlanmış farklı geometriye sahip kanat profillerinin rüzgâr türbin kanadı olarak kullanılabilmesi için performansları sayısal olarak analiz edilmiştir. Burada amaç orta ölçekli rüzgâr türbinleri için uygun kanat profillerinin tespit edilmesidir. Bunun için farklı kanat profil ailesinden beş farklı profil seçilmiş olup bir adet de hibrit kanat oluşturulmuştur. Bunlar FX 84-W-218, Selig S8036, FX-63-137, EPPLER 58 ve GOE 795'dir. Burada kanatların performansları düşük hücum açılarında ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  ve  $20^\circ$ ) ve farklı rüzgâr akış hızlarında (4, 8, 16 ve 32 m/s) sayısal olarak incelenecektir. Sayısal simülasyonda türbülanslı akış alanı RANS denklemleri ile çözülmüştür. RANS denklemlerinde oluşan Reynolds gerilmelerin çözümü için de SST k-omega türbülans modeli tercih edilmiştir. Kanat profili üzerinden akış için akış alanı geometrisinin oluşturulması, oluşturulan akış geometrisinin küçük kontrol hacimlere bölünmesi (meshing), akışın sayısal olarak çözülmesi ve çıkan sonuçlarının derlenmesi ANSYS paket programıyla gerçekleştirilmiştir. Akış alanında diferansiyel temel akış denklemlerinin sayısal olarak ayrıklaştırılıp her kontrol hacmine uygulanmasıyla akış alanında çok bilinmeyenli denklem takımları oluşur. Oluşan bu denklemler CFX akış çözücü programı ile iteratif olarak çözülmüştür. Çıkan sonuçlar ise CFD Post programında grafiksel ve görsel olarak simule edilmiştir. İlk önce Ansys Workbench proje oluşturma sayfasında CFX programı proje alanına sürüklenerek bir akış projesi



oluşturulmuştur. Bu proje penceresinde akışın sayısal olarak simule edilmesi için geometri çiziminden sonuçların simule edildiği ard işlemeye kadar tüm işlemler adım adım gerçekleştirilir. Burada tüm işlemler birbirine bağlıdır. Şekil 6.1.'de ANSYS Workbench projelendirme penceresi gösterilmiştir.



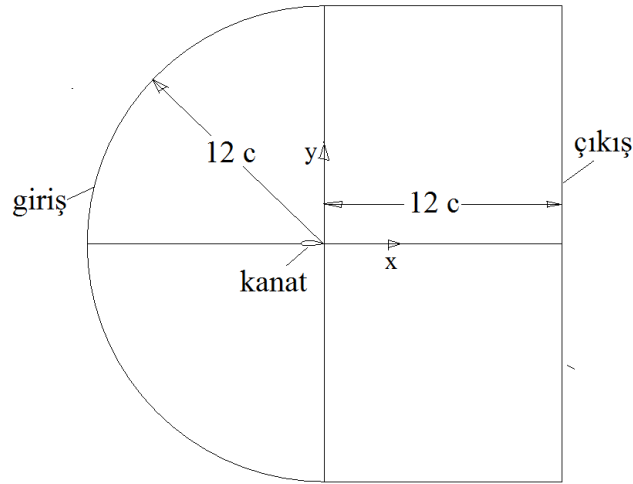
Şekil 6.1. ANSYS Workbench projelendirme penceresi

Sayısal sonuçlara güvenilirlik kazandırmak amacıyla çalışmalara ek olarak NACA0012 ve NACA2412 için çıkarılan sayısal sonuçlar bunların yayınlanmış deney değerleriyle karşılaştırılmıştır.

## 6.1 Sayısal Analizler ve Modelleme

İlk önce sayısal analizi yapılacak kanat profillerinin Kartezyen koordinatlardaki kodlama dataları [www.m-selig.ae.illinois.edu](http://www.m-selig.ae.illinois.edu) internet sitesinden temin edilmiştir. Temin edilen kanat profilleri veter uzunluğu 1 m olan modellerdir. Temin edilen datalar ile Ansys Design Modeller programında iki boyutlu Kartezyen koordinatlarda katı kanat geometrisi oluşturulmuştur. Daha sonra kanat geometrisini içine alacak şekilde veter uzunluğunun 12 katı kadar bir hava akış alanı oluşturulmuştur. Hava akış alanının dış sınırları kanat etrafında gelişen havanın etkisinin ihmal edilebilir olduğu yeteri kadar bir büyüklüğe uzatılmıştır. CFX iki boyutlu çözüm sağlamadığından akış alanı tek ağ hücresi kalınlığında extrude edilerek iki boyutlu çözüm özelliği sağlanmıştır. Katı kanat

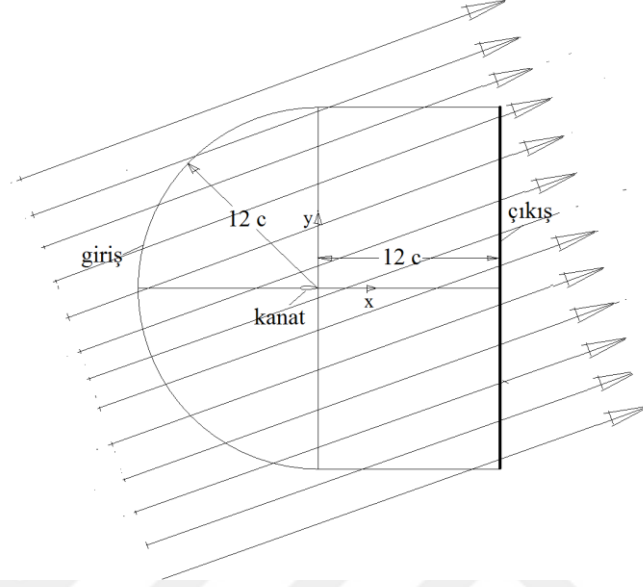
geometrisi hava akış alanından çıkarılarak ince simetrik bir hava akış hacmi oluşturulmuştur. Hava akışının temas ettiği kanat yüzeyleri hava akış hacminde duvar sınır şartı olarak atanmıştır. Burada kanat etrafındaki havanın üçüncü boyuttaki simetriliginden yararlanarak iki boyutlu çözüm sağlanmıştır. Şekil 6.3. kanat etrafındaki hava akış alanını göstermektedir. Şekil 6.2.'de çözüm ağı gösterilmiştir.



**Şekil 6.2.** Kanat üzeri akış alanı sınırları

Şekil 6.3.'te gösterildiği gibi giriş kısmı ve çıkış kısmı kanat profilinden yeterince uzakta tutulmuştur. Kanat etrafında oluşan sınır tabakanın ve kanat arkasında oluşan girdaplı akış bölgesinin etkileri sınırları etkilemeyecek şekilde giriş çıkış sınırları yeterince uzakta seçilmiştir. Burada veter çizgisi x ekseninde olacak şekilde kanat profili oluşturulmuştur. Profilin bu durumu x eksenindeki akışta sıfır hücum açısını göstermektedir. Farklı hücum açılarında ise veter çizgisi hücum açısı kadar x eksenine açı yapar. Bu durumda hava akışının x ekseninde olması durumunda farklı hücum açıları için kanat profilinin x eksenine açıyla getirilmesi gerekir. Bu da her hücum açısı için geometrinin değişmesi demektir. Geometrinin değişmesi ağın yeniden oluşturulmasına neden olur. Bu işlemler zaman alacağından kanat profilinin hücum açısı kadar dönmesine gerek kalmadan gelen hava akışı giriş kısmına hücum açısı kadar açıyla girecek şekilde oluşturulabilir. Bunun için *CFX set-up* kısmında *expression* kısmında girişteki hava Kartezyen koordinatlara göre fonksiyonel olarak sisteme formülize edilebilmektedir. Bu şekilde girişteki havanın x eksenine yaptığı açı hücum açısına eşit olur ve her hücum açısındaki analizler için bu açı değiştirilmelidir. Giriş sınır şartı, akışkanın giriş sınırlarından akış alanına her zaman girdiği anlamına gelmez. Örneğin hücum açısının 20 derece olması durumunda hava akışı giriş

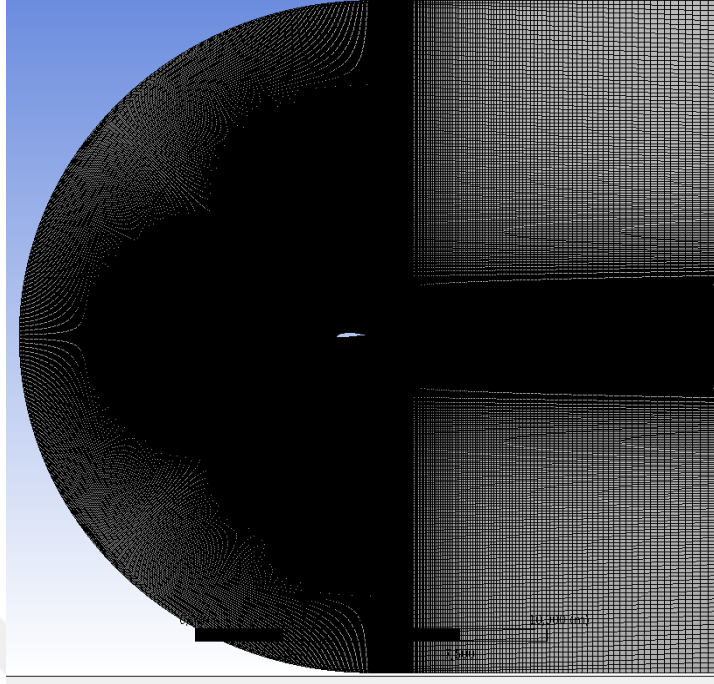
sınırlarının bir kısmından akış alanına geçerken girişin kalan kısımlarından ise akış alanından çıkışı göstermektedir. Bu durumdaki hava akışının akım çizgileri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil: 6.3. Kanat üzerinden hücum açılı hava akış vektörleri

## 6.2 Geometride Ağ Oluşturulması

Sayısal analize ilk önce NACA1200 kanat profili incelenerek başlanmıştır. Yakınlaştırılmış ağ yapısı Şekil 6.4.'de gösterilmiştir. Oluşturulan akış geometrisi küçük kontrol hacimli elemanlara bölünerek akış alanında ağ oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ kanat sınırlarına yakın sıklaştırılmış, sınırlardan uzaklara doğru ise seyrekleştirilmiştir. Bu şekilde ağ eleman sayısı minimum düzeyde tutulmuştur. Kanat etrafında hız, basınç gibi akış özelliklerinin ağ düğüm noktaları arasında değişimleri yüksek olduğundan bu gibi akış özelliklerinin değişimlerinin yakalanabilmesi için akış gelişmesinin etkili olduğu bölgelerde ağ sıklaştırılmıştır. Bu bölgeler sınır tabakanın geliştiği kanat yüzeyi yakın civarı ve firar kenarı arka akış bölgesidir. Boyutsuz duvar mesafesi  $y^+ < 2$  olacak şekilde kanat civarı etrafında ağ sıklaştırılmıştır. Kanatçık üzerinde toplam 800 adet ağ hücresi oluşturulmuştur. Otomatik ağ oluşumunda üç boyutlu akış alanında ise  $8 \cdot 10^5 - 9 \cdot 10^5$  sayıları arasında düğüm noktası ve  $4 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5$  sayıları arasında ise kontrol hacimli elemanlar oluşmuştur. Şekil 6.4. kanat çevresi ve kuyruk iz bölgesinde akış özelliklerinin yakalanabilmesi için ağ sıklığını göstermektedir.



Şekil 6.4. Kanat üzeri akışta akış alanında oluşturulan ağ yapısı

### 6.3 Ağdan Bağımsız Çözüm

Ağdan bağımsız çözümler elde etmek için ağ sayısı artırılarak çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçların ağ sayısının değişmesiyle değişmez olduğu durumlarda en son ağ sayısal çözümlerinde kullanılmıştır. Analiz sonuçlarının ağ sayısında göre değişip değişmediğini belirlemek amacıyla, NACA 2412 kanat profili için farklı ağ yapılarında analizler gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 1.** NACA 2412 için ağdan bağımsız sayısal çalışma için deneysel ve sayısal  $C_L$  değerlerin karşılaştırılması

Hücum Açısı	Deneysel	Ağ 1	Ağ 2	Ağ 3	Ağ 4
-4	-0.2	-0.19	-0.21	-0.21	-0.21
4	0.65	0.62	0.65	0.66	0.67
12	1.4	1.24	1.34	1.39	1.45
15	1.6	-	1.3	1.53	1.66
20	1.2	-	-	-	-

Bu ağ yapıları için hücre sayısı 30 bin (Ağ 1), 83 bin (Ağ 2), 116 bin (Ağ 3) ve 500 bin (Ağ 4) civarındadır. Bu ağ yapıları için elde edilen kaldırma kuvveti katsayısı  $C_L$  değerleri Tablo 1.'de görülmektedir. Ağdan bağımsız sonuçlar elde edildikten sonra akış alanının sınır şartları, akış özellikleri ve çözücü kontrol ayarları CFX akış projesinde "set up" kısmında girilmiştir. Zamana bağlı türbülans akış özellikleri RANS denklemleri

ile çözüldüğünden türbülanslı akış zamandan bağımsız çözülebilir. Bu nedenle akış türü daimi akış (steady state) olarak sisteme girilmiştir. Daha sonra akış alanı akışkan (fluid domain) olarak tanımlanmıştır. Akış alanındaki akışkan ise hava ideal gaz (Air ideal gas) olarak seçilmiştir. Referans basınç 1atm (101.325 kPa) olarak girilmiştir. Hava akışı sıkıştırılabilir akış olduğundan hücum kenarında durma noktası civarında ve diğer akış bölgelerinde basıncın artması ve azalması sonucu akışkan yoğunluğu ve sıcaklığı önemli şekilde değişmesine neden olur. Bu nedenle akışkan modellemesinde "total energy" ile enerji denklemi aktif hale getirilmiştir. Eğer enerji denklemi aktif edilmese hava tüm akış alanında izotermal olarak işlem görür. Bu durumda hava sadece basınç değişimlerinde yoğunluğu değişir. Akış alanı sabit giriş sıcaklığında olacağından kanat etrafındaki basınç dağılımı doğru olmayacaktır. Bu nedenle sıkıştırılabilir akışlarda enerji denklemine ihtiyaç duyulur. Kanat etrafında oluşan viskoz akış bölgesi de hava sıcaklığına önemli bir etkisi olacağından enerji denkleminde viskozlu etkilerin ihmal edilmemesi için "include viscous work term" terimi aktif hale getirmiştir. Girişte hava akışı daimi akış olarak akış alanına girmektedir. Giriş sınır şartında hava serbest akım hızında ve düşük türbülans yoğunluklu (1%) ve 25°C sıcaklık olduğu varsayılmıştır. Burada yerden en fazla 60m yüksekte olan rüzgar türbinleri düşünüldüğünde havanın bu yükseklikte 1atm basıncında olduğu, fazla türbülans içermediği ve genel sıcaklığında 25 C° olduğu varsayılabilir. Kışın hava sıcaklığı çok düşebilir, bu durum kanat performanslarına etki edebilir. Bu durumda sıcaklığın kanat performansı üzerindeki etkisi, ayrı bir çalışma olarak düşünülebilir. Giriş sınır şartında serbest hava akış hızı, hücum açısının bir fonksiyonu olarak;  $U_x$  ve  $U_y$  olarak girilmiştir. Akış hızı, kaldırma ve sürüklenme katsayılarını "expression" kısmında aşağıdaki gibi fonksiyonel olarak sisteme tanımlanmıştır.

$$AOA = \theta [deg] \quad (\text{hücum açısı})$$

$$F_y = force\_y()@Airfoil \quad (\text{kanat yüzeyinde y yönünde oluşan kuvvet bileşeni})$$

$$F_x = force\_x()@Airfoil \quad (\text{kanat yüzeyinde x yönünde oluşan kuvvet bileşeni})$$

$$Lift = \cos(AOA)*F_y - \sin(AOA)*F_x \quad (\text{kanada etkiyen kaldırma kuvveti})$$

$$Drag = \cos(AOA)*F_x + \sin(AOA)*F_y \quad (\text{kanada etkiyen sürüklenme kuvveti})$$

$$Denom = 0.5*massFlowAve(Density)@Inlet*U_{inf}^2*1[m]*kalınlık [m]$$

(boyutsuzlaştırma)

$$cL = Lift/Denom \quad (\text{kaldırma katsayısı, sürüklenme katsayısı})$$

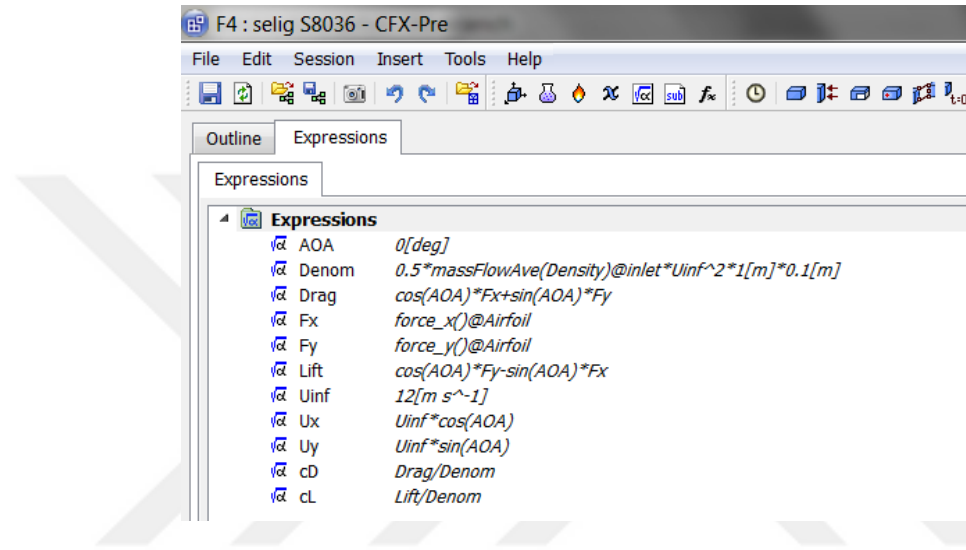
$$cD = Drag/Denom \quad (\text{sürüklenme katsayısı})$$

$$U_{inf} = 4[m\ s^{-1}] \quad (\text{serbest akım hızı})$$

$$U_x = U_{inf} * \cos(AOA) \quad (\text{x yönündeki hız bileşeni})$$

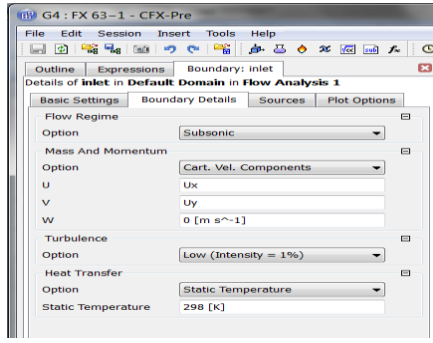
$$U_y = U_{inf} * \sin(AOA) \quad (\text{y yönündeki hız bileşeni})$$

Akış özelliklerinin bağıntı olarak formülize edilmiş halleri "Expression" sekmesinde aşağıdaki gibi gösterilmiştir. Şekil 6.5.'de akış özelliklerinin CFX-Pre programında sıralaması gösterilmiştir.

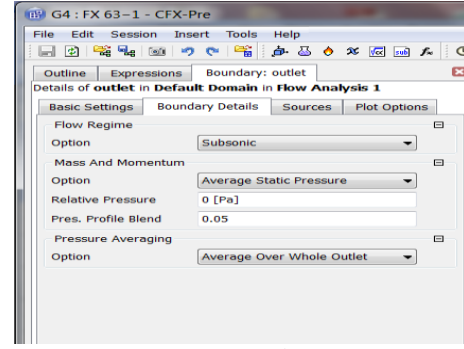


Şekil 6.5. Akış özelliklerinin CFX-Pre programında formülize edilmesi

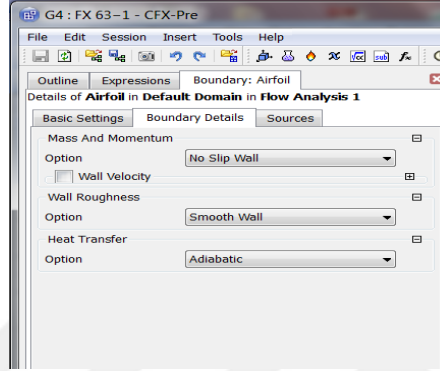
Duvar sınır şartında ise, genelde imal edilen kanatlar pürüzsüz olduklarında, kanat üzerinden akışlarda kanat yüzeyi pürüzsüz yüzey olarak seçilmiştir. Duvar yüzeyi üzerinde akışta kayma olmadığından, kaymama koşulu ( no slip flow) sisteme girilmiştir. Çıkış sınır şartında ise, akış alanı; çıkış kısmı basınç çıkışı olarak alınmıştır. Çıkışta basınç atmosfer basıncında olup, etkin basınç (static pressure) sıfır olarak girilmiştir. Simetrik yüzeyler simetry olarak seçilmişlerdir. Sınır şartlarının detay pencereleri ise, Şekil 6.6.'de gösterilmiştir.



(a)



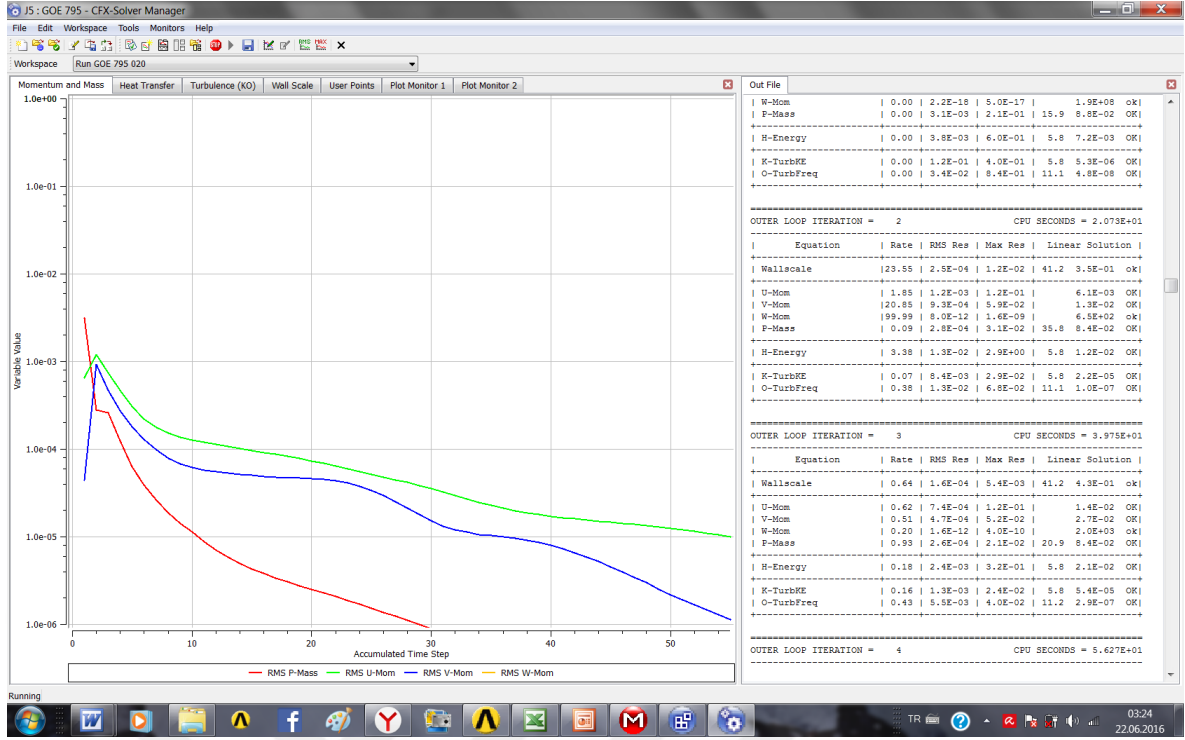
(b)



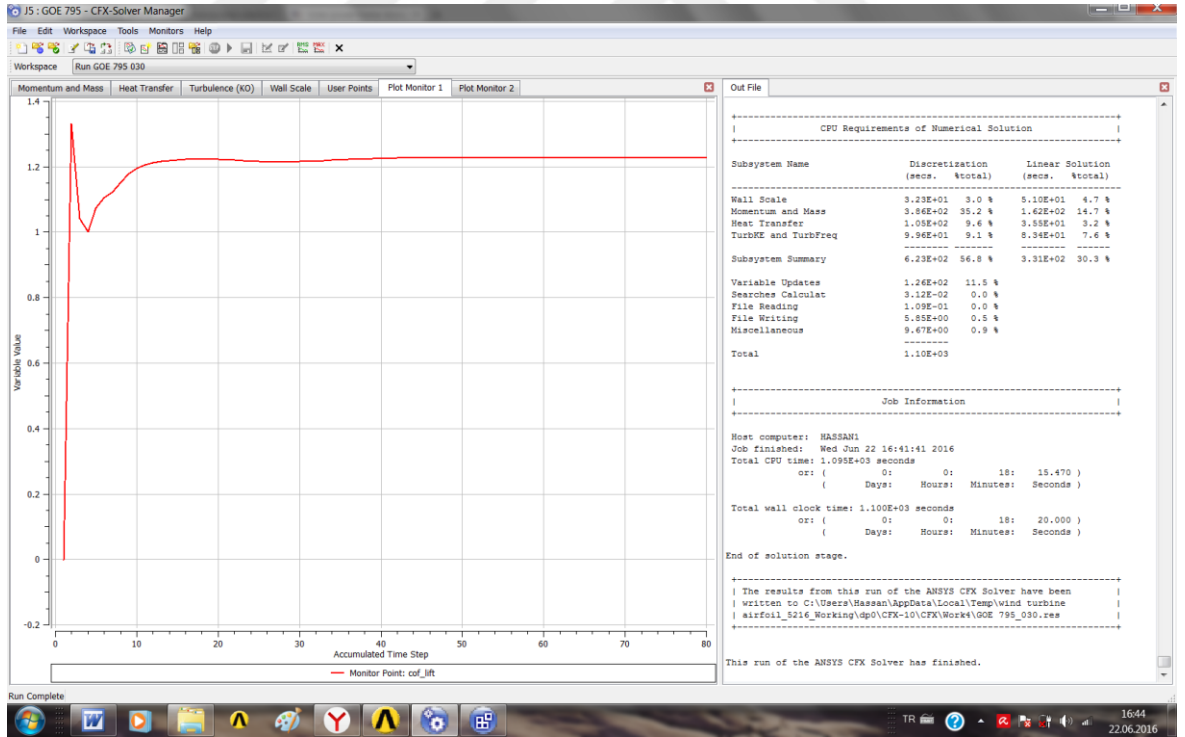
(c)

Şekil 6.6. Sınır şartlarının detay pencereleri

Çözücü kontrolde yüksek çözünürlüklü akış seçilmiştir. Maksimum iterasyon sayısı 120 olarak girilmiştir. Yakınsama kriteri olarak iterasyonlar arasında mutlak hata değeri, (residuals)  $1 \times 10^{-7}$  olarak seçilmiştir. Burada mutlak hata değeri son iki iterasyon arasındaki değerdir. CFX solver da akış çözüldükçe iterasyon sayısı bitmeyene kadar veya son iki iterasyon arasındaki mutlak hata değeri yakınsama kriterinin altına düşmeyinceye kadar, çözücü program iterasyonlara devam eder. Şekil 6.8.'de Kaldırma katsayısının CFX solver iterasyon sayısına bağlı yakınsama eğrisi gösterilmiştir. Bu çözücü kontrol şartları sağlandığında program otomatik olarak çözümü sonlandırır. Output Control sekmesinde monitor noktaları oluşturulabilir. Akış çözücü programda çözüldüğü esnada istenilen değerlerin yakınsamaları takip edilebilir. Eğer bu değerler sabit değerlere yakınsamışsa çözücü program durdurulabilir. Örneğin burada kaldırma katsayısı ve sürükleme katsayısı için monitorler oluşturulmuştur. Şekil 6.7.'de mutlak hata yakınsama ve monitor noktaları gösterilmiştir. Aşağıdaki şekil CFX solver çözücü programda momentum mutlak hata değerleri ve kaldırma ve sürükleme katsayılarının yakınsamaları göstermektedir.



Şekil 6.7. Mutlak hata yakınsama ve monitor noktaları



Şekil 6.8. Kaldırma katsayısının CFX solver iterasyon sayısına bağlı yakınsama eğrisi

CFX solver program ile her profil üzerinden akış dört farklı hız değeri ( 4, 8, 16, 32 m/s) ve beş farklı hücum açısı ( 0, 5, 10, 15, 20 derece) için sayısal olarak çözülmüştür. Bu durumda her profil için 20 ayrı sayısal çözüm yapılmıştır. Her bir akış için ortalama



çözümleme süresi 20 dakika ve her bir profil için toplam süre ise 400 dakika kadar bir zamanı bulmuştur. Bundan sonraki kısımda her profil için çıkan sayısal sonuçlar CFD post programında tablo, grafik ve görsel olarak analiz edilmiştir. Analizde her profilin kaldırma katsayısı ( $C_L$ ), sürüklenme katsayısı, basınç katsayısı ( $C_D$ ), performansları ( $C_L/C_D$ ) ve hız ve basınç dağılımları değerlendirilmiştir.

#### 6.4 Sayısal Sonuçlar ve Deneysel Karşılaştırma

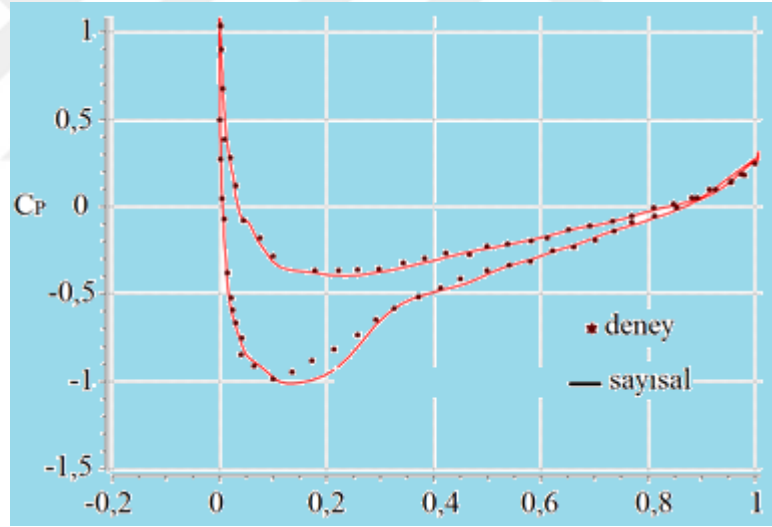
Bu bölüm CFX solver programında çıkan sayısal sonuçların değerlendirilmesini konu edinmiştir. Burada amaç farklı hücum açıları ve farklı akış hızlarında en iyi performansa sahip kanat profillerinin tespit edilmesidir. İlk önce sayısal sonuçlarını doğruluklarından emin olmak için sayısal sonuçlar deney değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bunun için literatürde deney değerleri yayınlanmış olan NACA0012 ve NACA2412 kanat profilleri kullanılmıştır. NACA0012 ve NACA2412 profilleriyle yapılan sayısal çalışmalarda elde edilen sürüklenme ve kaldırma katsayıları yine aynı profillerin deney değerleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Tablo 2 'de NACA2412 için verilmiştir. Tablo 2. NACA2412 için deney ve sayısal sonuçların karşılaştırılması da ayrıca Güleren ve Demir 'in NACA2412 ile yaptığı sayısal çalışmalara da yer verilmiştir.

**Tablo 2.** NACA2412 için deney ve sayısal  $C_L$  değerlerinin karşılaştırılması

Hücum açısı ( $\alpha$ )	Deneysel	GÜLEREN&DEMİR (sayısal)	Şimdiki Çalışma (sayısal)
-4°	-0.20	-0,210	-0.1930
4°	0.650	0,660	0.6520
12°	1.40	1,390	1,4370
15°	1.60	1,530	1,650
20°	1.20	---	---

Tablo 1. NACA 2412 için  $C_L$  değerleri incelendiğinde sayısal çalışma değerlerinin deney değerleri ile yakın oldukları görülür. Aynı zamanda çıkarılan sayısal değerler Güleren ve Demir sayısal değerleri ile de tüm hücum açıları yakın değerlerdedir. Burada sayısal değerler maksimum % 7.8, minimum % 0.3 ve ortalamada % 3.7 sapma miktarı ile deney değerlerine yakınlık sağlamışlardır. Güleren ve Demir çalışmasında olduğu gibi şimdiki çalışmada da 20 derece hücum açısında çözüme yakınsama olmamıştır. Bunun nedeni olarak, yüksek hücum açıları kanat etrafında, firar

kenarına doğru daimi akış özelliği göstermeyen, büyük girdapların oluşmasıdır. Türbülans yapıları arasındaki boyut farkının yüksek olması ve izotropik olmayan dağılım, daimi olmayan bir çözümü gerektirir. Bu nedenle 20 derece hücum açısı, daimi olmayan bir akış analizini gerektirmiştir. Tablo 1. NACA 2412 için  $C_L$  değerleri incelendiğinde; deney değerleriyle görülen uyum, sayısal sonuçların güvenilir olduğunu göstermiştir. Sayısal çalışmanın doğruluğu ayrıca NACA0012 kanat profili için  $9 \times 10^6$  Reynolds sayısında yayınlanmış deney değerleri ile de test edilmiştir. Deney koşullarıyla paralel yapılan sayısal çalışmada, kaldırma ve sürüklenme katsayıları  $C_L = 0.247$  ve  $C_D = 0.00796$  olarak bulunmuştur bu iki değerle performans hesaplandığında ise; performansın  $C_L/C_D=31.03$  olduğu görülür. Çıkarılan sayısal değerlerin NACA0012 yayınlanmış deney değerleri olan  $C_L= 0.241$ ,  $C_D = 0.0079$  ve  $C_L/C_D=30.51$  ile karşılaştırıldığında çok yakın değerlerde oldukları görülebilmektedir. Şekil 6.9. kanat alt ve üst yüzey için çıkarılan basınç katsayı değerleri, yine NACA0012 kanat profili  $9 \times 10^6$  Reynolds sayısında yayınlanmış deney değerleri ile de karşılaştırılmıştır.



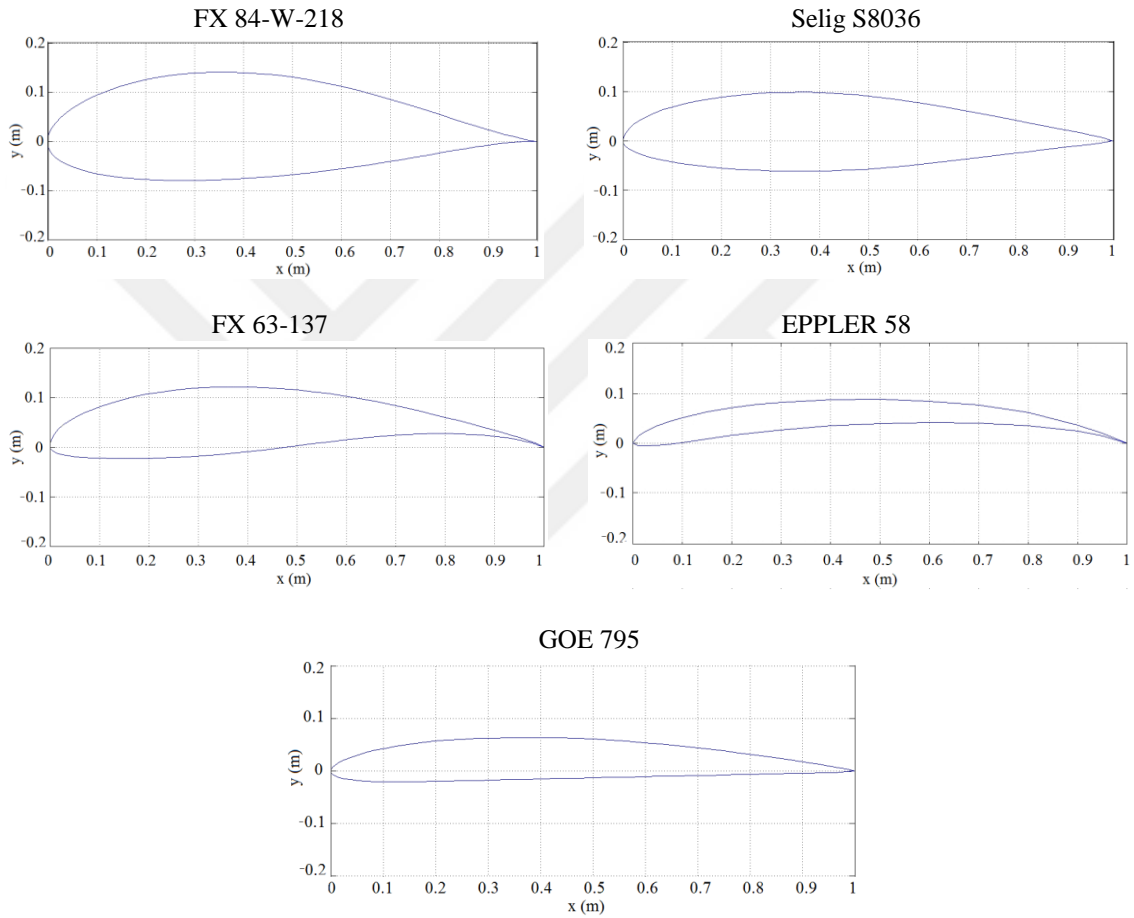
Şekil 6.9. NACA0012 için sayısal ve deney basınç katsayılarının karşılaştırılması

Bu karşılaştırmada, kanadın alt ve üst yüzeyindeki basınç katsayılarının deney değerleri ile olan çok iyi uyumu, sayısal çalışmanın doğruluğunu bir kat daha pekiştirmektedir.

## 6.5 Sayısal Sonuçların Analiz Edilmesi

Bu kısımda farklı hücum açılarında ve farklı akış hızlarında yapılan sayısal çalışma sonuçları analiz edilmiştir. Her kanat profili için sayısal çalışmadan elde edilen

$C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_L/C_D$  ve  $C_P$  değerleri hücum açısı ve serbest akım hızı ile olan değişimleri incelenmiştir. Sayısal çalışmaya konu olan bu beş kanat profili Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Kanat profilleri incelendiğinde, maksimum profil kalınlığı en yüksek olan FX 84-W-218 iken en ince profil GOE 795'tir. FX 63-137 ve EPPLER 580 kanatların üst yüzeylerinde tam geometrik benzerlik varken, alt yüzeyde ise benzerlik düşük kalmaktadır. Selig S8036 maksimum kalınlığı düşük olmasına rağmen FX 84-W-218 ile alt yüzeyde bir geometrik benzerliğe sahiptir.

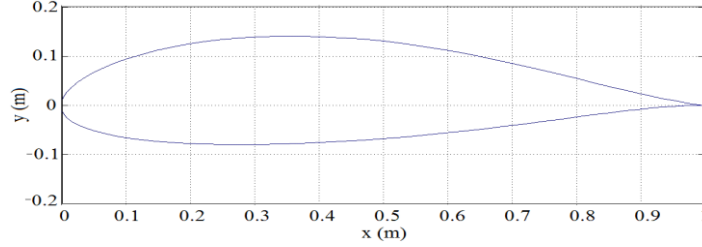


**Şekil 6.10.** Kanat profillerinin iki boyutlu Kartezyen gösterimi

Kanat üzeri hava akışlarında, önce her kanat için çıkarılan sayısal sonuçlar ayrı ayrı analiz edilecektir. Bu sayısal analizlerde ise kaldırma katsayısı, sürükleme katsayısı ve basınç katsayısının, kanat performansına olan etkileri üzerinde durulacaktır. Daha sonraki kısımlarda ise, kanatlar kanat performansını gösteren  $C_L/C_D$  değerleri yönünden birbiriyle karşılaştırılacaktır. Tüm kanat performanslarının akış hızıyla ve hücum açısıyla olan değişimleri birbiriyle karşılaştırılacaklardır. Analiz sonucu hangi hücum açısında hangi kanat en iyi performansı gösterdiği ortaya çıkarılacaktır.

### 6.5.1 FX 84-W-218 sayısal sonuçları

FX 84-W-218 kanat profili Şekil 6.11.'de gösterildiği gibi kamburluğu diğer profillere göre daha fazla olan bir kanat tasarımıdır.



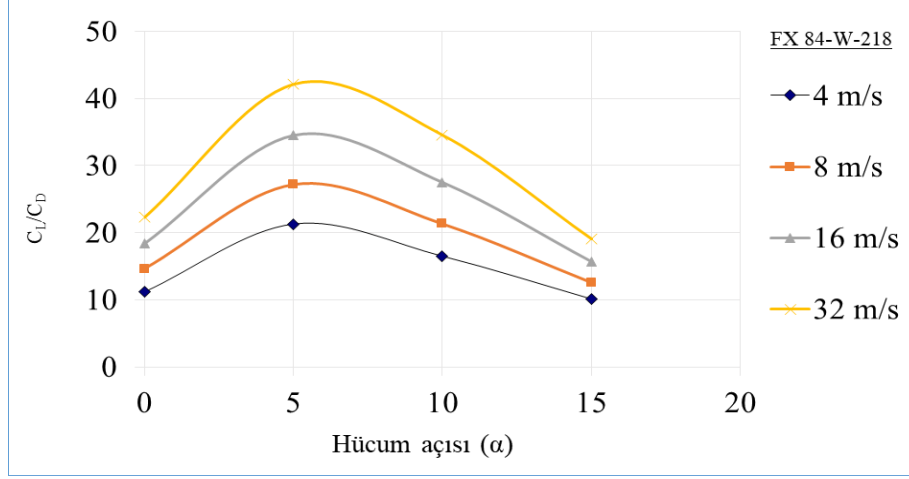
Şekil 6.11. FX 84-W-218 kanat profili

Bu kanat tasarımı ile yapılan sayısal çalışmada, çıkarılan  $C_L$  ve  $C_D$  sayısal değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Tabloda verilen sayısal değerler farklı hücum açılarında ve farklı akış hızlarından elde edilen sayısal değerlerdir. Bu kanat profiliyle yapılan sayısal çözümlemede  $20^\circ$  hücum açısında yakınsama sağlanmamıştır. Bu nedenle bu açılarda kanat üzerinde oluşan türbülanslı akış bölgesi daimi bir türbülanslı akış davranışından uzak olduğu için, zaman ortalamalı RANS denklemleriyle olan sayısal çözümlemelerde yakınsama problemi yaratmıştır. Bu nedenle bu hücum açılarında kanat üzerinden akışta daimi olmayan bir sayısal analize gerek duyulmaktadır. Bu da LES veya DNS gibi üç boyutlu türbülanslı akış bölgesini zamana bağlı çözen sayısal çözüm yöntemlerinden yararlanılması gerektiğini göstermektedir. Sayısal bir analiz ortaya çıkarmak için tabloda verilen sayısal değerlerin görülmesi ve incelenmesi zor olduğundan, grafik yöntem görsel açıdan daha anlaşılır bir yol olduğu gözükmektedir. Burada amaç, kanat performansı üzerinde etkili olan bu iki kanat katsayısı parametrelerinin incelenmesidir. Bu nedenle tabloda verilen bu sayısal değerlerin akış hızıyla ve hücum açısıyla olan değişimleri grafiksel olarak Şekil 6.12.'de gösterilmiştir.

**Tablo 3.** FX 84-W-218 için  $C_L$  ve  $C_D$  değerleri

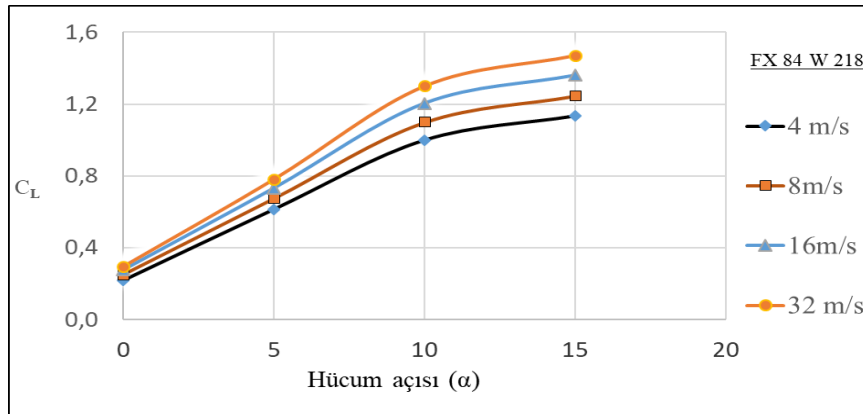
FX 84-W-218						
	m/s	0°	5°	10°	15°	20°
$C_L$	4	0,21713	0,6136	1	1,135	*****
	8	0,2488	0,6735	1,098	1,245	*****
	16	0,2747	0,7307	1,204	1,36	*****
	32	0,2949	0,7804	1,3	1,47	*****
		0	5	10	15	20
$C_L/C_D$	4	11,19	21,26	16,47	10,12	*****
	8	14,64	27,23	21,32	12,53	*****
	16	18,44	34,47	27,49	15,74	*****
	32	22,32	42,07	34,52	19,12	*****
		0	5	10	15	20
$C_D$	4	0,02	0,03	0,06	0,11	*****
	8	0,02	0,02	0,05	0,10	*****
	16	0,01	0,02	0,04	0,09	*****
	32	0,01	0,02	0,04	0,08	*****

Şekil 6.12. FX 84-W-218 performans eğrileri incelendiğinde performansın 7 dereceye kadar düzenli arttığı ve daha sonraki hücum açılarında ise performansın azalmaya başladığı görülmektedir. Burada tüm akış hızlarında kanat performansı  $4^\circ < \alpha < 7^\circ$  hücum açıları arasında yüksek performans gösterdikleri görülmektedir. Bu kanat profilinde düşük akış hızlarında yüksek akış hızlarına doğru performans, eğriler tüm hücum açılarında, hemen hemen aynı oranda artış göstermişlerdir. Daha önceki konuda NACA0012 profili için yüksek Reynolds sayısındaki ( $9 \times 10^6$ ) yayınlanmış deneysel performans değeri hesaplandığı  $C_L/C_D = 0.0241 / 0.0079 = 30.5$  olduğu görülmektedir. Bu performans değeri baz alındığında bu kanadın performans değerlerinin bu değere yakın oldukları ve  $4^\circ < \alpha < 7^\circ$  hücum açıları arasında bu değerden yüksek; fakat diğer hücum açılarında ise düşük oldukları görülmektedir. Grafik iyice incelendiğinde  $4^\circ < \alpha < 7^\circ$  hücum açıları arasında hızın artmasıyla performanstaki artış oranının diğer hücum açılarındaki artışa göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Aşağıdaki şekillerde ise kaldırma katsayısı ve sürükleme katsayılarının hız ve hücum açısı ile olan değişimleri gösterilmiştir. Şekil 6.13. incelendiğinde kaldırma katsayıları hücum açısının artmasıyla arttığı görülmektedir. Ayrıca performans eğrisi değişimi hızlara göre incelendiğinde hızın artmasıyla katsayıların arttıkları görülmektedir. Burada hücum açısının kaldırma katsayısı üzerindeki etkisi hız değişiminde çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Kaldırma katsayısını hücum açısıyla olan değişimi doğrusal bir artış olmayıp eğimi hep giderek azalan bir parabolik olduğu görülmektedir.

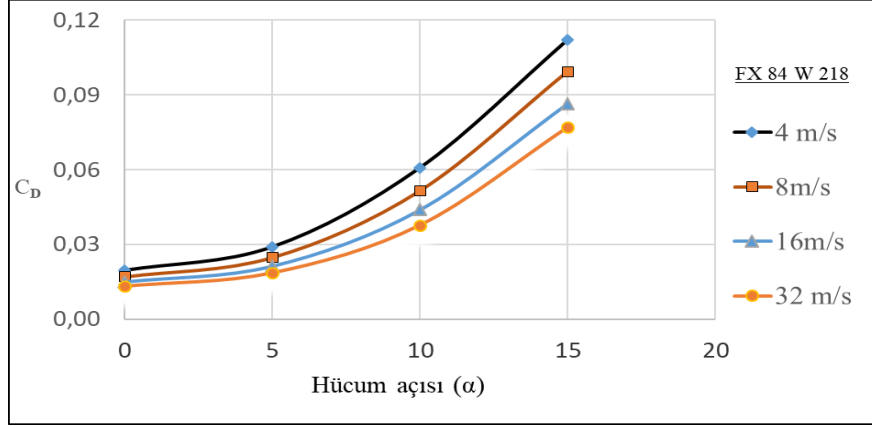


Şekil 6.12. FX-84-W-218 performans eğrilerinin hücum açısı ve akış hız ile olan değişimleri

Şekil 6.14. incelendiğinde ise sürüklenme katsayısının da hücum açısının artmasıyla doğrusal olmayan bir şekilde arttığı görülmektedir. Burada sürüklenme eğrisinin eğimi hücum açısıyla birlikte artmaktadır. Sürüklenme katsayısının hız değişimi ile olan ilişkisi incelendiğinde ise; hızın artmasıyla sürüklenme katsayısının düştüğü görülmektedir. Burada hızın artması sürüklenme kuvvetini düşürdüğü gibi kaldırma kuvvetini de arttırdığı görülmektedir, dolayısıyla yüksek hızlar düşük hızlara göre kanat performansını artırmaktadırlar. Burada sürüklenme katsayısı kanat üzerindeki sürüklenme kuvvetinin bir göstergesidir. Sürüklenme kuvvetinin her zaman akışa direnç oluşturan bir kuvvet olduğu görülmelidir. Burada kaldırma katsayısı ve sürüklenme katsayısının hücum açısıyla olan değişimleri incelendiğinde, her ikisinin de hücum açısıyla birlikte arttıkları; fakat eğrilerindeki artış eğimlerin birbirinden farklı olduğu görülmektedir.



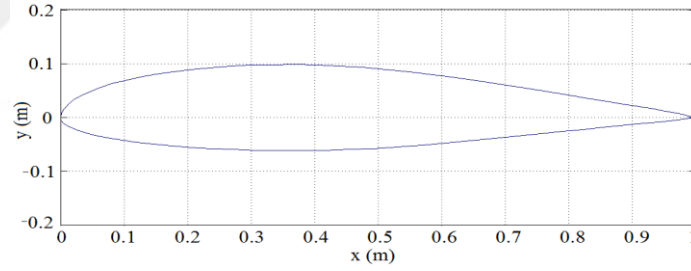
Şekil 6.13. Kaldırma katsayısının farklı hızlarda hücum açısı ile değişimleri



Şekil 6.14. Sürüklenme katsayısının farklı hızlarda hücum açısı ile değişimleri

### 6.5.2 Selig S8036 sayısal sonuçları

Selig S8036 kanat profilinin iki boyutlu çizimi Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Kanat profili kamburluğu düşük olan bir profildir, bu nedenle veter çizgisine göre alt ve üst yüzeyler hemen hemen simetriktir.

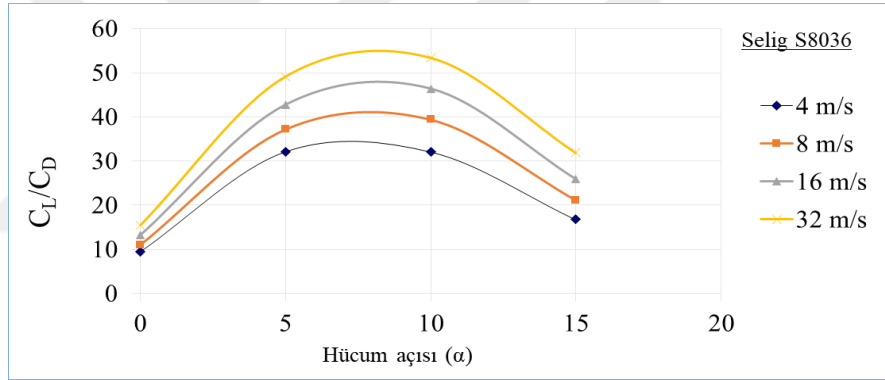


Şekil 6.15. Selig S8036

Bu profil içinde farklı hücum açıları ve farklı akış hızlarında yapılan sayısal akış analizinin, sayısal sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir. Tabloda kaldırma katsayılarının ve sürüklenme katsayılarının farklı hücum açıları ve farklı akış hızlarındaki sayısal değerleri verilmiştir. Bu kanat profiliyle yapılan sayısal çözümlemede  $20^\circ$  hücum açısında iterasyonlarda yakınsama sağlanamamıştır. Bu nedenle bu hücum açıları kanat üzerinden akışta türbülanslı akış için, daimi olmayan bir sayısal analize gerek duyulduğu görülmektedir. Bu nedenle Tablo 4 Selig S8036  $C_L$  ve  $C_D$  değerleri için verilen sayısal değerlerle kanat performansının hücum açısıyla ve akış hızıyla olan grafiksel gösterimi ise, Şekil 6.16. da gösterilmiştir.

**Tablo 4.** Selig S8036 için  $C_L$ ,  $C_L/C_D$  ve  $C_D$  değerleri

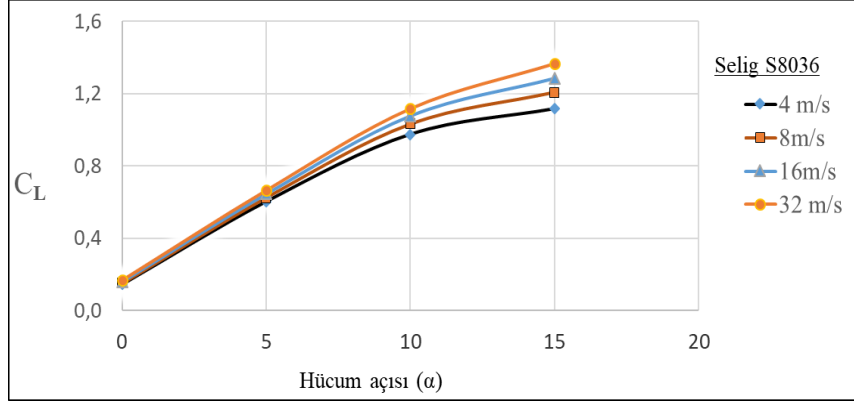
Selig S8036						
	m/s	0°	5°	10°	15°	20°
$C_L$	4	0,1447	0,6028	0,974	1,1152	*****
	8	0,1503	0,6245	1,0316	1,207	*****
	16	0,1585	0,64502	1,077	1,285	*****
	32	0,1661	0,6653	1,1183	1,3681	*****
		0	5	10	15	*****
$C_L/C_D$	4	9,513	32,149	32,092	16,745	*****
	8	11,068	37,195	39,419	21,187	*****
	16	13,208	42,717	46,362	25,907	*****
	32	15,523	49,100	53,329	31,861	*****
		0	5	10	15	*****
$C_D$	4	0,015	0,019	0,030	0,067	*****
	8	0,014	0,017	0,026	0,057	*****
	16	0,012	0,015	0,023	0,050	*****
	32	0,011	0,014	0,021	0,043	*****



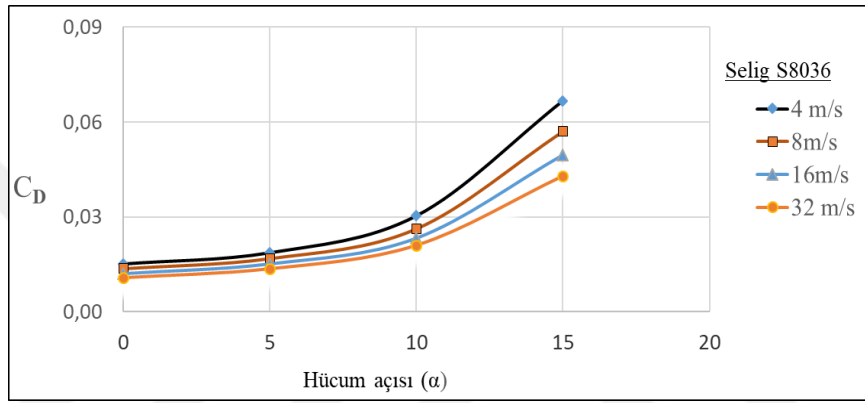
**Şekil 6.16.** Selig S8036 kanat profili için  $C_L/C_D$  değerlerinin hücum açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri

Şekil 6.16. incelendiğinde sıfır hücum açısından itibaren kanat performansının artmaya başladığı ve  $5^\circ < \alpha < 10^\circ$  hücum açıları arasında ise en yüksek performansların sağlandığı görülebilmektedir. Yüksek hücum açılara doğru ise, kanat performansı düşmeye başlamıştır. Bu kanat üzeri akışta da, akış hızı arttığında performans katsayısının arttığı gözlemlenebilmektedir. Sıfır derece hücum açısında kanat performansı en düşük olmuştur. Bu kanat profilinin kaldırma katsayısı ve sürüklenme katsayılarının hücum açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri, Şekil 6.17- 6.18.'de ayrı ayrı gösterilmiştir.





Şekil 6.17. kaldırma katsayısı değerlerinin hücum açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri

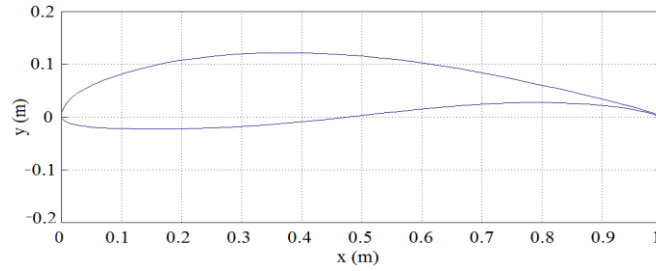


Şekil 6.18. Sürüklenme katsayısı değerlerinin hücum açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri

Şekil 6.17. ve Şekil 6.18. incelendiğinde, sürüklenme ve kaldırma katsayılarının her ikisinin de hücum açısıyla birlikte değerlerinin arttığı görülmektedir. Şekil 6.17. deki kaldırma katsayısı eğrileri yaklaşık  $\alpha < 10^\circ$  hücum açlarına kadar doğrusala yakın bir artış gösterirken Şekil 6.18’de ise sürüklenme katsayısı eğrileri ise  $\alpha < 8^\circ$  hücum açlarına kadar doğrusal bir artışa sahip olduğu ve daha büyük hücum açlarına doğru ise, yüksek bir eğimle yön değiştirip artıkları görülebilmektedir. Akış hızının artmasıyla kaldırma katsayı değerleri hafif bir şekilde artma gösterirken, sürüklenme katsayı değerleri ise, hızın artmasıyla azalmışlardır. Bir önceki profilde olduğu gibi bu profil akışında da hızın artması, kanat üzerindeki sürüklenme kuvvetini düşürürken, hücum açısının artması ise, sürüklenme kuvvetini artırdığı Şekil 6.18 de verilen eğrilerden anlaşılabilir.

### 6.5.3 Fx-63-137 sayısal sonuçları

FX-63-137 kanat profilinin iki boyutlu şekli Şekil 6.19.'da gösterilmiştir. Kanat profili kamburluğu yine yüksek olan bir profildir. Veter çizgisine göre alt ve üst yüzeylerin simetriklikten çok uzak olduğu görülmektedir.



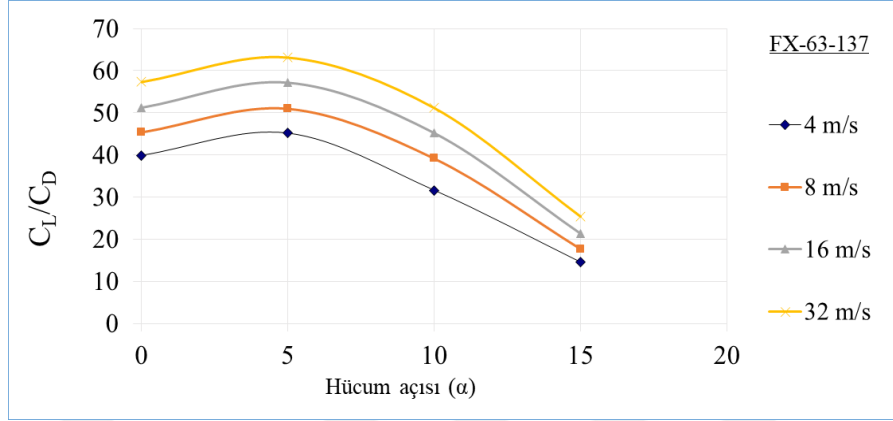
Şekil 6.19. FX-63-137 kanat profili

Bu profilin farklı hücum açılarında ve farklı akış hızlarındaki sayısal sonuçları ise; Tablo 5 FX-63-137 için  $C_L$ ,  $C_D$  değeri gösterilmiştir. Bu kanat profiliyle yapılan sayısal çözümlemede sadece  $20^\circ$  hücum açısında yakınsama sağlanamamıştır. Diğer kanat profillerinde görüldüğü gibi bu kanat profili içinde yüksek hücum açısında daimi olmayan bir sayısal analize gerek duyulduğu görülmektedir.

Tablo 5. FX-63-137 için  $C_L$ ,  $C_L/C_D$  ve  $C_D$  değerleri

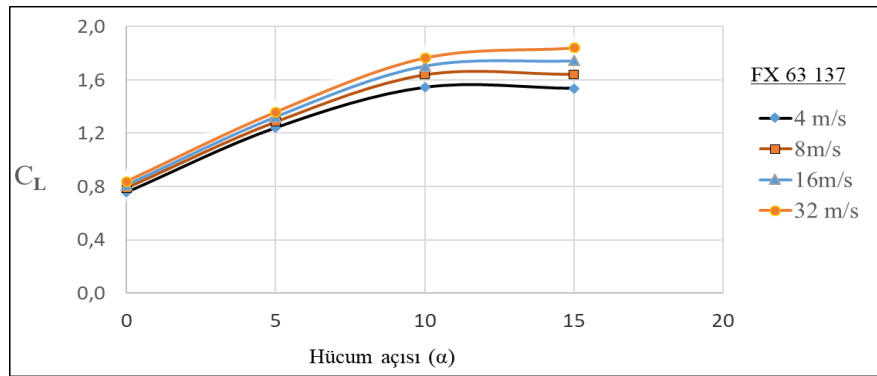
FX-63-137						
	m/s	$0^\circ$	$5^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$	$20^\circ$
$C_L$	4	0,758	1,2425	1,545	1,537	*****
	8	0,787	1,285	1,6396	1,643	*****
	16	0,81245	1,3236	1,7046	1,744	*****
	32	0,8366	1,3594	1,7667	1,842	*****
		0	5	10	15	
$C_L/C_D$	4	39,916	45,215	31,614	14,500	*****
	8	45,360	50,992	39,159	17,638	*****
	16	51,162	57,101	45,179	21,328	*****
	32	57,380	63,199	51,238	25,442	*****
		0	5	10	15	
$C_D$	4	0,019	0,027	0,049	0,106	*****
	8	0,017	0,025	0,042	0,093	*****
	16	0,016	0,023	0,038	0,082	*****
	32	0,015	0,022	0,034	0,072	*****

Tablo 5'te verilen kaldırma katsayısı ve sürüklenme katsayısı değerlerinden yararlanarak FX-63-137 kanat performansının hücum açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri şekil 6.20.'de gösterilmiştir.



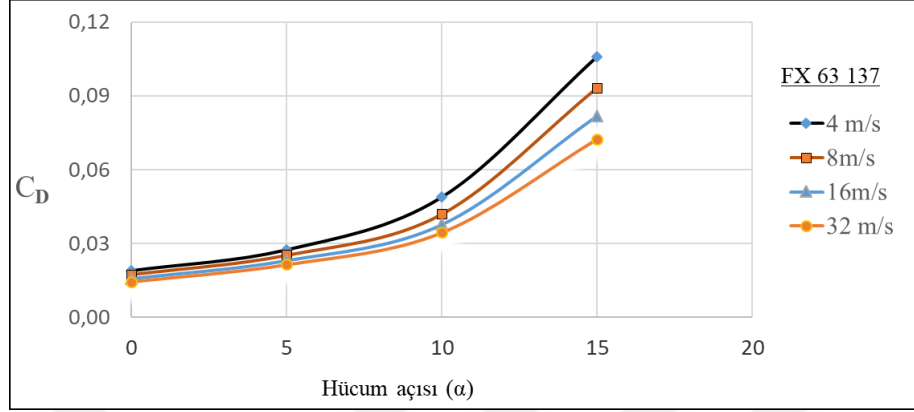
Şekil 6.20. FX-63-137 kanat performansının  $C_L/C_D$  değerlerinin hücum açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri

Şekil 6.20.'de gösterildiği gibi FX-63-137 kanat profilinin kanat performans değerleri diğer profillere göre düşük hücum açılarındaki yüksek çıkmıştır. Diğer profillerde olduğu gibi bu kanat profilinde de  $4^\circ < \alpha < 7^\circ$  hücum açıları arasında en yüksek performans değerlerinde sahip olmuştur. Fakat daha yüksek hücum açılarına doğru ise, kanat performansı yüksek bir eğimle azalma eğilimine girmiştir. Bu profile de görüldüğü gibi, akış hızı kanat performansı üzerinde pozitif etkiye sahip olmuştur. Herhangi bir hücum açısında hızın artması, performans değerlerini doğrusal bir şekilde artırmıştır. Bu kanat profilinin kaldırma ve sürüklenme katsayı değerleri ise, aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 6.21. Kaldırma katsayısı değerlerinin hücum açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri

Şekil 6.21 görüldüğü gibi, kaldırma katsayısı değerleri  $0^\circ < \alpha < 8^\circ$  hücum açılarında doğrusala yakın bir artış gösterirken, daha yüksek hücum açılarında ise, sabit değerlerde kaldıkları görülmektedir.

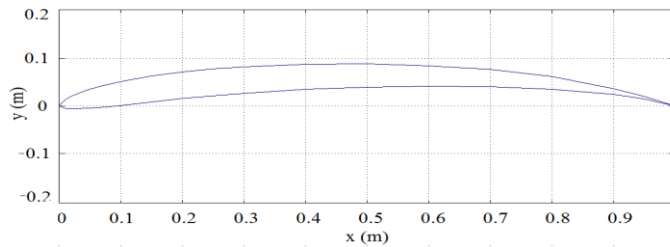


Şekil 6.22. Sürüklenme katsayısı değerlerinin hücum açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri

Şekil 6.22 de görüldüğü gibi sürüklenme katsayısı değerleri de  $0^\circ < \alpha < 7^\circ$  hücum açlarına kadar doğrusal bir artış sağlarken, yüksek hücum açlarına doğru yüksek bir eğimle artma eğilimine geçmişlerdir. Bu profilde de akış hızının artması sürüklenme katsayı değerlerini azaltırken kaldırma katsayı değerlerini ise artırdığı gözlemlenebilmektedir.  $0^\circ < \alpha < 15^\circ$  açıları arasındaki her iki katsayının eğrileri incelendiğinde ise, farklı akış hız eğrileri arasında mesafenin hücum açısının artmasıyla, daha da belirginleştiği görülmektedir. Burada akış hızının yüksek hücum açlarına doğru katsayılar üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir.

#### 6.5.4 EPPLER 58 sayısal sonuçları

EPPLER 58 kanat profilinin iki boyutlu çizimi Şekil 6.23'te gösterilmiştir. Maksimum kalınlığı diğer profillere göre daha düşük olan bir profildir.



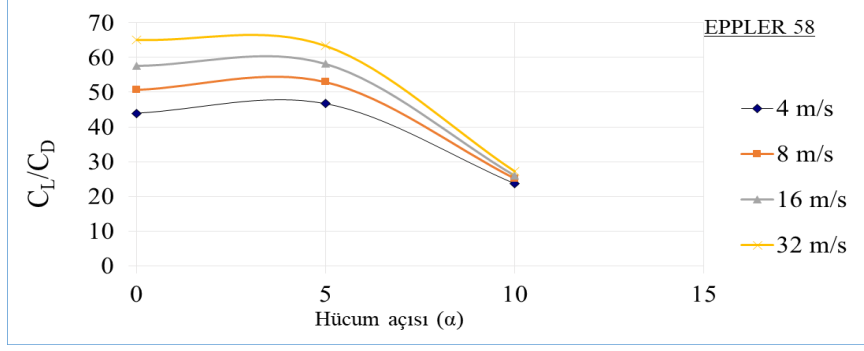
Şekil 6.23. EPPLER 58 kanat profili

Bu profilin farklı hücum açılarında ve farklı akış hızlarında çıkan sayısal değerleri ise; Tablo 6’da gösterilmiştir. Bu kanat profiliyle yapılan sayısal çözümlemede ise; 15° ve 20° hücum açılarında iterasyonlarda yakınsama sağlanamamıştır.

**Tablo 6.** EPPLER 58 için  $C_L$ ,  $C_L/C_D$  ve  $C_D$  değerleri

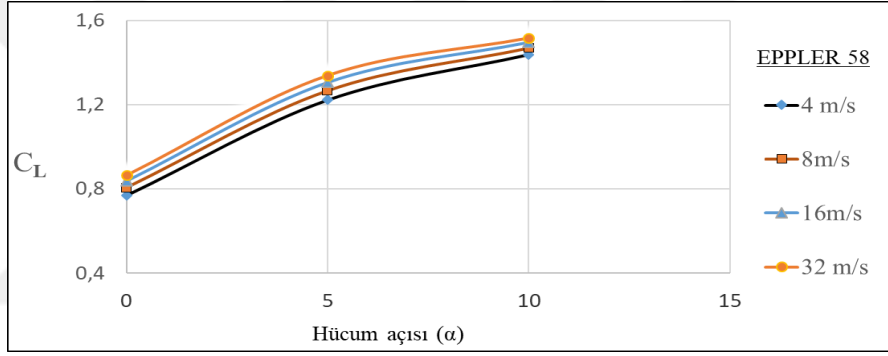
EPPLER 58 AIRFOIL						
	m/s	0°	5°	10°	15°	20°
$C_L$	4	0,769	1,2222	1,438	*****	*****
	8	0,8054	1,266	1,4683	*****	*****
	16	0,8375	1,3047	1,4948	*****	*****
	32	0,8638	1,3379	1,5157	*****	*****
		0	5	10	*****	*****
$C_L/C_D$	4	43,943	46,667	23,761	*****	*****
	8	50,750	52,993	25,108	*****	*****
	16	57,600	58,142	25,987	*****	*****
	32	65,143	63,408	27,163	*****	*****
		0	5	10	*****	*****
$C_D$	4	0,018	0,026	0,061	*****	*****
	8	0,016	0,024	0,058	*****	*****
	16	0,015	0,022	0,058	*****	*****
	32	0,013	0,021	0,056	*****	*****

Tablo 6 ’da verilen sayısal değerlere göre, bu kanadın  $C_L/C_D$  değerlerinin hücum açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri, Şekil 6.24’te resmedilmiştir. Şekil 6.24’te gösterilen kanat performans eğrileri incelendiğinde, kanat performans değerlerinin  $0^\circ < \alpha < 5^\circ$  hücum açıları arasında yüksek ve sabit değerlerde olduğu; fakat bu hücum açısından sonra değerlerde düşüş meydana geldiği görülmektedir. Bu profil  $0^\circ < \alpha < 5^\circ$  arasındaki düşük hücum açılarında FX 63-137 profiliyle benzer performansta; fakat diğer profillere göre ise çok daha yüksek performansa sahip olduğu görülmektedir. Bu profilde de, akış hızı arttığında kanat performansının arttığı görülmektedir; fakat akış hızının performans üzerindeki etkisi ise, sıfır derece hücum açısında en yüksekken hücum açısının artmasıyla, bu etkinin azaldığı görülmektedir. Akış hızının performans üzerindeki etkisi incelendiğinde ise, akış hızının 4 m/s 'den 32 m/s 'ye artması durumunda, 0 derece hücum açısında performanstaki artış %48 iken, 10 derece hücum açısında ise, performanstaki artış %14 civarında olmaktadır.

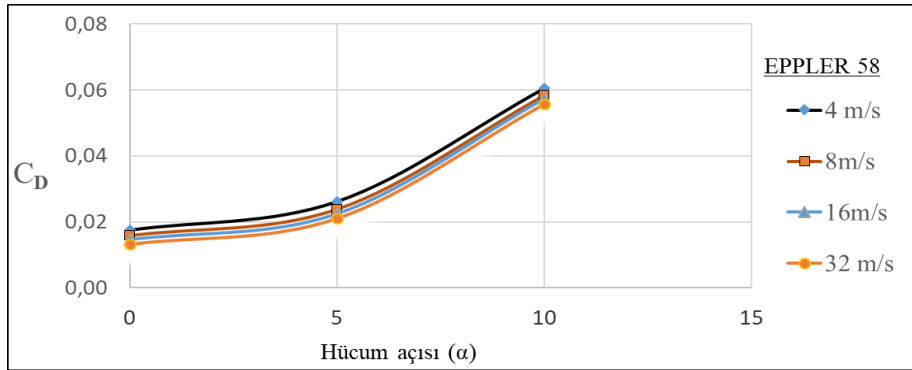


Şekil 6.24.  $C_L / C_D$  değerlerinin hücum açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri

Tablo 6 da verilen kaldırma katsayısı ve sürüklenme katsayısı değerlerinin akış hızı ve hücum açısıyla olan değişimleri ise Şekil 6.25 ve Şekil 6.26. da görsel olarak resmedilmiştir.



Şekil 6.25. Kaldırma katsayısı değerlerinin akış hızı ve hücum açısıyla olan değişimleri



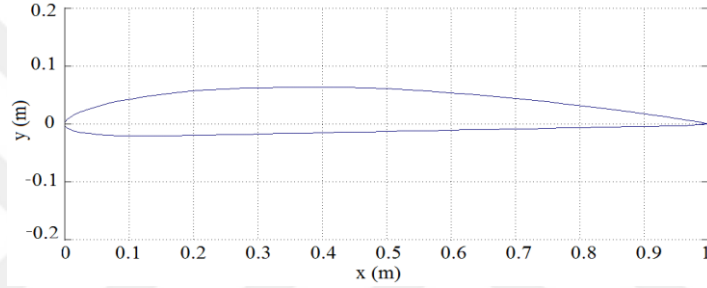
Şekil 6.26. Sürüklenme katsayısı değerlerinin akış hızı ve hücum açısıyla olan değişimleri

Diğer profil akışlarında olduğu gibi bu profilde de hücum açısı arttığında  $C_L$  ve  $C_D$  değerlerinin her ikisinin arttığı görülmektedir. Diğer profillerde olduğu gibi bu profilde de katsayı eğrilerinin eğimleri hücum açısının artmasıyla sürüklenmede artan ve kaldırmada ise azalan olmuştur. Sürüklenme katsayısı eğrisi incelendiğinde ise  $5^\circ < \alpha <$

$10^\circ$  hücum açıları arasındaki artma eğimi  $0^\circ < \alpha < 5^\circ$  hücum açıları arasındaki artma eğimine göre çok daha yüksek olduğu görülmektedir.

### 6.5.5 GOE 795 sayısal sonuçları

GOE 795 kanat profilinin iki boyutlu çizimi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Bu profilin maksimum kalınlığı, EPPLER 58 de olduğu gibi, diğer profillere göre çok daha düşük olmuştur. İnce bir kanat profilidir. Kamburluğu diğer profillere göre daha düşük olan bir profildir. Şekil 6.27. GOE 795 kanat profilinin iki boyutlu gösterimi gösterilmiştir.



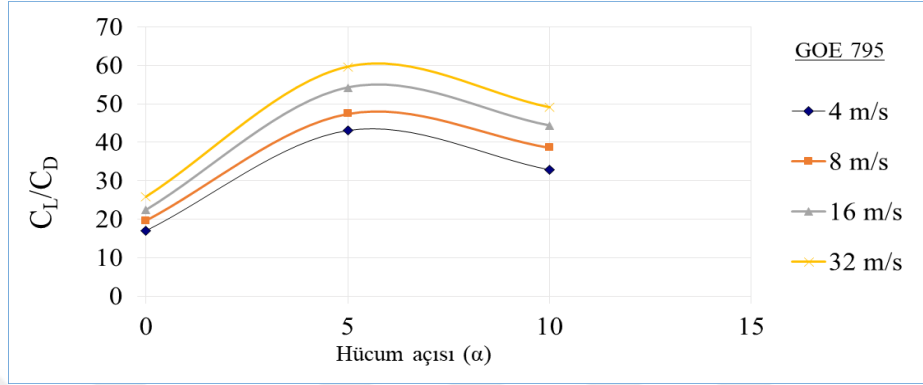
Şekil 6.27. GOE 795 kanat profili

Tablo 7. Geo 795 için  $C_L$ ,  $C_L / C_D$  ve  $C_D$  değeri

GOE 795						
	m/s	0	5	10	15	20
$C_L$	4	0,2222	0,7127	1,0865	*****	*****
	8	0,2286	0,7236	1,1243	*****	*****
	16	0,2342	0,7359	1,1569	*****	*****
	32	0,2411	0,7497	1,1827	*****	*****
$C_L / C_D$	4	16,928	43,011	32,805	*****	*****
	8	19,538	47,418	38,569	*****	*****
	16	22,369	54,190	44,326	*****	*****
	32	25,822	59,595	49,075	*****	*****
$C_D$	4	0,013	0,017	0,033	*****	*****
	8	0,012	0,015	0,029	*****	*****
	16	0,010	0,014	0,026	*****	*****
	32	0,009	0,013	0,024	*****	*****

Bu profil üzerinden hava akışında sürüklenme ve kaldırma katsayılarının, sayısal değerleri Tablo 7'de gösterilmiştir. Bu profil üzerinden hava akışında da  $15^\circ$  ve  $20^\circ$  hücum açılarında sayısal akış özelliklerinde yakınsama olmamıştır. Bu nedenle bu

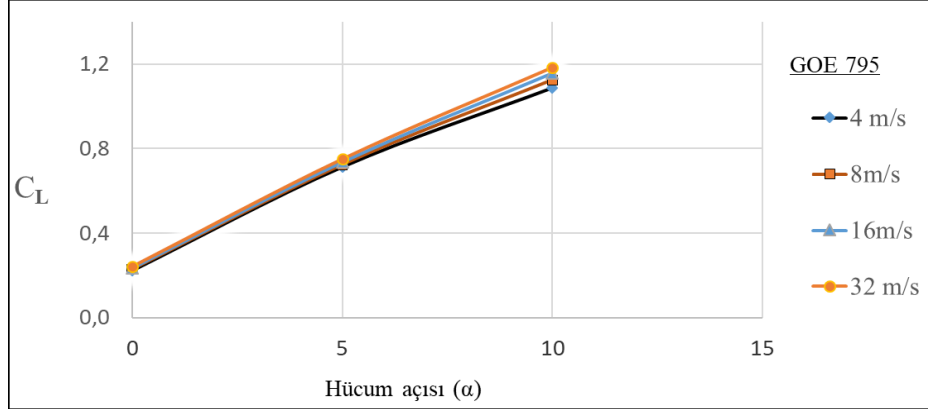
hücum açılarında türbülanslı akışın daimi olmayan akış çözümüne ihtiyaç olduğu görülmektedir. Tabloda verilen katsayı değerlerinden yararlanarak, bu profil üzerinden hava akışında, performansın hücum açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri ise, şekil 6.28' de gösterilmiştir.



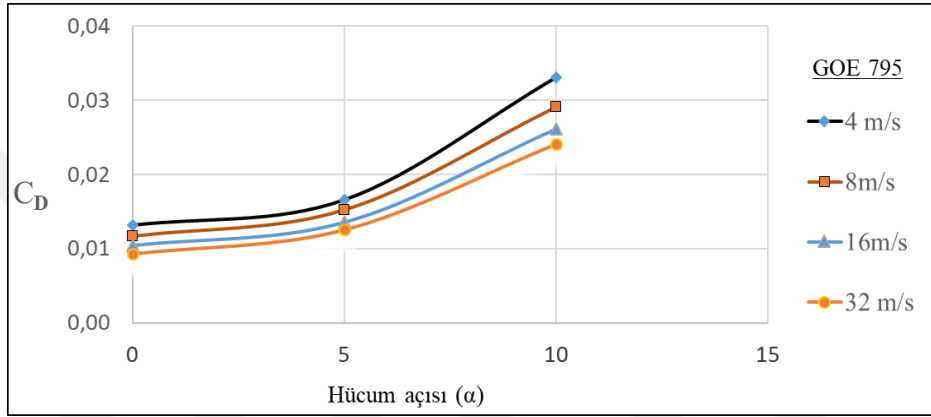
Şekil 6.28. GOE 795 profili için  $C_L/C_D$  sayısal değerlerin hücum açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri

Şekil 6.28. da performans eğrileri incelendiğinde,  $5^\circ < \alpha < 7^\circ$  arasındaki hücum açılarında performans değerlerinin maksimum noktada olduğu görülür. Bu profilin diğer profillerden farkı ise,  $0^\circ < \alpha < 7^\circ$  hücum açıları aralığında performans eğrisinin yüksek bir eğimle olan artışıdır. Bu durum profilin hücum açılarına karşı çok hassas olduğunu gösterir. Bu profile hız değişiminin performans üzerindeki etkisi ise, tepe noktasına kadar artışı ve daha sonra sabit kaldığı görülmektedir. Şekil 6.29. ve Şekil 6.30. da kaldırma ve sürüklenme katsayısı değerlerinin hücum açısıyla ve serbest akış hızıyla olan değişimleri verilmiştir. Kaldırma katsayısı eğrileri incelendiğinde, hücum açısıyla birlikte değerlerin doğrusala yakın arttıkları görülür. Aynı hücum açısında, akış hızının performans artışı üzerindeki etkisi ise; 5-7 derece dolayındaki hücum açısına kadar etkinin sabit değerlerde olduğu ve daha sonraki hücum açılarında ise; hız değişiminin performans üzerindeki etkisinin arttığı görülmektedir. Burada hız değişiminin yüksek hücum açılarına doğru daha etkili olduğu görülmektedir. Aynı şekilde Şekil 6.30 da sürüklenme katsayısı değerlerinin 5-7 derece dolayındaki hücum açısına kadar düşük eğimle artışı ve daha sonraki açılarda ise yüksek bir eğimle arttıkları görülür. Burada hız değişiminin performans üzerindeki etkisi ise; kaldırma katsayısı değerlerinde olduğu gibi 5-7 derece dolayındaki hücum açısına kadar etkinin sabit değerlerde olduğu ve daha sonraki hücum açılarında ise, hız değişiminin performans üzerindeki etkisinin arttığı görülmektedir.





Şekil 6.29. kaldırma katsayısının hücüm açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri



Şekil 6.30. Sürüklenme katsayısının hücüm açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri

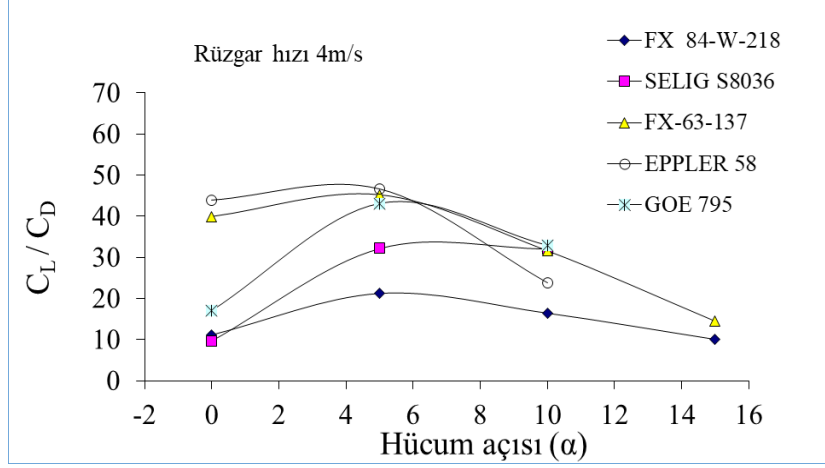
Tekrar Şekil 6.30. İncelendiğinde, diğer profillerde olduğu gibi, bu profilde de akış hızının artması, sürüklenme katsayısını düşürmektedir. Bu profilde  $5^\circ < \alpha < 10^\circ$  hücüm açıları arasında sürüklenme katsayısındaki artış, eğimi daha düşük hücüm açılarına göre, çok daha yüksek olduğu görülür. 10 dereceye doğru hücüm açılarında, çok düşük kaldırma katsayısı ve çok yüksek sürüklenme katsayısı, kanat performansının oldukça düşmesine neden olmuştur. Aşağıdaki kısımda ise, kanatların performans yönünden karşılaştırılması yapılmıştır.

## 6.6 Kanat Performanslarının Karşılaştırılması

Bir türbin veya uçak kanadının performansı, kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranlanmasıyla elde edilir. Bir uçak için uçuş koşullarında kanat performansı, yakıt tüketimi üzerinde doğrudan etkilidir. Yüksek performanslı bir kanat, düşük performanslı bir kanada göre; yakıt tasarrufu sağlar. Aynı şekilde rüzgar türbinlerinde yine kanat performansı türbinin enerji dönüşüm verimi üzerinde doğrudan etkili

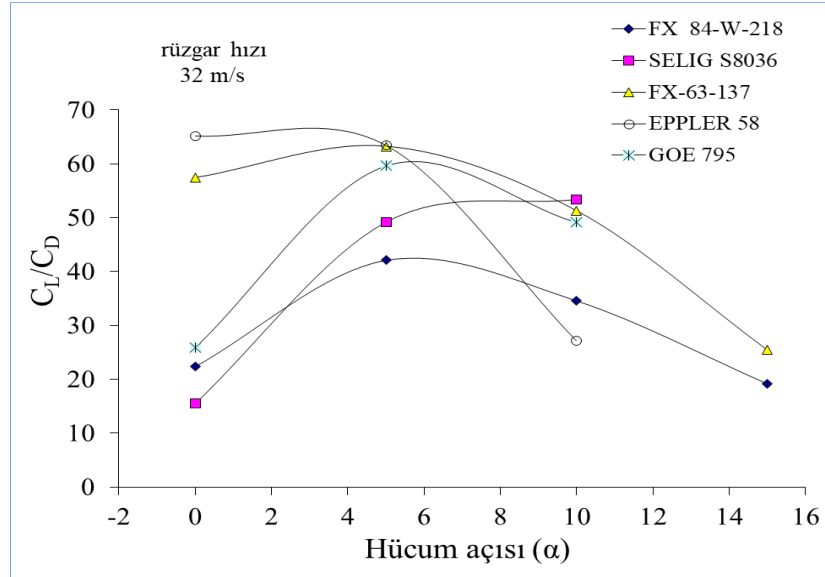
olmaktadır. Rüzgâr türbinlerinde kaldırma kuvveti, kanatların bağlı olduğu rotor üzerinde bir tork yaratır. Yaratılan bu tork statör üzerindeki manyetik kuvvetleri yenerek, türbin jeneratöründen elektrik üretimini sağlar. Rotorda oluşan mekanik gücün hepsi elektriğe dönüşmez, bir kısmı rotor yataklarında oluşan sürtünme kuvvetleri nedeniyle ısı şeklinde kaybolur ve kalanı ise jeneratörde elektriğe dönüşür. Kanatta oluşan yüksek kaldırma kuvveti, yüksek tork yaratacağından, daha yüksek türbin çıkış gücü sağlar. Bir kanadın sürüklenme kuvveti ise; türbinin dönme eksenine paralel olup, kanat boyunca dik durumdadır. Dolayısıyla sürüklenme kuvveti, dönen rotoru yataklarına bastırır. Kaldırma kuvveti ile üretilen rotor gücünün bir kısmı burada sürtünmelere harcanır. Bu nedenle sürüklenme kuvveti, uçaklarda veya rüzgâr türbinlerinde sürtünmelere ve direnç kuvvetlerine neden olur. Dolayısıyla yüksek sürüklenme kuvveti, uçuşlarda daha yüksek itme gücü gerektirirken, rüzgâr türbinlerde de, elektrik üretim gücünü düşürmektedir. Yüksek kanat performansı uçaklarda yakıt tasarrufu sağlarken, rüzgâr türbinlerde ise mekanik-elektrik enerji dönüşüm verimini artırmaktadır.

Şekil 6.31’de 4 m/s serbest akış hızında, kanat performanslarının karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 6.31. incelendiğinde  $4^\circ < \alpha < 7^\circ$  hücum açıları arasında tüm kanatların yüksek performansa sahip olduğu görülür. Bu durumda  $4^\circ < \alpha < 7^\circ$  hücum açıları yüksek performansların görüldüğü, kanat açıları olarak kaydedilebilir. Burada EPPLER 58 kanat profili  $\alpha < 6^\circ$  hücum açılarına kadar, FX-63-137’nin performansından biraz yüksek olmak üzere, diğer üç profile göre çok yüksek bir performansa sahip olmuştur.  $6^\circ < \alpha < 10^\circ$  hücum açıları arasında, GEO 795 ve FX-63-137 kanat profillerinin, aynı performansa sahip ve diğerlerine göre yüksek performansa sahip olduğu görülür. Şekil tekrar incelendiğinde SELIG S8036 kanat profilinin  $7^\circ$  hücum açısından itibaren, performansının sabit değerlerde kalarak iyi bir performans sağladığı söylenebilir. Kanatlar arasında FX 84-W-218 kanat profili tüm hücum açılarında en düşük performansa sahip kanat profili olmuştur. Bu durumda FX 84-W-218 kanat profili rüzgâr türbinleri için başarısız bir kanat profili olarak görülebilir. Hücum açısının pek değişmediği rüzgâr türbinlerinde  $4^\circ < \alpha < 7^\circ$  hücum açıları arasında EPPLER 58, GEO 795 ve FX-63-137 birbirine yakın yüksek performansa sahip üç alternatif olarak düşünülebilir.



Şekil 6.31. 4m/s akış hızında kanat performanslarının hücum açısıyla olan değişimleri

Burada kanat performansları karşılaştırılırken en düşük ve en yüksek akış hızları için verilen grafikler üzerinden performans analizi yapılmıştır. Diğer kalan akış hızlarında ise grafikler Şekil 6.33'de verilmiştir. Bu nedenle 32 m/s akış hızında kanat performanslarının hücum açısıyla olan değişimleri şekil 6.32.'de verilmiştir. Bu akış hızında verilen performans eğrileri en düşük akış hızına göre değerlendirildiğinde, performans değerlerinin daha yüksek olduğu görülür. Yüksek akış hızındaki performans eğrilerinin, hücum açısıyla olan değişimleri gözlemlendiğinde ise; eğrilerin düşük akış hızındaki performans eğrileriyle benzer fonksiyonel eğriler oldukları görülür.



Şekil 6.32. 32 m/s akış hızında kanat performanslarının hücum açısıyla olan değişimleri

8 m/s ve 16 m/s serbest akım hızındaki diğer performans eğrilerinin de hücum açısıyla olan değişimlerinin, diğer hızlarla benzer özellikler olduğu Şekil 6.33'de görülmektedir.

Burada rüzgâr hızının artması, performansları artırdığı ve bu artmanın her profilde farklı olduğu görülmektedir. Her kanat için çıkarılan performans eğrilerinin, hücum açısıyla olan değişimlerinin, farklı serbest akım hızlarında benzer olduğu; Şekil 6.31-6.32 ve 6.33'de görülmüştür. Akış hızının 4 m/s 'den 32 m/s 'ye yükselmesi durumunda, her hücum açısında performanstaki yüzdelik artışları Tablo 8 'de verilmiştir. Tablo 8 incelendiğinde FX 84-W-218 profilinde performanstaki yüzdelik artışın, tüm hücum açılarında diğer profillere göre en yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca Tablodan Selig S8036, FX 84-W-218 'den sonra yüzdelik artışı en yüksek olan kanat profili ve EPPLER 58 kanat profilinin rüzgâr hızının değişmesiyle, performansı en az değişen profil oldukları görülür. Tablo değerleri göz önünde bulundurulduğunda, serbest akım hızının artması, performans değerleri üzerinde yeterince etkili bir parametre olduğu görülür. Bu durum rüzgâr hızının yüksek olduğu akış bölgelerinde, rüzgâr türbinlerinin kurulmasını gerektirir. Bu şekilde daha yüksek enerji dönüşüm verimlerine ulaşılabilir. Bu performanstaki artışlar her profil için farklı olabilmektedir. Hücum açısının değişmesi, performans yüzdelerinde genel olarak pek az değişim yaratmıştır.

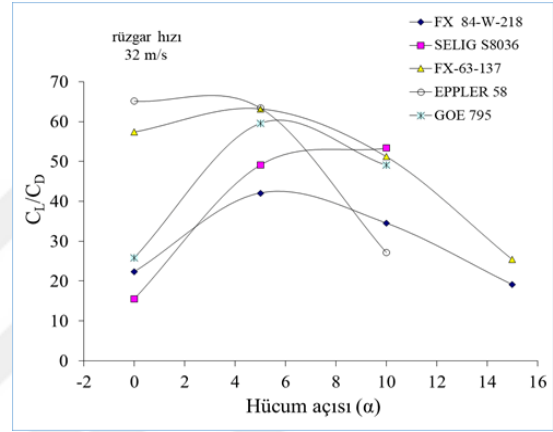
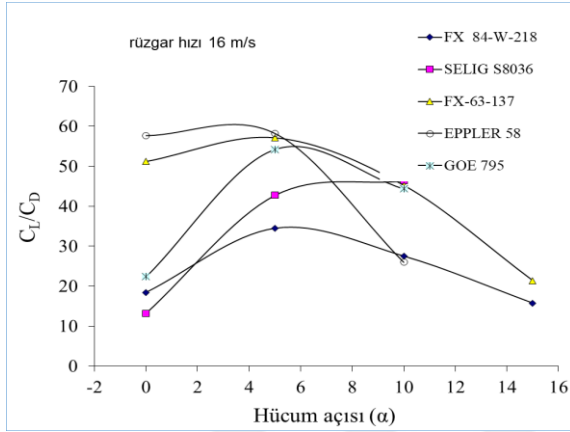
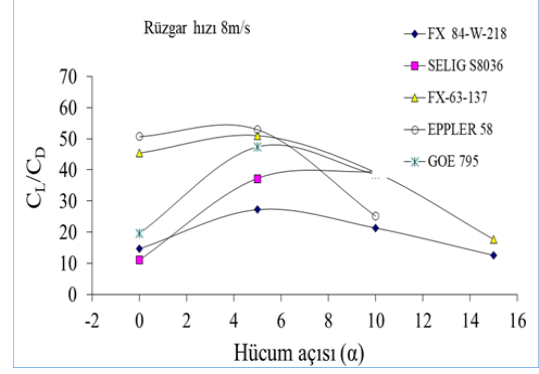
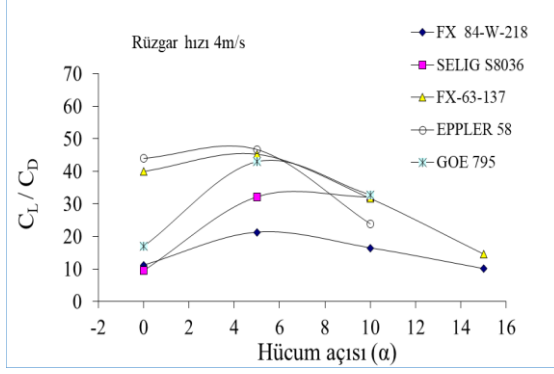
**Tablo 8.** 4m/s ve32m/s arasında rüzgâr hızındaki değişimin performans değişimine etkisi

4 m/s - 32 m/s arasında performans artış yüzdesi (%)			
	0 derece	5 derece	10 derece
<b>EPPLER 58</b>	19,81	13,84	11,26
<b>FX 84-W-218</b>	69,15	57,90	62,54
<b>Selig S8036</b>	52,96	35,79	32,10
<b>FX 63-137</b>	18,36	17,04	23,15
<b>GOE 795</b>	35,61	28,38	34,94

Bu bölüm sonuçlanacak olursa; hücum açısının kanat performansı üzerinde çok etkili olduğu görülmektedir.  $4^{\circ} < \alpha < 7^{\circ}$  hücum açıları arasında, tüm kanat üzeri akışların, tüm akış hızlarında, en yüksek performanslar görülmüştür. Performans eğrilerinin hücum açısıyla olan değişimleri gözlemlendiğinde, her akış hızında fonksiyonel olarak benzer eğriler görülmüştür. **EPPLER 58** profili, tüm akış hızlarında  $\alpha < 6^{\circ}$  hücum açısına kadar, diğer profillerden daha yüksek performans değerlerine sahip olmuştur. FX 63-137 kanat profili  $\alpha < 6^{\circ}$  açılara kadar, **EPPLER 58** profilini düşük bir farkla, alt değerlerde paralel takip ederken,  $\alpha > 6^{\circ}$  sonraki hücum açılarında ise; diğer tüm

profillere göre yüksek performans göstermiştir. Selig S8036  $\alpha=10^\circ$  hücum açısına kadar, performans değerleri sürekli artarken, bu hücum açısında diğer kanatlara göre, en yüksek performansa sahip kanat olmuştur.  $\alpha=10^\circ$  sonraki hücum açılarında ise; iterasyonlarda yakınsama sağlanamadığından, daha yüksek açılarda Selig S8036 performansı hakkında, kesin bir şey söylenmez; fakat performans eğrisi incelendiğinde  $\alpha=10^\circ$  hücum açılarından sonra, diğer kanatlara göre yüksek performans doğru gittiği görülebilmektedir. GOE 795 profilinin kanat performansının hücum açısıyla olan değişimleri gözlemlendiğinde ise; performans değerlerinin hücum açısıyla birlikte yüksek eğimde tepe noktasına çabuk ulaşıldığı, aynı şekilde yine yüksek eğimle düşük değerlere yönlendiği görülmektedir. Burada GOE 795 profili, diğerlerine göre daha ince bir profil olduğundan, performans değişimleri hücum açısına karşı çok hassas olmasına neden olmuştur.  $\alpha > 10^\circ$  derece hücum açılarından sonra GOE 795 kanat profili düşük bir performans farkı ile FX 63-137 kanat profilini takip ettiği görülmektedir. Akış hızının artması tüm profillerde performansları önemli bir şekilde artırdığı Tablo 8 ile tespit edilmiştir. Akış hızının 4 m/s 'den 32 m/s 'ye yükselmesi durumunda, tüm hücum açısında elde edilen değerlere göre, maksimum %70 ve minimum % 10 civarında performans artışları olduğu görülmüştür.

Tablo 8 değerlerine göre, FX 84-W-218 kanat profili diğer profillere göre akış hızının değişiminde en çok etkilenen kanat profili olduğu görülmüştür. Kanat performanslarının hücum açısıyla ve akış hızıyla olan değişimleri bu bölümde değerlendirilerek verildi. Şekil 6. 33'de 4 m/s ve 8 m/s 16 m/s 32 m/s akış hızlarında, kanat performansları kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Takip eden bölümde ise; kanat üzeri akışlarda kanadın alt ve üst yüzeyine etki eden basınç katsayıları değerlendirilecektir.



Şekil 6. 33. 4 m/s ve 8 m/s 16 m/s 32 m/s akış hızlarında, kanat performanslarının kendi aralarında karşılaştırılması

## 7 BASINÇ VE HIZ DAĞILIMLARI

Bu bölümde, kanat üzerinden hava akışlarında, kanadın alt ve üst yüzeylerine etki eden, etkin basınç dağılımları incelenecektir. Ayrıca bu kısımda hava akışının, profil üzerindeki hız dağılımları, renk kontörleri ve vektör dağılımları ile görselleştirilecektir. Burada, Bernoulli denkleminin bir sonucu olarak, kanat üzerinden hava akışında, akış hızındaki azalmanın, statik basınç artışına ve akış hızındaki artmanın ise; statik basınç düşümüne neden olduğu gösterilecektir. Bernoulli denklemi; viskozuz ve sıkıştırılmaz akış alanlarında, bir akım çizgisi boyunca, toplam akış enerjisi üzerinden, eşitlik ifade eden bir denklemdir. Bernoulli denklemi, sürtünmeli akışlarda ihmal edilebilir viskozlu akış bölgeleri varsa, kolayca uygulanabilen bir denklemdir. Bernoulli denklemi, bir akım çizgisi boyunca her noktada, akış enerjisinin eşit olduğunu vurgular. Bir akım çizgisi boyunca, herhangi bir tersinmezlik olmadığını vurgular.

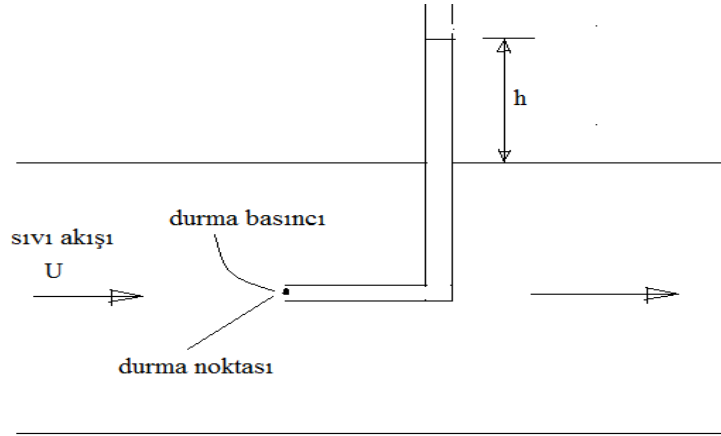
$$P + \frac{1}{2} \rho U^2 + \rho g h = C \quad (7.1)$$

Burada C sabit bir sayıdır. Burada akışın toplam enerjisi, üç terime ayrılmıştır. Birinci terim, akışın birim hacmindeki basınç enerjisini, ikinci terim kinetik enerjisini ve üçüncüsü ise; akışın bulunduğu konum itibariyle, akışkanın yerçekimsel potansiyel enerjisini temsil eder. Sürtünmesiz (viskozuz) ve sıkıştırılmaz daimi bir akışta, bir akım çizgisi boyunca akışkanın toplam enerjisi değişmediğinden, bu enerji terimleri akım çizgisi boyunca sadece birbirine dönüşür. Denklemdaki terimler aynı zamanda, akışkanın toplam basıncını da göstermektedir. Denklem 7.1 de ilk terim akışkanın statik basıncını, ikinci terim dinamik basıncını ve üçüncü terim ise; bir referans düzlemine göre yerçekimi etkisiyle, akışkan ağırlığından dolayı oluşan akışkanın, hidrostatik basıncını temsil eder. Burada ilk ve son terim akıştaki statik basınçları göstermektedir.

$$P_{statik} = P + \rho g h \quad (7.2)$$

$$P_{dinamik} = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (7.3)$$

Bir akışta statik ve dinamik basınç toplamına; durma basıncı veya toplam basınç denir. Durma noktasında oluşan basınca; durma basıncı denir. Durma noktasında akış hızı sıfır olur ve durmadan önceki akış hızının yarattığı momentum, durma noktasında statik basınca dönüşür. Durma noktasında oluşan basınç ise, pitot ile Şekil 7.1.'deki gibi ölçülür.

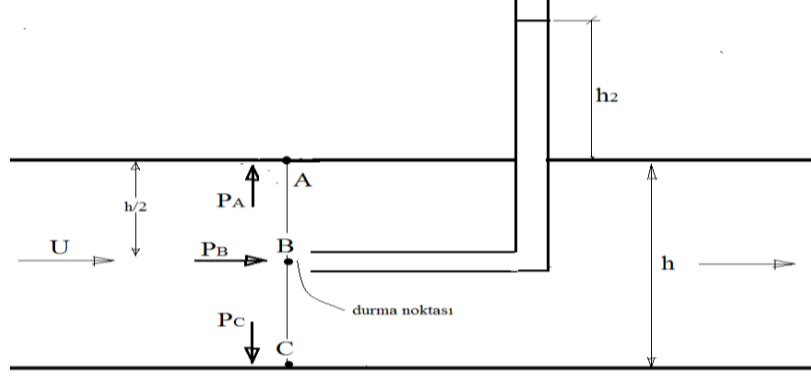


Şekil 7.1. Pitot tüp ile durma basıncı ölçümü

$$P_{durma} = P_{toplam} = P_{statik} + P_{dinamik} \quad P_{dinamik} = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (6.4)$$

Örneğin, kapalı bir kanal veya boru içerisinde akışı oluşturmak için, akışkan akmaya zorlanır. Bu tür akışlara zorlanmış akış denir. Zorlanmış akışlarda pompa veya fan kullanılır. Yerçekimi etkisiyle akışın kendiliğinden olduğu akışlara ise; doğal akışlar denir. Bir nehirdeki su akışı veya rüzgâr akışları, birer doğal akışlara örnek gösterilebilir. Burada zorlanmış akışlarda pompa veya fanın akışkana uyguladığı itme basıncı, Bernoulli denklemiindeki P terimiyle ifade edilen basınçtır; fakat doğal akışlar, sadece akışkan ağırlığının oluşturduğu basınç ile olduğundan, Bernoulli 'deki P basınç terimi yok olur. Bu terimleri ifade etmek için; pompa çıkışından itibaren, büyük bir borudaki su akışı düşünülürse ve borunun herhangi bir en kesitinde üç noktadaki basınçlar ifade edilirse, Bernoulli denklemiindeki terimler aşağıdaki gibi ifade edilebilecektir.





Şekil 7.2. Boru akışının en kesitinde üç farklı noktaya etki eden basınçların gösterilmesi

Boruda su akışı olduğu varsayılırsa; pompanın yarattığı basınç, boruyu geren statik basınçtır. Bu durumda A ve C noktalarında boruyu geren su basıncı statik basınçtır. Şekil 7.2. boru akışının en kesitinde üç farklı noktaya etki eden basınçlar gösterilmiştir. C noktasındaki basınç A noktasındaki basınçtan daha büyüktür. Çünkü borunun  $h$  çapı kadar bir suyun hidrostatik basıncı vardır. B noktasındaki basınçta A noktasındaki basınçtan büyüktür. Çünkü borunun  $h/2$  yarıçapı kadar bir suyun hidrostatik basıncı ve akışın dinamik basıncı vardır. Dolayısıyla her üç noktadaki basınçlar Bernoulli ile ifade edilirse, aşağıdaki eşitlikler ortaya çıkar. A ve C noktalarında akış hızı sıfır olup, dinamik basıncı yoktur.

$$P_A = P_{\text{toplam}} = P_{\text{statik}}$$

$$P_B = P_{\text{toplam}} = P_{\text{durma}} = P_{\text{statik}} + P_{\text{dinamik}} = \left( P_A + \rho g \frac{h}{2} \right) + \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (7.5)$$

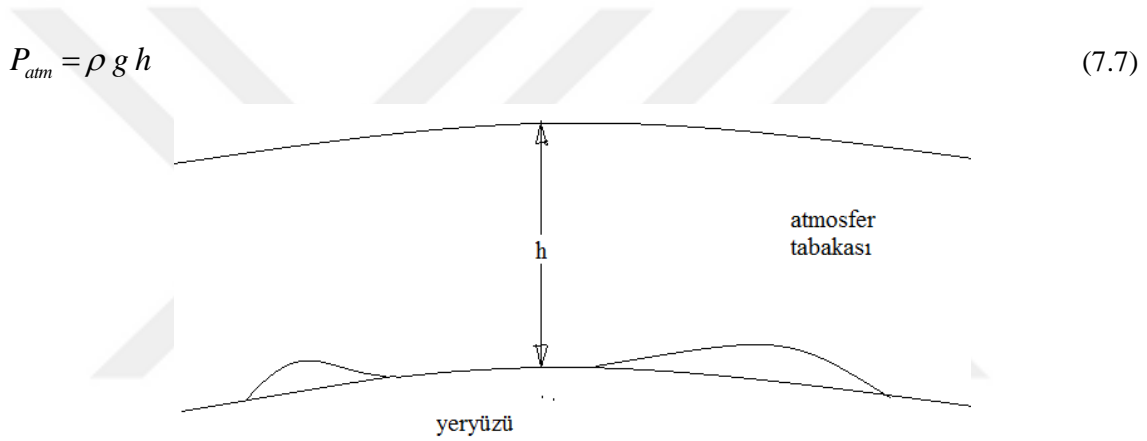
$$P_C = P_{\text{toplam}} = P_{\text{statik}} = P_A + \rho g h$$

Bu eşitliklerde B noktasındaki basınç, Bernoulli denklemindeki tüm terimleri içermektedir. B noktasındaki basınç, pitot tüpü ile ölçülmektedir. Pitot akışa karşı yerleştirildiği için, B noktası durma noktası oluyor. B noktasında akış durduğu için toplam basınç dinamik basınç nedeniyle artar. Bu durumda B noktasındaki toplam basınç yazılırsa;

$$P_B = P_A + \frac{1}{2} \rho U^2 + \frac{1}{2} \rho g h \quad (7.6)$$

$P_A$ : pompanın akışkanı itmesiyle veya akmaya zorlamasıyla oluşan statik basınçtır. B noktasında akışkan ağırlığından dolayı oluşan statik basınç  $\frac{1}{2} \rho g h$  ile gösterilmiştir.

B noktasında akışın durması ile oluşan dinamik basınç ise;  $\frac{1}{2} \rho U^2$  terimiyle ifade edilmiştir. Atmosfer havası kendi ağırlığından dolayı yeryüzüne bir statik basınç uygular bu statik basınca atmosfer basıncı denir. Şekil 7.3.'de atmosfer tabakası gösterilmiştir. Deniz seviyesinde bu basınç en yükseken denizden yüksek yerlerde ise daha düşüktür. Eğer atmosfer katmanını yüksekliğine  $h$  denirse ve atmosfer katmanındaki hava için ortalama bir hava yoğunluğu varsayılırsa atmosfer basıncı, aşağıdaki hidrostatik basınç formülüyle de bulunabilir.



Şekil 7.3. Atmosfer tabakası

Atmosfer basıncı, atmosferdeki hava kütesinin ağırlığı nedeniyle yeryüzüne uyguladığı bir basınç türüdür. Atmosfer olaylarında güneş ışığından dolayı soğuk ve sıcak bölgeler oluşur. Soğuk bölgelerdeki havanın yoğunluğu, sıcak bölgelerinkinden daha yüksektir. Dolayısıyla soğuk hava daha ağır olacağından, soğuk bölgedeki hava sıcak bölgedeki havaya bir basınç uygular. Bu şekilde soğuk ve sıcak bölgeler arasında bir basınç farkı doğar. Bu basınç farkı nedeniyle, soğuk havanın sıcak bölgeye nüfuzu; rüzgâr meydana getirir. Düz bir arazide atmosfer basıncı her yerde aynı olur. Eğer rüzgâr varsa yine atmosfer basıncı her noktada aynı olur. Rüzgâra karşı bir pitot tüpü bırakılırsa, durma noktasında atmosfer basıncına ek, rüzgâr hızından dolayı bir dinamik basınç fazlalığı vardır. Dolayısıyla pitot tüpün durma noktasında gösterdiği toplam basınç, atmosfer ve dinamik basınçların toplamı olur.

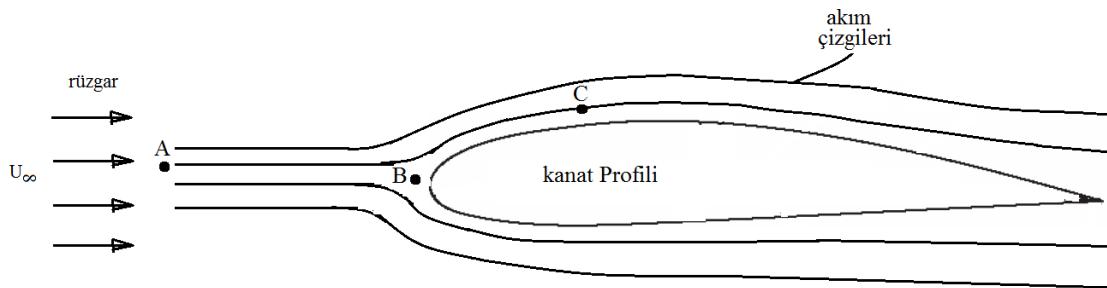
$$P_{toplam} = P_{atm} + P_{dinamik} \quad P_{dinamik} = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (7.8)$$

Burada  $U$  rüzgâr hızıdır. Bir uçak kanat profili rüzgâra karşı yerleştirilirse, kanadın hücum kenarında bir durma noktası oluşur. Durma noktasında oluşan basınç; atmosfer ile dinamik basınçların toplamı olur. Bu noktada basınç en yüksektir. Durma noktasından sonra kanadın alt ve üst yüzünde; hava hızı farklı olur. Kanadın üst tarafından geçen hava hızlanacağından oluşan hava akış hızı, türbine gelen rüzgâr hızından daha yüksek olur, dolayısıyla durma noktasında oluşan basıncın belirli bir kısmı; akışkanın hızlanmasına dönüşür. Bu durumda kanadın üst tarafına etkiyen statik basınç, akış hızlanmasından dolayı, normal atmosfer basıncına göre, daha düşük olmaktadır. Bu amaçla tasarlanan kanat profilleri, kanadın üst yüzünde yüksek hava hızı ve alt yüzeyde ise, düşük hava hız oluşacak şekilde tasarlanırlar. Bernoulli denklemi gereği, akış hızının yüksek olduğu kanat üst yüzeyinde, düşük statik basınç ve akış hızının düşük olduğu alt yüzeyde ise; yüksek statik oluşur. Bu statik basınç farkı, kanat üzerinde bir kaldırma kuvveti yaratır. Şekil 7.4.'de aynı akım çizgisi üzerinde bulunan A, B ve C noktalarında oluşan basınçlar, Bernoulli denklemi ile ifade edilebilir. A noktası gelen rüzgâr hızındadır. C noktasındaki hız gelen rüzgâr hızından daha yüksektir. B noktası durma noktası, olup sıfır hızdadır.

$$P_A = P_{atm} + \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \quad (7.9)$$

$$P_B = P_{durma} \quad (7.10)$$

$$P_C = P' + \frac{1}{2} \rho U_C^2 \quad (7.11)$$



Şekil 7.4. Kanat üzeri hava akışın akım çizgileri ile gösterilmesi

C noktasındaki statik basınç,  $P'$  ile ve akış hızı ise  $U_C$  gösterilmiştir. Burada C noktasındaki akış hızı  $U_C > U_\infty$  gelen rüzgar hızından daha yüksek bir hızdır. Kanat üzeri akışta sürtünmeler ve sıkıştırılabilirlik ihmal edilirse, Bernoulli denkleminin sıkıştırılmaz akışlar için formu geçerli olur. Bu durumda her üç noktada toplam basınçlar eşitlenebilir.

$$P_A = P_B = P_C \quad (7.12)$$

Bernoulli eşitliğine göre üç durum eşitlenirse, çıkan sonuçlar şu şekilde yorumlanabilir. A noktasında sadece statik basınç var ve bu atmosfer basıncına eşittir. B noktası durma noktası olduğundan, B noktasında oluşan basınç durma basıncı olup, atmosfer ve dinamik basınçların toplamıdır. C noktasında hava akışı, gelen rüzgâr hızından fazla olduğunda, C noktasında oluşan basınç; statik basınçtır ve atmosfer basıncından düşük olmaktadır. Bu durumda bir kanatta kaldırma kuvveti isteniyorsa, kanadın alt yüzeyinde yüksek statik basınç ve üst tarafında ise; düşük statik basınç sağlanmalıdır. Kanat geometrisi uygun şekilde tasarlandığında, kanadı alt ve üst yüzeyindeki farklı hava hızları oluşturulabilir. Kanadın alt yüzünde düşük hava hızı ve üst yüzünde ise daha yüksek hava hızı sağlandığında, kanadın alt tarafı yüksek basınç ve üst tarafı ise düşük basınçta olur. Bu şekilde bu basınç farkı kanat üzerinde bir kaldırma kuvveti oluşturur. Kanadın alt ve üst yüzünde statik basınç oluştuğu gibi, kanat üzerinden hava akışı bir sınır tabakaya neden olur ve bu sınır tabaka nedeniyle hava akışı, kanat duvarına sürtünür ve onu sürüklemeye çalışır. Kanat üzerinde oluşan statik basınçların, rüzgâr yönündeki bileşeni ile kanat yüzeyinde oluşan sürtünme kuvvetinin rüzgâr yönündeki bileşenleri toplamı, kanat üzerinde bir sürüklenme kuvveti oluşturur. Uçaklarda gerekli itme gücü sürüklenme kuvvetiyle orantılı arttığından daha fazla yakıt tüketimine neden olur. Bu nedenle kanat üzeri akışlarda, sürüklenme kuvvetinin az olması istenir. Bu nedenle performans katsayısı; kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranı olarak ifade edilmiştir. Bu oranın yüksek olması, kanadın iyi bir performansa sahip olduğunu gösterir. Sürüklenme kuvveti azaltmanın bir yolu da; kanat yüzeyinde oluşan laminar sınır tabakanın firar ucuna kadar sürdürülmesini sağlamaktır veya türbülansa geçiş engellemektir. Kanat yüzeyinde akış ayrılması ve türbülans oluşumu titreşim, gürültü, aerodinamik kararsızlık ve performans düşmesine neden olduklarından istenmeyen durumlardır.

Sayısal çalışmada, kanatlar üzerinden farklı rüzgâr hızlarında ve farklı hücum açılarında, hava akışları simule edilmiştir. Her akış durumunda farklı kaldırma kuvvetleri ve farklı sürüklenme kuvvetleri elde edilmiştir. Burada amaç, hangi hücum açılarında kanat performansları en iyi olduğunu ve en yüksek performansın hangi kanatla sağlandığını ortaya çıkarmaktır. Bu bölümde yapılan sayısal akışlarda her kanat üzeri akışta, kanat alt ve üst yüzeyine etki eden statik basınçların sonuçları ortaya çıkarılmış ve grafiksel olarak basınç katsayıları ile analiz edilmiştir. Boyutsuz basınç katsayısı Denklem 7.13' te verilen bağıntıyla hesaplanabilmektedir. Ticari kodlara bağlı CFX akış çözücü programı sadece kanat üzerindeki statik basınç değerlerini verdiği için, boyutsuz basınç katsayısı cinsinden sonuçları almak için CFD Post programında sonuç "expression" sekmesi ile boyutsuz basınç katsayısı aşağıdaki bağıntıyla formülize edilmiştir.

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{0.5 \rho U_\infty^2} \quad (7.13)$$

$$C_p = \text{Pressure} / (0.5 * \text{massFlowAve}(\text{Density}) @ \text{inlet} * U_{inf}^2)$$

$P - P_\infty = \text{Pressure}$  : kanat yüzeyinde oluşan etkin basınçtır.

$P$  : akıştaki mutlak basınçtır.

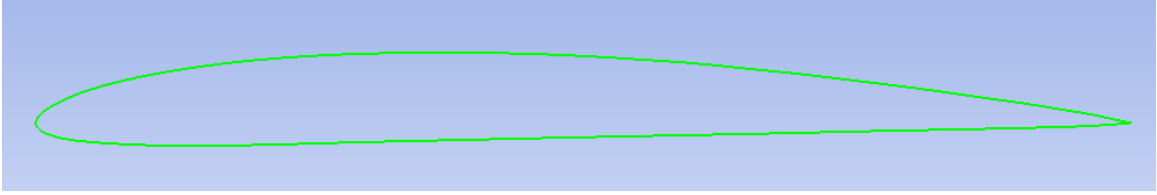
$P_\infty = P_{atm} = P_{ref}$  : serbest akım basıncı veya referans basınç değeridir ve değeri yerel atmosfer basıncına eşittir.

$\rho = \text{massFlowAve}(\text{Density}) @ \text{inlet}$  : giriş sınırında havanın yoğunluğu

$U_\infty = U_{inf}$  : gelen rüzgar hızı

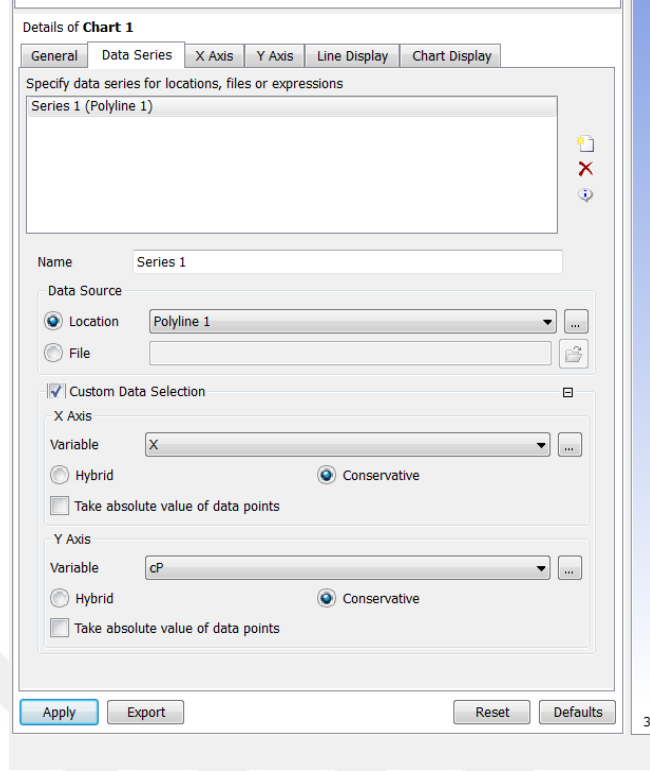
CFX Pre akış özellikleri ve sınır şartları belirtme programında, akış özellikleri girilirken referans basınç ( $P_{ref} = 1 \text{ atm}$ ) atmosfer basıncı olarak girilmiştir. Çıkış sınır şartında basınç etkin basınç olup sıfır basınç değeri girilmiştir. Sayısal akış alanında, kanat etrafındaki hava akış alanında, giriş ve çıkış sınırları, kanattan yeterince uzak seçilmiştir. Dolayısıyla giriş ve çıkış sınırlarından hava, mutlak olarak atmosfer basıncındadır. CFD post processing adlı sonuçların derlendiği programda ise, basınç değerleri okunmak istenirse "Variable selector" penceresinde "Pressure" etkin basınç seçeneği seçilmelidir. Mutlak basınç değeri okunmak istenirse "Variable selector" penceresinde "absolute pressure" seçeneği seçilmelidir. Burada CFD post processing programında her kanat üzeri akışta, kanadın alt ve üst yüzeyinde oluşan basınç katsayı

değerleri, veter uzunluğu boyunca dağılımları grafiksel olarak çıkarılmıştır. Kanat yüzeyi üzerindeki basınç değerlerinin okunması için, kanat yüzey sınırları bir çizgi olarak oluşturulmalıdır. Bu şekilde çizgi üzerinde bir sürü nokta oluşturulur ve bu noktalarındaki basınç değerleri okunur. Programda çizgi oluşturma "polyline" seçeneğiyle yapılmaktadır. Polyline akış alanındaki duvarın (wall) herhangi bir simetri yüzeyi (symmetryleft) ile kesişmesinden elde edilir



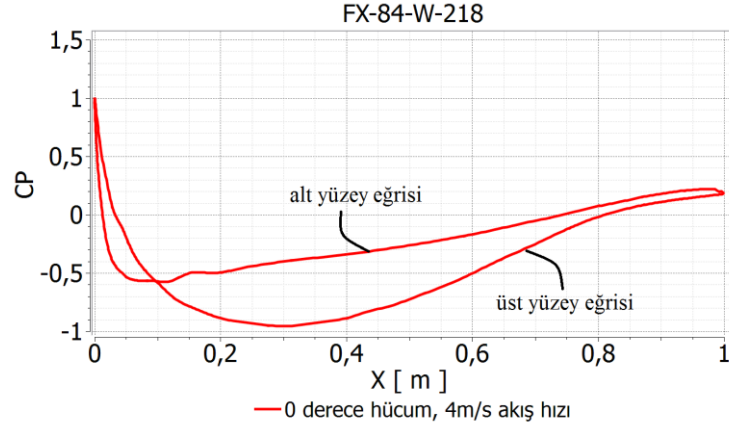
Şekil 7.5. Kanat sınırlarında polyline oluşturulması

Kanat sınırları polyline olarak oluşturulduktan sonra, grafik oluşturma (chart) seçeneğiyle kanat yüzeyine etki eden basınçlar, iki boyutlu Kartezyen koordinatta gösterilebilir. Basınç dağılımının grafik olarak gösterilmesinde, kanadın veter uzunluğu boyunca basınç değişimi olarak gösterilebilir. Bu nedenle grafiğin X axis seçeneğinde variable x eksenini olarak seçilir. Çünkü polyline üzerindeki basınç dağılımını görüntülemek için, her x koordinatındaki polyline üzerindeki basınç değerleri okunarak Y ekseninde gösterilmelidir. Bu nedenle Y axis seçeneği basınç katsayısı değerlerini göstereceğinden, variable "cP" olarak seçilir.



Şekil 7.6. Basınç değerleri grafiğini oluşturmak için grafik detay penceresi

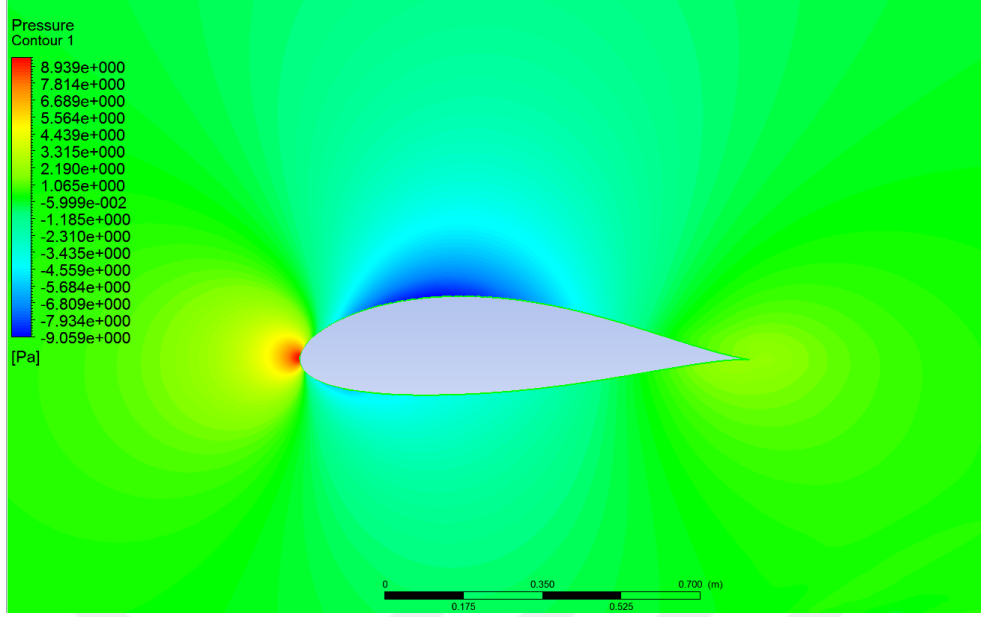
Grafik detayları oluşturulduktan sonra, kanat yüzeyindeki etkin basınç dağılımlarını göstermek için, her kanat üzeri akışta basınç katsayı değerlerinin x eksenini boyunca, değişim grafikleri oluşturulmuştur. Her bir kanat için 20 ayrı akış gerçekleştirildiğinden, her kanat profili için 20 ayrı basınç katsayı dağılımı, grafiği elde edilmiştir. Kanat profillerin boyutsuz basınç katsayı değerleri yönünden analiz etmek için, tüm kanat performanslarını en iyi olduğu 5 derece hücum açısı seçilerek, akışların basınç dağılımları bu bölümde gösterilmiştir. Sayısal sonuçlarda, aynı hücum açısında farklı akış hızlarındaki, basınç dağılım grafikleri karşılaştırıldığında, benzer eğrilere sahip olduğu görülmektedir. Burada akış hızının değişimi, basınç dağılım eğrisi üzerinde, az bir etkisinin olduğu görülebilmektedir. Bu durum Şekil 7.10 ve 7.11’de FX 84 W 218 profili için verilen basınç dağılım grafikleri ile görülebilmektedir. Hücum açısı değişimlerinde ise; basınç dağılım eğrilerinin tümüyle farklılaştığı her iki şekilde görülebilmektedir. Bu nedenle sadece hücum açısının basınç dağılımı üzerindeki etkisini, incelenmek yeterli olacağı görülmektedir. Kanat üzeri akışlarda basınç dağılımlarını analiz etmeden önce şekil 7.7. de FX 84 W 218 kanat üzeri akışta çıkarılan basınç dağılım eğrisinin tanımlanması, basınç dağılım grafiklerinin yorumlanması için önemli olacaktır.



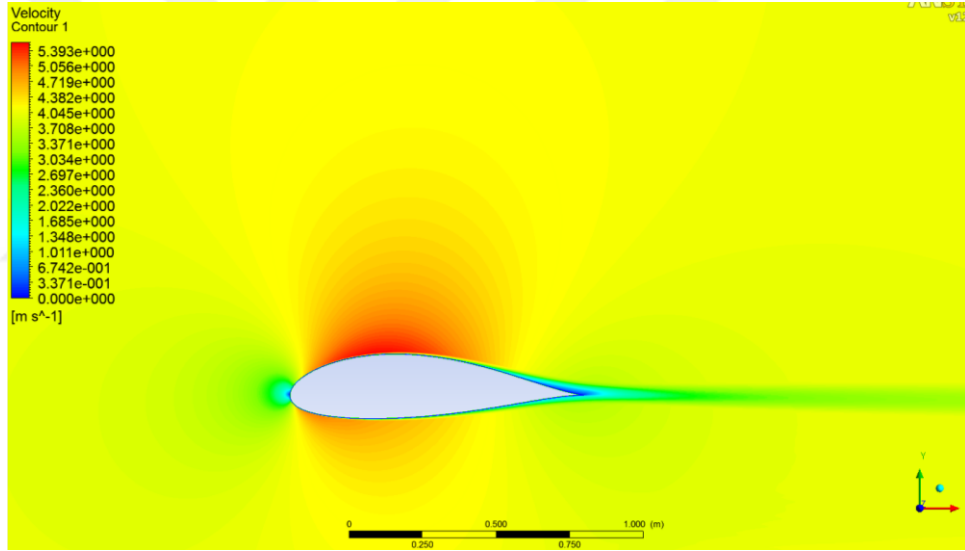
Şekil 7.7. FX-84-W-218 kanat yüzeyi üzerindeki basınç katsayısı değerlerinin kanat uzunluğunca değişimleri

Şekil 7.7’de 0 derece hücum açısında, 4m/s akış hızında kanat alt ve üst yüzeyleri üzerindeki basınç katsayı değerlerinin x eksenı boyunca değişim eğrileri birlikte verilmiştir. Şekil 7.7 incelendiğinde  $x = 0$  noktasında basıncın en yüksek olduğu görölür. Bu nokta kanadın hücum kenarındaki durma noktasını göstermektedir. Şekilde basınç katsayılarının pozitif değerleri etkin basıncın (atmosfer basınç üstü) olduğunu ve negatif değerler ise vakum basıncının ( atmosfer basınç altı) olduğunu göstermektedir. Şekil 7.7.’da kanadın üst yüzeyindeki basınçlar üst yüzey eğrisi ile ve alt yüzeyindeki basınçlar ise alt yüzey eğrisi ile gösterilmiştir.  $x = 0$  ve  $x = 1$  m koordinatları bu iki eğrinin birleştiği noktalardır. Şekil 7.7.’de görölüdüğü gibi kanadın alt yüzeyindeki basınç katsayıları üst yüzeyindeki katsayılardan daha büyüktür. Bu fark kanat üst ve alt yüzey arasındaki basınç farkını gösterir. Bu basınç farkı kanat üzerinde bir kaldırma kuvveti oluşturur. Farkın büyük olması yüksek kaldırma kuvvetini gösterir. Yüksek kaldırma kuvveti ise, kanat performansının artmasını sağlar. Şekil 7.7. üst yüzey eğrisi incelendiğinde, basıncın durma noktasından itibaren  $x=0.3$  m veter çizgi mesafesine kadar, parabolik olarak düştüğü ve daha sonra, kanadın firar ucuna kadar düşük bir eğimle arttığı görölür. Alt yüzey eğrisinde ise, durma noktasından sonra basınç, çok kısa bir mesafede yüksek bir eğimle düşmektedir ve daha sonra çok düşük bir eğimle bu basınç artmaktadır. Burada basıncın yüksek eğimlerde düştüğü kanat yüzeyi, hava hızının arttığı laminer akış bölgesidir. Basınç dağılımının grafiksel olarak gösterimden başka renk kontürleri şeklinde de gösterilebilir. FX 84-W-218 örnek kanat üzeri akışta 0 derece hücum açısında ve 4m/s akış hızında kanat etrafındaki hava akış alanında basıncın ve hızın değişimleri şekil 7.8. ve şekil 7.9. te renk kontürleri şeklinde gösterilmiştir.





Şekil 7.8. Kanat üzeri akış alanında basınç değişim renk kontörleri

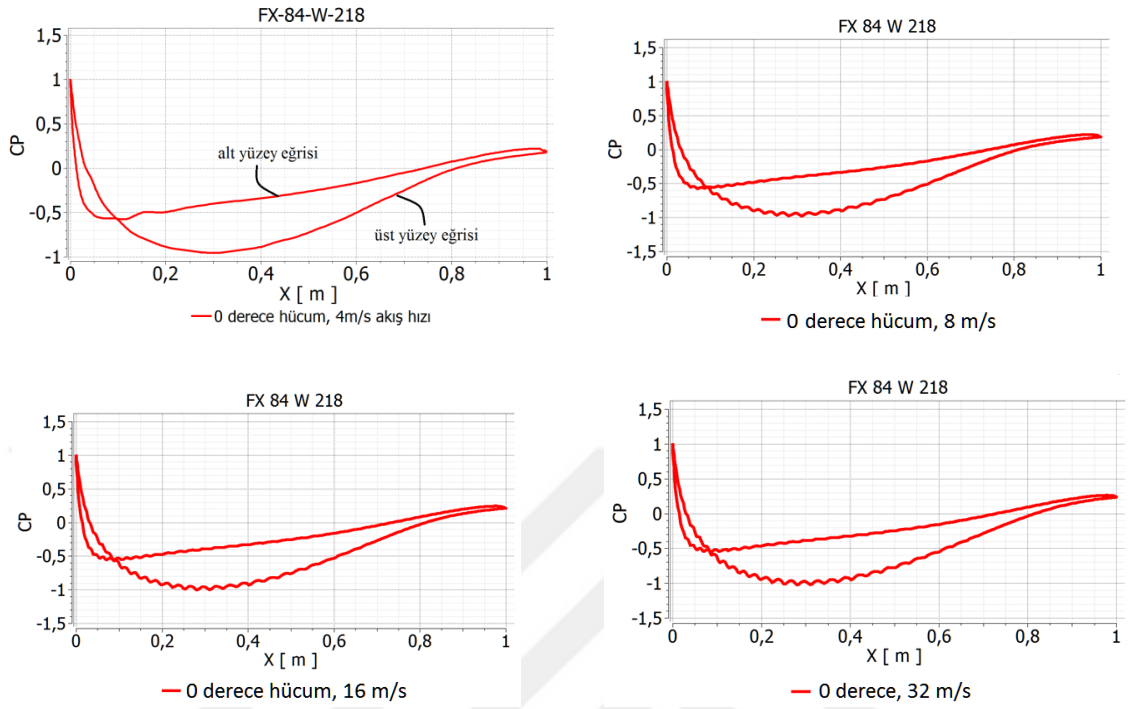


Şekil 7.9. Kanat üzeri akışta akış hızının değişim renk kontörleri

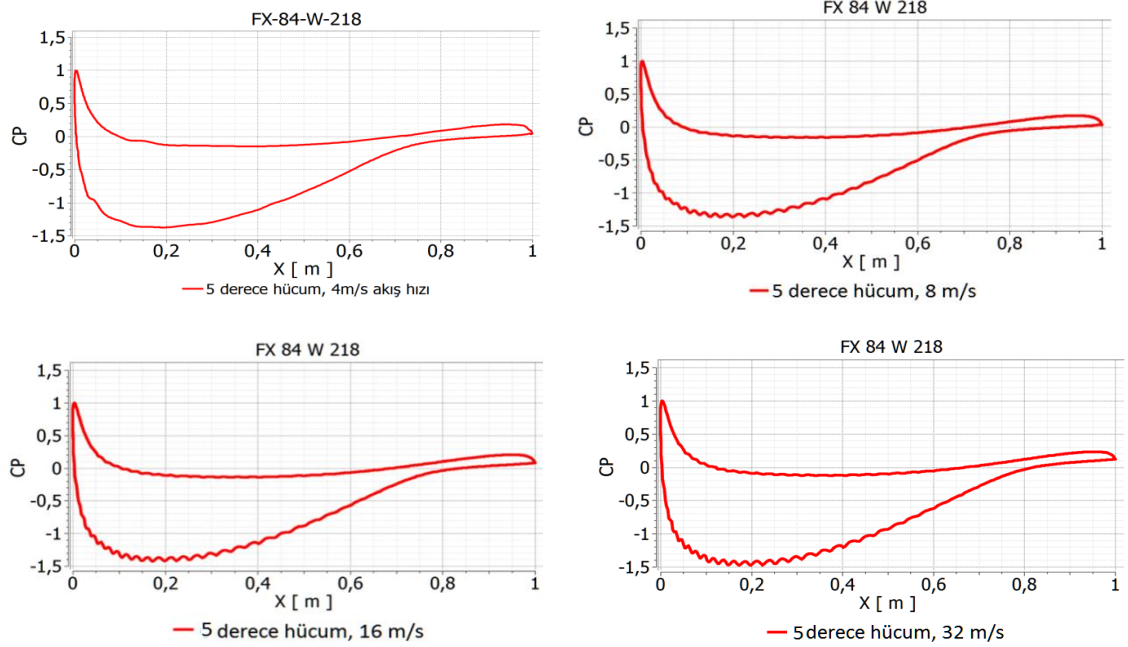
Şekil 7.8. kanat etrafındaki akış alanında basınç değişimlerini gösterirken, Şekil 7.9. hız değişimlerini göstermiştir. Basınç değişiminin renk kontörleri ile incelendiğinde, kanadın hücum kenarı bölgesinde, bir durma akış bölgesi olduğu görülür. Bu bölgede basınç kırmızı renkte olduğundan en yüksektir. Şekillerin sol tarafında, renklerin hız ve basınç karşılıkları sayı değeri olarak gösterilmiştir. Tam kırmızıda etkin basınç değerinin 8.939 Pa olduğu görülür. Kanat üst yüzünde basıncın mavi renkte olduğu görülür. Mavi rengin bulunduğu tüm akış bölgesi negatif basınç değerindedir. Bu da atmosfer altı basınç olduğunu gösterir. Şekil 7.9.'da hız renk kontörleri incelendiğinde,

akış hızının hücum kenarında ve firar kenarında en düşük olduğu görülür. Kanat üst yüzünde ise, akış hızı tam kırmızı renkte olup en yüksek değerdedir. Kanadın ün tarafındaki yukarı akım bölgesi, gelen rüzgâr hızını göstermektedir. Şekildeki renk kontörleri incelendiğinde, kanadın üst yüzeyine yakın akış bölgesinde akış hızının serbest akım hızından çok yüksek ve kanadın alt yüzeyine yakın akış bölgesinde ise, akış hızının, yine serbest akım hızından daha yüksek olduğu görülür. Kanat yüzeyinde ve firar kenarı arka akış bölgesinde ise, akış hızı düşük olduğu mavi ve yeşil renk kontörleriyle görülmektedir. Görüldüğü gibi; basınç ve akış hızı renk kontörleri karşılaştırıldığında, akış hızının yüksek olduğu akış bölgesinde, basıncın düşük olduğu ve durma noktasında akış hızının sıfır ve basıncın ise maksimum olduğu görülür. Bu da Bernoulli denkleminin akış davranışın tanımlamadaki önemini gösteriyor. Şekil 7.10-7.11'de FX 84-W-218 örnek kanat üzeri akışlarda  $0^\circ$  ve  $5^\circ$  hücum açılarında farklı akış hızlarında kanat alt ve üst yüzeyindeki basınç dağılım katsayı değerlerinin x koordinatına göre değişimleri gösterilmiştir. Şekil 7.10 ve 7.11 incelendiğinde 0 derece hücum açısında her dört akış hızında da basınç dağılım eğrilerinin pek değişmediği görülür. 5 derece hücum açısındaki basınç eğrilerinin ise, sıfır derece hücum açısındaki basınç eğrilerinden çok farklı olduğu görülür. Burada hücum açısının basınç dağılımı üzerinde çok etkili olduğunu gösterir. Aynı hücum açısında farklı akış hızlarındaki basınç eğrileri, iyice gözlemlendiğinde eğriler arasında bazı farkların olduğu görülür. Buda hız değişiminin basınç üzerindeki etkisini göstermektedir. Hücum açısı değişimlerinde ise, kanat alt yüzeyi ve üstü yüzeyi üzerindeki basınçların çokça değiştiği, değişim eğrilerinden görülebilmektedir. Örneğin 5 derece hücum açısı ile 0 derece hücum açısı arasındaki eğriler karşılaştırılırsa, (şekil 7.10.-7.11) beş derece hücum açısına geçişte kanat alt yüzeyindeki basıncın arttığı ve üst yüzündeki basıncın daha da azaldığı görülmektedir. Bu durumda beş derece hücum açısında kanat üzerindeki kaldırma kuvveti daha yüksek olmaktadır. Burada FX 84-W-218 örnek kanat profili üzerindeki akışlar gözlemlenmiştir. Hız değişimlerinde basınç eğrileri pek değişmediğinden, hücum açısıyla olan basınç değişimlerinin analiz edilmesinin daha uygun olduğu görülür. Bu nedenle FX 84-W-218 kanat profili için, 0 derece ve tüm akış hızlarında, basınç dağılım eğrileri, Şekil 7.10'da gösterilmiştir. 5 derece hücum açısında, tüm kanat üzeri akışlarda performans değerleri en yüksek olduğundan, 5 derece hücum açısındaki basınç dağılımları karşılaştırılacaktır. Şekil 7.12'de 5 derece hücum açısında ve 8m/s serbest akış hızında, her kanat profili için basınç katsayı değişim grafikleri verilmiştir. Bu beş ayrı grafikteki eğriler karşılaştırıldığında,

EPPLER58 ve FX 63-137 kanat profillerinde alt ve üst yüzeyler arasındaki basınç farkının, diğer profillere göre daha büyük olduğu görülür.



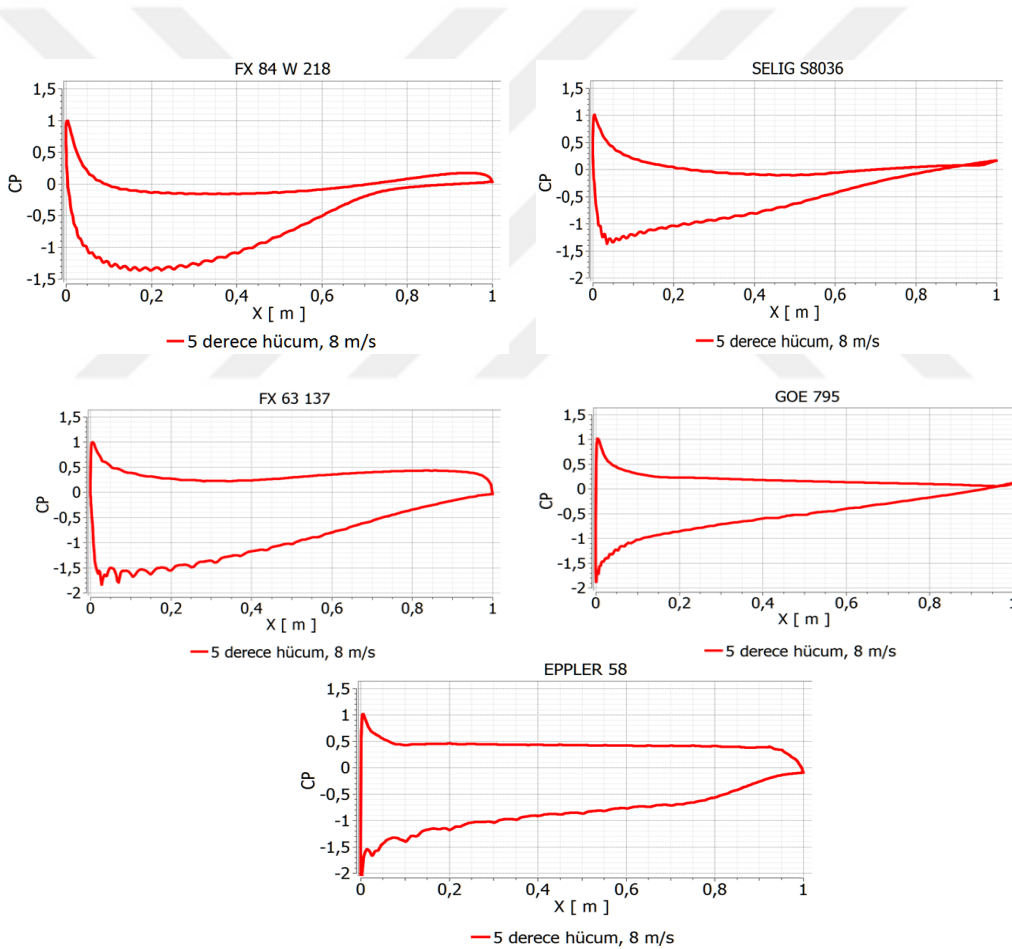
Şekil 7.10. 0 derece hücum açısında ve farklı akış hızlarında kanat yüzeyinde basınç katsayısı dağılımları



Şekil 7.11. 5 derece hücum açısında ve farklı akış hızlarında kanat yüzeyinde basınç katsayısı dağılımları

Şekil 7.12 incelendiğinde, 5 derece hücum açısında ve 8m/s akış hızında akış performansları karşılaştırıldığında; FX 63-137, GOE 795 ve EPPLER 58 kanat

performanslarının en yüksek olduğu görülür. Şekil 7.12.'de görüldüğü gibi, bu üç kanat profilinin hücum kenarına yakın kısımlarında basınç katsayısı farkının, diğer iki profile göre daha yüksek olduğu görülür. GOE 795 kanat profili, 5 derece hücum açısında ve 8 m/s akış hızında FX 63-137 ile yakın performansta olmasına rağmen, şekil 7.12'de basınç fark alanının daha düşük olduğu görülür. Bu durum iki farklı şekilde yorumlanabilir. Birincisi, bu kanat profilinde sürükleme katsayısı çok düşük olabilir. İkincisi, kanat geometrisinin şekli, kanat üzerine etki eden basıncın bir kısmının sürükleme kuvveti yarattığı unutulmamalıdır. Bu nedenle basınç katsayısı dağılımları kaldırma kuvvetinin büyüklüğünü göstermesine rağmen, karşılaştırmalarda tam kesin bir bilgi vermez. Bir kanadın performans katsayısı, kanat performansları karşılaştırmasında en kesin bilgi olduğu unutulmamalıdır.



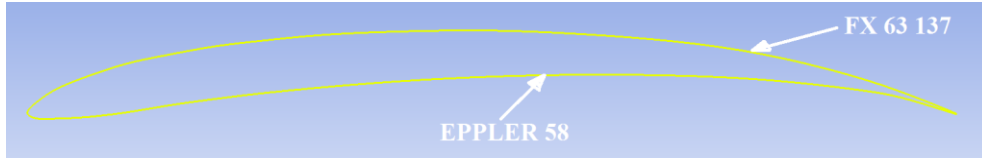
**Şekil 7.12.** Beş kanat profilinde, 5 derece ve 8 m/s 'de kanat alt ve üst yüzeyinde statik basınç dağılımı

Şekil 7.12'de kanat alt yüzeylerinde oluşan basınç dağılımları incelendiğinde, FX-84-W-218 ve Selig S8036 kanat profillerinde hücum kenarına yakın kısımlar dışında, etkin basıncın sıfır değerlerine yakın olduğu ve profil orta kısımlarda ise; negatif katsayı

değerleriyle vakum basıncın oluştuğu görülür; fakat FX-84-W-218 ve Selig S8036 dışındaki profiller incelendiğinde, kanat alt yüzeylerde etkin basıncın hücum kenarından firar kenarına kadar oluştuğu, pozitif basınç katsayı değerlerinden anlaşılmaktadır. Burada EPPLER 58 kanat profilinde kanat alt yüzey basıncının, hücum kenarından firar kenarına kadar diğer profillere göre en yüksek olduğu görülür. Burada EPPLER 58 ve FX 63-137 kanat profilleri basınç katsayı dağılımları yönünden karşılaştırıldığında, alt yüzey basınç dağılımlarında EPPLER 58 kanat üzeri akışlarının daha yüksek etkin basınçlarda, üst yüzey basınç dağılımlarında ise; FX 63-137 kanat üzeri akışlarının daha yüksek vakum basınçlarında olduğu görülür. Bu iki kanat profilinin bu iki ayrı özellikleri birleştirilmesi durumunda, daha yüksek performanslı bir kanat oluşturabilme ihtimali vardır. Bu ancak yeni bir sayısal çalışmayla kanıtlanabilir. Bu nedenle bu iki kanat profilleri birleştirilerek, hibrid bir kanat veya yeni bir kanat profili ortaya çıkarılabilir. Şekil 6.32 de EPPLER 58 ve FX 63-137 kanat profillerinin performansları incelendiğinde,  $0^\circ < \alpha < 5^\circ$  performanslarının yüksek olduğu ve pek fazla değişme olmadığı görülür. Bu nedenle EPPLER 58 kanat profilinin alt yüzey koordinatları ile FX 63-137 kanat profilinin üst yüzey koordinatları birleştirilerek, yeni bir kanat profili tasarlanmıştır.

## 8 HİBRİD KANAT PROFİLİ

EPPLER 58 kanat profilinin alt yüzey koordinatları ile FX 63-137 kanat profilinin üst yüzey koordinatları birleştirilmesiyle, oluşturulan hibrid kanat profili Şekil 8.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 8.1.** EPPLER kanat profilinin alt yüzey koordinatları ve FX 63 137 kanat profilinin üst yüzey koordinatları ile oluşturulmuş hibrid kanat profili

İki boyutlu koordinat datalarının birleştirilmesiyle, oluşan yeni kanat profili, diğer profillerde olduğu gibi, farklı rüzgâr hızlarında ve farklı hücum açılarında performansı, sayısal olarak simüle edilmiştir. Sayısal çalışmada, bu yeni kanat profili için elde edilen kaldırma katsayısı ve performans değerleri ise; Tablo 9’da yer verilmiştir. Tabloda gösterildiği gibi, 20° hücum açısında, sayısal çözümde yakınsama oluşmamıştır.

**Tablo 9.** Hibrid kanat profili için  $C_L$ ,  $C_L/C_D$  ve  $C_D$  sayısal değerler

HİBRİD PROFİL						
	m/s	0	5	10	15	20
$C_L$	4	0,868	1,342	1,645	1,577	*****
	8	0,895	1,385	1,726	1,659	*****
	16	0,922	1,420	1,788	1,737	*****
	32	0,946	1,453	1,838	1,793	*****
$C_L/C_D$	4	43,920	47,745	33,563	13,9311	*****
	8	49,568	53,518	40,186	16,18537	*****
	16	55,950	59,539	45,935	18,67742	*****
	32	62,560	65,635	50,729	20,92182	*****
$C_D$	4	0,020	0,028	0,049	0,113	*****
	8	0,018	0,026	0,043	0,103	*****
	16	0,016	0,024	0,039	0,093	*****
	32	0,015	0,022	0,036	0,086	*****

Tablo 9’da verilen değerler görsel olarak Şekil 8.2’de resmedilmiştir. Hibrid kanadın performans eğrilerinin, diğer kanat performans eğrileriyle karşılaştırılması ise; Şekil 8.3’te gösterilmiştir. Şekil 8.2 incelendiğinde, diğer kanatlarda görüldüğü gibi, akış hızının kanat katsayıları üzerindeki etkisi, hücum açısıyla arttığı görülmektedir. Ayrıca

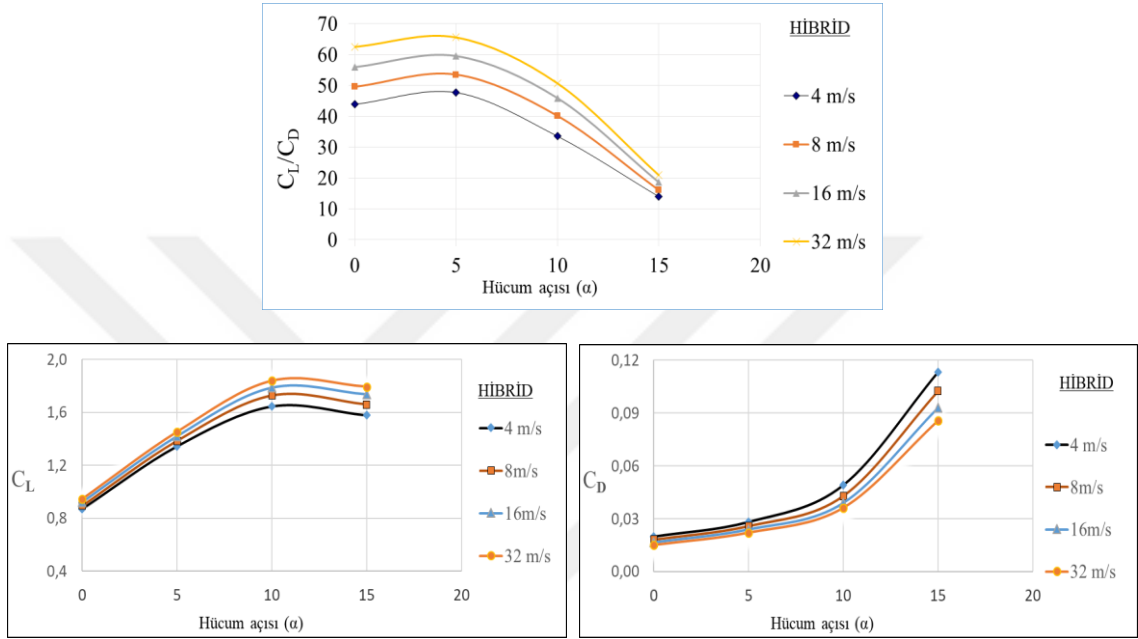
hibrid kanat performansı, EPPLER 58 de olduğu gibi  $\alpha < 6^\circ$  hücum açısına kadar sabit ve yüksek değerlerde seyrederken, daha büyük hücum açılarında, performansı FX 63 137 de olduğu gibi düşmeye başlamıştır. Burada hızın performans üzerindeki etkisi, düşük hücum açılarında daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 8.3'te ise; hibrid kanadın performans eğrisi, farklı olarak daha kalın ve kesik bir çizgiyle gösterilmiştir. Dört farklı rüzgâr hızında gösterilen performans eğrileri incelendiğinde, hibrid kanadın performans eğrileri;  $\alpha < 6^\circ$  hücum açılarında ve düşük akış hızlarında, (4, 8, 16 m/s) EPPLER 58 performans eğrileri ile hemen hemen üst üste çakıştığı ve daha büyük hücum açılarında ve yine düşük akış hızlarında (4, 8, 16 m/s) FX-63-137 performans eğrileri ile hemen hemen üst üste çakıştığı görülebilmektedir. Hibrid kanat performansı, daha yüksek akış hızlarında incelendiğinde (32 m /s) ise  $\alpha < 6^\circ$  hücum açılarında EPPLER 58 den biraz düşük ve  $\alpha > 10^\circ$  hücum açılarından itibaren ise; FX-63-137 den biraz daha düşük performans değerlerinde olduğu görülmektedir. Hibrid kanat profilinin tüm hücum açılarındaki performans değerlerinin EPPLER 58 ve FX-63-137 performans değerlerinden sapma yüzdeleri ise; Tablo 10 'da verilmiştir. Tablo 10 değerleri gözlemlendiğinde 5 derece hücum açısında, EPPLER 58 den maksimum %3.5 ve FX-63-137 den ise; maksimum %5.6 daha yüksek performans sağladığı görülmektedir. Aynı şekilde genel olarak hibrid kanat,  $5^\circ < \alpha < 10^\circ$  hücum açılarındaki EPPLER 58 ve FX-63-137 profillerinden daha yüksek performans değerlerine sahip olduğu görülebilmektedir.

**Tablo 10.** hibrit EPPLER 58 arasında ve hibrid-FX 63 137 arasında performans yüzdesi karşılaştırması

% artma – hibrid-EPPLER 58 arasında				
m/s	0	5	10	15
4	-0,05183	2,309803	41,25513	*****
8	-2,32855	0,99014	60,05517	*****
16	-2,86375	2,402875	76,75914	*****
32	-3,96628	3,512674	86,75597	*****
%artma - hibrid-FX 63 137 arasında				
4	10,03197	5,595245	6,164193	-3,92348
8	9,276575	4,952779	2,622409	-8,23696
16	9,359268	4,269342	1,67412	-12,4282
32	9,026758	3,85511	-0,9948	-17,7666

Daha iyi performans elde etmek için, oluşturulan hibrid kanat profili beklenildiği gibi EPPLER 58 ve FX-63-137 karşı  $5^\circ < \alpha < 10^\circ$  hücum açılarındaki daha iyi performans

gösterdiği gibi, diğer hücum açılarında ise daha kararlı bir performans göstererek her iki profilin performans dezavantajlarını bu hücum açılarında giderdiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak; hibrid kanat profili tüm hücum açılarında ve bu çalışmada verilen hız aralıklarında tercih edilebilir bir kanat olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu sayısal çalışma ile kanat basınç katsayı dağılımlarının gözlemlenmesi ile daha yüksek performanslı hibrid kanat tiplerinin oluşturulabildiği görülmektedir.

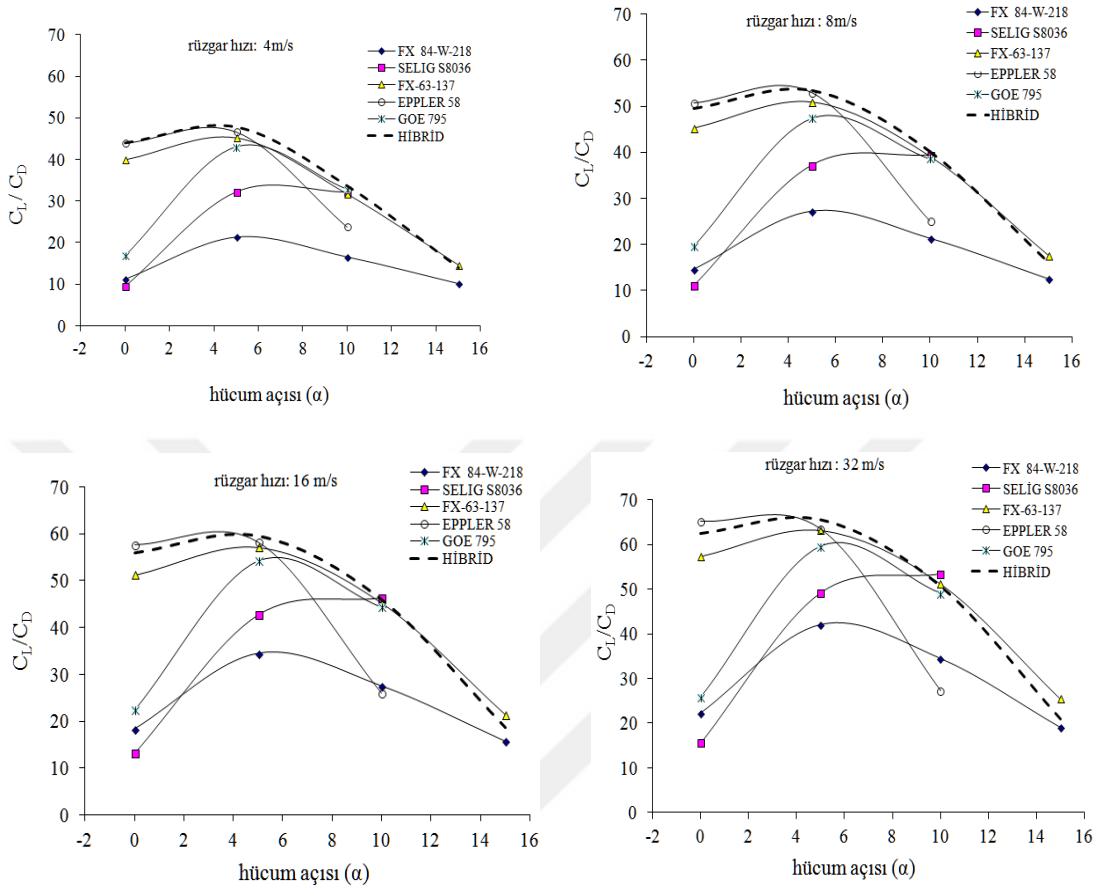


Şekil 8.2. Hibrit kanat profili performans grafikleri  $C_L$ - $C_D$ - $C_L/C_D$

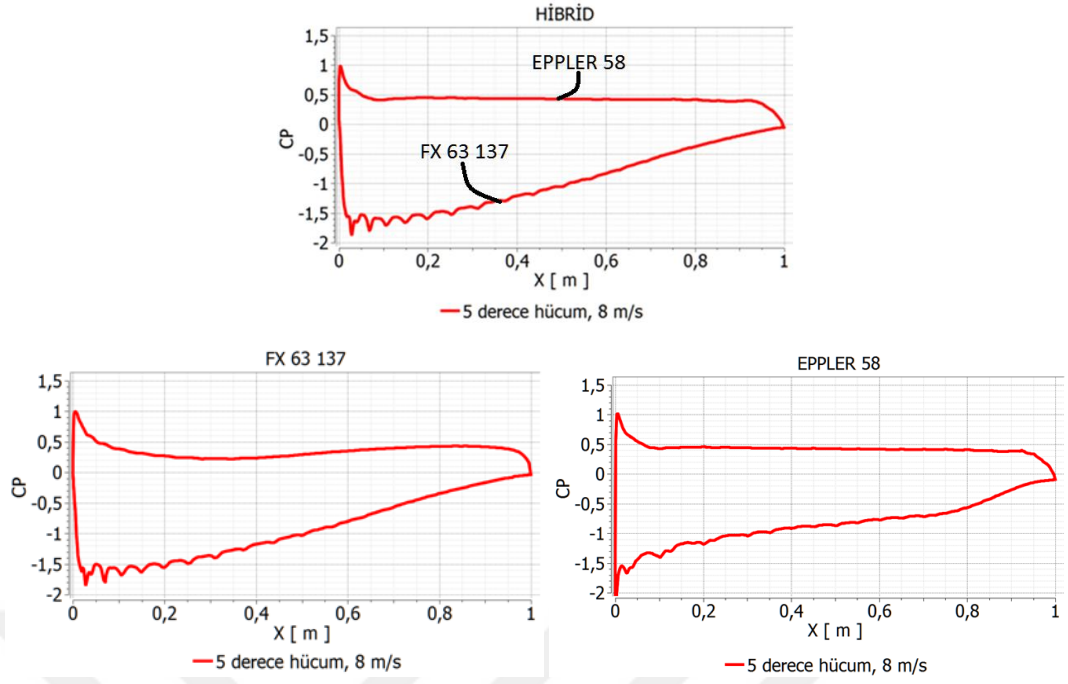
Hibrid kanat profili için sayısal sonuçlardan çıkarılan kanat alt ve üst basınç katsayı değerleri ise; veter uzunluğunca değişimleri Şekil 8.4 ve Şekil 8.5'te gösterilmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla EPPLER 58 ve FX-63-137 0 ve 5 derece hücum açılarında ve 8 m/s akış hızında basınç katsayı dağılımları gösterilmiştir. Hibrid kanat profilinde, kanat alt yüzey basınç dağılım eğrisinin, EPPLER 58 ile aynı olduğu ve kanat üst yüzey basınç dağılım eğrisinin ise; FX-63-137 ile hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Hibrid profil oluşturulurken kanat alt eğrisi EPPLER 58'den ve kanat üst eğrisi ise FX-63-137'den oluşturulduğu hatırlanmalıdır. hibrid kanat profilin alt ve üst yüzeyi üzerindeki akış davranışının EPPLER 58 ve FX-63-137 üzerindeki akış davranışıyla benzer olduğunu Şekil 8.4 ve Şekil 8.5'te karşılaştırma yapılarak görülebilir. Burada iki kanadın güçlü yönlerinin birleştirilmesi yeni daha etkili bir hibrid kanadın oluşturulabildiği görülmüştür. Diğer kanatlarda olduğu gibi bu kanatta da 5



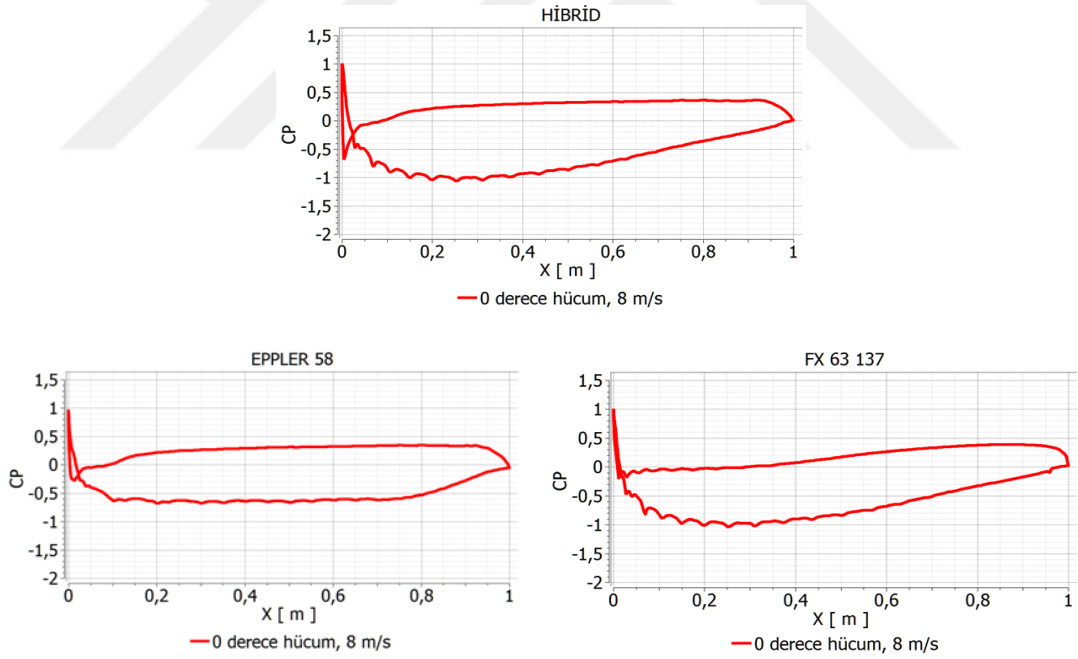
derece hücum açısı civarında maksimum performansın olduğu ve aynı şekilde akış hızının artmasıyla da performansın arttığı Şekil 8.3'te görülebilmektedir.



Şekil 8.3. Farklı rüzgar hızlarında hibrid kanat performansının diğer kanat performanslarıyla karşılaştırılması



Şekil 8.4. Hibrid profilede alt ve üst yüzey basınç dağılımının EPPLER 58 ve FX-63-137 ile karşılaştırılması ( 5 derece, 8m/s akış hızında)



Şekil 8.5. Hibrid profilede alt ve üst yüzey basınç dağılımının EPPLER 58 ve FX-63-137 ile karşılaştırılması ( 0 derece, 8m/s akış hızında)

## 8.1 Sonuçlar

Bu çalışmada rüzgâr türbinlerinde kullanılmak üzere yüksek performansa sahip kanat tipleri sayısal yöntemle araştırılmıştır. Uçak kanatları için oluşturulan farklı tip

kanatçık ailesinden beş farklı kanat tipi seçilmiştir. Seçilen bu iki boyutlu kanatlar üzerinden hava akışları sayısal yöntemle simüle edilmiştir. Kanat üzeri akışlar farklı hücum açıları (  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  ve  $20^\circ$ ) ve farklı rüzgâr hızlarında ( 4, 8, 16 ve 32 m/s) simule edilmiştir. Sayısal analizden çıkan sonuçlar ile kanat performanslarının rüzgâr hızıyla ve hücum açısı ile olan değişimleri incelenmiştir. Hava akış alanı sınırları kanat veter uzunluğunun 30 katı kadar uzaklıkta seçilerek, sayısal simülasyon yapılmıştır. Bu sınırlar viskozlu akış etkilerinin ihmal edilebilir olduğu, kanat duvarlarından yeterince uzaklıktaki sınırlar olmuştur. Hücreler arası hız ve basınç değişimlerinin yüksek olduğu kanat duvarı yakın civarı ve kanat arka akış bölgesinde eleman sayısı artırılarak sık ağ kullanılmıştır. Viskozlu akış bölgesinden uzaklarda potansiyel akış bölgesinde ise, kaba ağ kullanılmıştır. Akış alanında 500000-700000 civarında değişen ağ eleman sayısı oluşmuştur. Oluşturulan iki boyutlu sıkıştırılabilir ve daimi akış alanına süreklilik, momentum ve enerji denklemleri uygulanmıştır. Akış alanında oluşan türbülans akış bölgelerinin çözümünde ise, temel akış denklemlerinin zaman ortalamalı formları (RANS denklemleri) kullanılmıştır. Burada daimi akışa uymayan türbülans akış alanında türbülans etkilerin zaman ortalamalı değerleri ile akış alanı simule edilmiştir. Kanat üzerinden akışlar ticari kodlara sahip ANSYS CFX akış çözücü program ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal akış çözümlerinde yakınsamalar en çok 250 iterasyona kadar sürmüştür. Tüm akış özelliklerinde yakınsama kriteri olarak mutlak hata değeri  $10^{-5}$  oluncaya kadar iterasyonlar sürmüştür. Her akış için monitörde performans katsayısı yakınsama değerleri izlenerek iterasyonlar sonlandırılmıştır.

Sayısal çözümden elde edilen sonuçlar ile akış alanı analiz edilmiştir. Her kanat üzeri akışta kaldırma katsayısı, sürüklenme katsayısı ve kanat alt ve üst yüzeyi basınç dağılım değerleri sayısal çözümden çıkarılmıştır. Bu değerler hücum açısıyla ve serbest rüzgâr hızıyla olan değişimleri grafikler haline getirilerek görsel olarak yorumlanmıştır. Kanat performansını gösteren  $C_L/ C_D$  değerlerinin farklı akış hızlarındaki sayısal değerleri hücum açısı ile olan değişimleri incelendiğinde, aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmıştır. Yapılan grafik analizlerine göre her kanat üzeri hava akışında rüzgâr hızı arttığında, sürüklenme katsayısı düşerken, kaldırma katsayısı artmıştır. Gözlemlenen sonuçlara göre; rüzgâr hızının artması, her zaman kanat performansını artırmaktadır. Bu artışın yüksek hücum açıları daha da etkili olduğu görülmüştür. Katsayıların hücum açısıyla olan değişimleri incelenirken, 0 ile 10 derece hücum açıları katsayı değerleri gözlemlendiğinde ise; kaldırma katsayı değerleri yaklaşık olarak iki katına çıkarken, sürüklenme katsayı değerleri ise; yaklaşık olarak dört katına çıkmıştır. Bu nedenle hücum

açısının artması, sürüklenme katsayısı üzerinde daha da etkili olduğu görülebilmektedir. Hatta  $\alpha > 5^\circ$  hücum açılarından itibaren kaldırma katsayısı düşük bir eğimle artarken, sürüklenme katsayısı ise, yüksek bir eğimle artmaktadır. Bu nedenle yüksek hücum açılarında doğru performansın düşmesine neden olmaktadır.

Her kanat üzeri akışta  $4^\circ < \alpha < 7^\circ$  hücum açıları arasında performanslar maksimum değerlere sahip olmuşlardır. Burada hücum açısının kanat performansı üzerinde çok etkili olduğu görülebilmektedir. Burada EPPLER 58 profili, tüm akış hızlarında  $\alpha < 6^\circ$  hücum açısına kadar 45-65 arası performans değerleri ile diğer profillere göre daha yüksek performans değerlerine sahip olmuştur. FX-63-137 kanat profili ise;  $\alpha < 6^\circ$  açılara kadar EPPLER 58 profilini hafif düşük değerlerde paralel takip ederken,  $\alpha > 6^\circ$  sonraki hücum açılarında, diğer tüm profillere göre yüksek performans göstermiştir. Selig S8036  $\alpha=10^\circ$  hücum açısına kadar performans değerleri sürekli artarken, bu hücum açısında diğer kanatlara göre en yüksek performansa sahip kanat tipi olmuştur. Ayrıca akış hızının artması tüm profillerde performansları önemli bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir. Akış hızının 4 m/s 'den 32 m/s 'ye yükselmesi durumunda, tüm hücum açısında elde edilen değerlere göre maksimum %70 ve minimum % 10 civarında performans artışları gözlemlenmiştir.

Kanat yüzeyi üzerinde oluşan statik hava basıncı ise; boyutsuz basınç katsayısı ile incelendi. Kanat alt ve üst yüzeyi üzerindeki basınç, katsayısı dağılımı incelendiğinde EPPLER 58 kanat profilinin tüm kanat alt yüzeyi üzerindeki basınç dağılımının, diğerlerine oranla daha düzgün dağılıma ve daha yüksek değerlere sahip olduğu görüldü. Aynı şekilde kanat üst yüzeyi basınç dağılımında ise FX-63-137 kanat profilinde diğer kanat profillerine daha dolgun ve yüksek olduğu görüldü. Kanat alt yüzeyi koordinat dataları EPPLER 58 'den ve kanat üst yüzeyi koordinat dataları ise FX 63-137 kanat profilinden olmak üzere yeni bir hibrid kanat profili oluşturuldu. Burada amaç daha yüksek performansa sahip bir kanat profili oluşturmaktır. Bu kanat profilinin sayısal simülasyonundan çıkan sonuçları değerlendirildiğinde, bu kanat profili üzerinden akışlarda kanat alt yüzey basınç dağılımının, EPPLER 58 ile ve kanat üst basınç dağılımının ise FX 63-137 ile aynı olduğu görüldü. Daha iyi performans elde etmek amacıyla oluşturulan hibrid kanat profili, beklenildiği gibi EPPLER 58 ve FX-63-137'ye karşı  $5^\circ < \alpha < 10^\circ$  hücum açılarında daha iyi performans gösterdiği gibi, diğer hücum açılarında ise; daha istikrarlı bir performans göstererek, her iki profilin performans dezavantajlarını, bu hücum açılarında giderdiği görülmüştür. Sonuç olarak; hibrid kanat profili tüm hücum açılarında ve bu çalışmada verilen hız aralıklarında diğer

iki profil yerine tercih edilebilir bir kanat olduğu görülebilmektedir. Aynı zamanda bu sayısal çalışma ile farklı kanatlarda, kanat basınç katsayı dağılımlarının gözlemlenmesi ile daha yüksek performanslı kanat tiplerinin oluşturulmasının mümkün olabildiği görülmüştür.



## 9 ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında hibrid ile birlikte altı ayrı kanat profili, farklı rüzgâr hızlarında ve farklı hücum açılarında kanat üzeri akışları sayısal olarak simule edildi ve performansları test edildi. Sayısal çözümde genelde tüm profil üzeri akışlarda yüksek hücum açılarında olan  $\alpha > 15^\circ$  açılarından itibaren çözümlerde yakınsama sağlanamamıştır. Bunun nedeni olarak yüksek hücum açılarında akışın yüzeyden ayrılması sonucu türbülanslı akış alanında heterojen dağılıma sahip büyüklü küçüklü türbülans yapılarının varlığıdır. Türbülans akış alanı daimi bir akış farzıyla RANS denklemleriyle çözüldüğünden, türbülans etki zamandan bağımsız çözülmektedir. Bu da izotropik ve homojen dağılıma sahip türbülanslı yapıların oluştuğu bir akış alanını gerektirir. Türbülans akış alanı bu şartları sağlamadığı takdirde çözüm zamana bağlı temel akış denklemleri ile ancak sağlanabilir. Bu nedenle yüksek hücum açısında zamana bağlı türbülanslı akış alanı çözümlerinde birincil olarak DNS yöntemi, DNS mümkün olmadığı takdirde ise LES gibi sayısal yöntemler tercih edilmelidir. Bu çalışma, daha yüksek verimlerde Rüzgâr türbinleri oluşturmak amacıyla, performansı yüksek kanat profillerinin sayısal yöntemlerle araştırılabileceği gösterilmiştir. Burada yapılan çalışmada ise; farklı tip kanat profilleri seçilerek, rüzgâr türbini için performans katsayıları sayısal yöntemle araştırılmıştır. Bu nedenle yüksek performanslı kanat bulma araştırması, hala geniş bir araştırma konusu olduğu görülmektedir.

## 10 KAYNAKLAR

- Akgül, A.S. ve Hacıoğlu A., 2010, gözetleme/saldırı amaçlı mini insansız hava aracı tasarımı ve üretimi, *havacılık ve uzay teknolojileri dergisi*, ocak 2010, cilt 4 sayı 3 (1-6).
- Akıncı, V., Okan, E. ve Sapmaz C., 2011, Sanayi katılımı / offset uygulamalarında yeni trend ortak tasarım, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, *VI. Ulusal Uçak, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı*, 06-07 Mayıs 2011 / ESKİŞEHİR
- Aslan, G. M., Kurtuluş, F., 2016, füze kanadının ses-üstü uçuş koşulundaki aeroelastik analizi, VI. ulusal havacılık ve uzay konferansı, 28-30 Eylül 2016, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli
- Avcı, B. ve Yılmaz, T.B., 2012, Rüzgar türbini tasarımı ve analizi, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makina mühendisliği Bölümü.
- Bakırcı, M., Ceylan H. ve Yılmaz S., 2015, NACA 23012 Ve NREL S 809 Kanat Kesitlerinin Had İle Analizi, *Electronic Journal of Vocational Colleges*, Cilt 5, Sayı 1, Sayfalar 52-61
- Bekka, N., Bessaih, R., Sellam, M. and Chpoun A., 2010, Numerical Study of Heat Transfer around the Small Scale Airfoil Using Various Turbulence Models, *Num. Heat Transfer, Part A: Applications*, 56(12), 946-969
- Bermudez L., Velazquez A. and Matesans A., 2002, Viscous–Inviscid Method for the Simulation of Turbulent Unsteady Wind Turbine Airfoil Flow, *J. Wind Eng.*, 90, 643-661
- Bertagnolio F., Sorensen N.N. and Rasmussen F., 2005, New Insight into the Flow around a Wind Turbine Airfoil Section, *J. Solar Energy-Trans. ASME*, 217(2), 214-222
- Cengiz, Ç., 2010, slatlı kanat profilinin etrafındaki düşük reynolds sayılı hava ve su akışlarının incelenmesi ve aerodinamik performans analizleri, yüksek lisans tezi, *Başkent Üniversitesi, ENERJİ Mühendisliği Anabilim Dalı*
- Dahlström S. and Davidson L., 2000, Large Eddy Simulation of the Flow Around an Aerospatiale A-aerofoil, *ECCOMAS 2000, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Barcelona, Spain, 11-14 September
- Derya, H.T., 2010, ikili kanat profili etrafındaki düşük reynolds sayılı hava ve su akışlarının incelenmesi ve aerodinamik performans analizleri, yüksek lisans tezi, *Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Düz, H., 2009, Sayısal Yazılımlar, Seminer, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*

- Düz, H. 2013, Giriş ve tam gelişmiş akış bölgesinde laminar-türbülans geçiş özelliklerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, doktora tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*
- Erdoğan, B., Reynolds Sayısı ve Akış Türleri, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Deney Föyü.*
- Erler, E., Akçayöz E. ve Tuncer İ.H., 2008, sentetik jet parametrelerinin eliptik profil ve kanat kesiti üzerindeki akışın kontrolü için yanıt yüzeyi yöntemi ile sanayileştirilmesi *Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı 15-17 Ekim 2008, İTÜ, İstanbul.*
- Erişen A. ve Bakırcı M., 2014, NACA 0012 ve NACA 4412 Kanat Kesitlerinin Yeniden Tasarlanarak Had ile Analiz Edilmesi, *Journal of Engineerin and Technological Sciences (2014/1)*
- Genç M.S., Özışık G. ve Kahraman N. 2008, düz flaplı Naca 0012 kanat profilinin aerodinamik performansının incelenmesi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 28, 1, 1-8
- Genç M.S., 2010, Numerical simulation of flow over a thin aerofoil at a high reynolds number using a transition model, *Proc IMechE, Part C-Journal of mechanical Engineering Science*, vol. 224, pp. 2155-2164
- Geissler W., 2003, Numerical Study of Buffet and Transonic Flutter on the NLR 7301 Airfoil, *Aerospace Science and Technology*, 7, 540-550
- Gölcük A. İ., Çelik M., Akgün O. ve Kurtuluş F., 2015, Düşük irtifa uzun uçuş süreli ve güneş enerjili insansız hava aracının kanatçık tasarımı. *VIII. Ulusal Uçak, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı 22-23 Mayıs 2015 / Eskişehir.*
- Güleren K. M. ve Demir S., 2011, Rüzgâr türbinleri için düşük hücum açılarında farklı kanat profillerinin performans analizi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 31, 2, 51-59
- Jang C. S., Ross J. C. and Cummings R. M., 1998, Numerical Investigation of an Airfoil with a Gurney Flap, *Aircraft Design*, 1(2), 75-85,
- Karasu, İ., Genç, M.S., Açikel H.H., 2013, Numerical study on low Reynolds number flows over an Aerofoil, *J. Appl. Mech. Eng.*, 2, 5, 131
- Kaya, K. ve Koç, E., 2015, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kanat profil tasarımı ve üretim esasları, *Mühendis ve Makina*, cilt 56, sayı 670, s. 38-48.
- Kılıç, Z., 2012, Çift kanatlı taşıyıcı sistemlerin aerodinamik analizi, 1. Bitirme Çalışması, *İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak mühendisliği bölümü,*
- King L. S. and Johnson D. A., 1985, Separated Transonic Airfoil Flow Calculations with a Nonequilibrium Turbulence Model, *NASA Technical Reports*, NASA-TM-86830



- Onat C. ve Çetin Ş., 2003, rüzgar tünelineki kanat profilinin dikey hareketinin modellenmesi, *Mühendis ve Makine*, Cilt: 44, Sayı: 522
- Önen, B. ve Çınar A., 2010, düz flaplı pozitif kambura sahip NACA 4412 kanat profilinin aerodinamik performansının bilgisayar destekli analizi, 2. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi* 11-12 Kasım 2010- Balıkesir.
- Özden, M., Çelik, B., Açikel, H.H. ve Genç, M.S., 2015, rüzgâr türbini kanadında akış kaynaklı deformasyonlarının sayısal ve deneysel incelenmesi, 3. *İzmir Rüzgâr Sempozyumu* // 8-10 Ekim 2015 // İzmir.
- Özyetiş, E., ve Alemdaroğlu N., 2013, yüksek hızlı jet motorlu hedef uçağı tasarımı ve üretimi, TBMMO makine mühendisleri odası, *VII ulusal Uçak, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı* 03-04 Mayıs 2013/Eskişehir.
- Parezanovic V., Rasuo B. and Adzic M., 2006, Design of Airfoils for Wind Turbine Baldes, *The French-Serbian European Summer University : Renewable Energy Sources and Environment-Multidisciplinary Aspect*, 17-24 October 2006, Rnjačka Banja, Serbia
- Rişvanoğlu, U., 2010, NACA profil aile geometrisi hesap programı, kitap, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*
- Rodríguez C. and Morales C., 2014, Morphology development of an airfoil by numerical analysis, *ICAST2014: 25nd International Conference on Adaptive Structures and Technologies* October 6-8th, 2014, The Hague, The Netherlands
- Saçıkara, E., 2015, İki boyutlu akışta üç parçalı bir kanat profilinde flap pozisyonunun ve aktif akış kontrolünün taşıma katsayısına olan etkisi, yüksek lisans tezi, *Havacılık Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanlığı Havacılık Mühendisliği Programı*
- Sarıgöl, E., Kurtuluş D.F. ve Alemdaroğlu N., 2006, Çırpan kanat probleminde kanat profili kalınlığının sayısal incelenmesi, *HaSeM'06 Kayseri VI. Havacılık Sempozyumu* 12-14 Mayıs 2006, Nevşehir
- Selig M.S. and Granahan B.D.M., 2003, Wind Tunnel Aerodynamic Tests of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines. National Renewable Energy Laboratory 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393 303-275-3000 • [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov), Period of Performance: October 31, 2002–January 31
- Seber, G., İnsuyu E.T., Özgen S., Şaşhin M. ve Yaman Y., 2008, Değiken kambura sahip NACA 4412 kanat kesitinin 2-boyutlu aerodinamik analiz, İTÜ, *İstanbul II. ulusal havacılık ve uzay konferansı*, 15-17 Ekim 2008
- Shan H., Jiang L. and Liu C., 2005, Direct Numerical Simulation of Flow Separation Around a NACA 0012 Airfoil, *Computers & Fluids*, 34(9), 1096-1114
- Soğukpınar, H., 2017, Numerical Simulation of 4-Digit Inclined NACA 00xx Airfoils To Find Optimum Angle of Attack for Airplane Wing, *Uludag University Journal of The Faculty of Engineering*, Vol. 22, No.1

- Şentürk, U., 2007, Bir Rüzgar Türbininin Performansının Analitik ve Nümerik Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*
- Tangler, J. T. and Somers, D. M., 1995, NREL Airfoil Families for HAWT, *Proc. WINDPOWER'95*, Washington D.C., ABD, 117-123,
- Ünlüsoy, L., Yaman, Y., Şahin, M., Özgen, S., Seber G., İnsuyu, E.T. ve Sakarya E., 2011, göreve uyumlu kanatlara sahip bir insansız hava aracının, uçuş testleri ve yapısal geliştirilmesi *15. ulusal makina teorisi sempozyumu*, Niğde Üniv. Mühendislik Fakültesi 16 - 18 Haziran 2011.
- Vardar A. ve Alibaş, K., 2006, NACA 23012 Rüzgar Türbin Kanadı Performans Testleri, *Tarımsal Mekanizasyon 23. Ulusal Kongresi*, 6-8 Eylül 2006, Çanakkale
- Yeşil Ata B. III/17. Viskoz ( sürtünmeli ) Akışlar.
- Yılmaz, İ., Çam, Ö., Taştan, M. ve Karcı A., 2016, Farklı Rüzgar Türbin Kanat Profillerinin Aerodinamik Performansının Deneysel İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde Motor Bölümü, 38039, Melikgazi, Kayseri

## 11 ÖZGEÇMİŞ

09.02.1981 Tarihinde Diyarbakır Ergani'de doğdu. İlk Öğretimini Atatürk İlkokulunda da tamamladı. Orta öğretimini Kenan Evren Ortaokulunda yaptı. Ergani Endüstri Meslek Lisesinde Elektrik Bölümünü ( Meslek liseleri arasında Elektrik-Elektronik dalında yapılan sınavda bölge birincisi oldu) okuduktan sonra, Staj yaptığı Diyarbakır Dicle Üniversitesi Teknik Bakımda, Teknik Personel Olarak çalışmaya başladı( 15.06.1998 tarihinde mezun oldu). 2000 Yılında Girdiği OSYM sınavında Diyarbakır Dicle Üniversitesi Çüngüş Meslek Yüksek Okulu Elektrik Bölümünü Kazandı, 2002 yılında mezun oldu. Girdiği ikinci OSYM sınavında Diyarbakır Dicle Üniversitesi Batman Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Öğretmenliğini Kazandı. 04.08.2009 Mezun oldu. KPSS sınavı ile Bitlis Eren Üniversitesine Memur olarak atandı ( 07.01.2010). 2014 Yılında yapılan Unvan değişikliği sınavında Elektrik Teknikerliği kadrosuna atandı. 2014 Yılında Batman Üniversitesi Teknoloji Fakültesinde Yüksek Lisansa başladı. 2015 yılında DGS sınavı ile Diyarbakır Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi; Elektrik-Elektronik mühendisliği bölümüne yerleşti.