



**NACA KANAT MODELLERİNDE PÜRÜZLÜLÜK ETKİSİNİN SAYISAL
VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Ahmet Giray AKIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet Giray AKIN

19.04.2021

NACA KANAT MODELLERİNDE PÜRÜZLÜLÜK ETKİSİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet Giray AKIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2021

ÖZET

Rüzgâr türbinleri başta olmak üzere akışkan ile çalışan sistemler üzerinde yer alan kanat yapısı aerodinamik performans açısından büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, NACA 0015 kanat profilinin emme yüzeyinde yüzey pürüzlülüğünün aerodinamik performansa olan etkisi incelenmiştir. Yaygın olarak kullanılan tasarım programlarından birisi olan Rhinoceros ile NACA 0015 kanat profilinin hücum kenarından farklı uzaklıklarda ve sayılarda olan modifiyeli kanatlar elde edilmiştir. Ansys Fluent paket yazılımı kullanılarak viskoz akış çözüm yöntemlerinden olan k-ε türbülans modeli ile sayısal çözüm yapılmıştır. Bu çalışmada, düşük Reynolds sayısına sahip olan (4.28×10^4) akış için 0° ile 35° arasında sayısal analizler yapılmıştır. Sonuçlar analiz edildiğinde K_2 profili stall açısına ulaştıklarında diğer kanatlara göre daha yüksek C_L sağlamıştır. Aerodinamik performans açısından değerlendirildiğinde K_1 kanadı K_0 'den %1 ve K_2 kanadından %2,5 fazladır. K_0 kanat profili en yüksek C_L değerine $7,5^\circ$ 'de ulaşırken, K_1 kanadı 15° ve K_2 kanadı $12,5^\circ$ 'de ulaşmıştır. Pürüzlü yüzeylerden dolayı K_1 ve K_2 kanat profili K_0 profiline göre daha yüksek aerodinamik performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bununla beraber 3 boyutlu yazıcı yardımı ile elde edilen katı modeller Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Rüzgâr Tüneli Laboratuvarında yer alan rüzgâr tüneline deneysel olarak da incelenmiştir. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır ve örtüştüğü görülmüştür.

Bilim Kodu : 92806

Anahtar Kelimeler : NACA 0015, Airfoil, Pürüzlü Yüzey, FLUENT, ANSYS

Sayfa Adedi : 59

Danışman : Prof. Dr. Adem ACIR

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF ROUGHNESS EFFECT
ON NACA TURBINE MODELS

(M. Sc. Thesis)

Ahmet Giray AKIN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2021

ABSTRACT

Wind blade structure is, one of the most important structural elements, has importance for wind turbines. In this study, the effects of the surface roughness on the suction side for aerodynamic performance was investigated for NACA 0015 airfoil profile. Surface roughness was created at different distances and counts from leading edge of the airfoil. Modified surfaces and smooth surface had compared each other in terms of aerodynamic performance. Rhinoceros which is one of the most used design program was used for designing the wing profile. The numerical solution was obtained from Ansys Fluent program and k- ϵ solution method was used which is one of the viscous flow solution method. In this study, analyses were carried out between the angle of attack 0° and 35° while our wing profile has a low Reynolds number (4.28×10^4). When results were analyzed, K_2 has a higher lift coefficient (C_L) while they are reached stall angle. In terms of aerodynamic performance, K_1 is %1 higher than K_0 and %2,5 higher than K_2 wind blade. Unlike K_0 wind blade profile has reached maximum C_L at $7,5^\circ$, K_1 has reached at 15° and K_2 has reached $12,5^\circ$. Except for low angle of attack, it was observed that K_1 and K_2 wing profiles have higher aerodynamic performance than K_0 wind blade profile due to the having corrugate surfaces. Furthermore, blade models have been printed out by using 3D printer purpose of wind tunnel test which is located at Gazi University Wind Tunnel Laboratory. Experimental and numerical studies are compared with each other and results are validated.

Science Code : 92806

Key Words : NACA 0015, Airfoil, Corrugated Surface, FLUENT, ANSYS

Page Number : 59

Supervisor : Prof. Dr. Adem ACIR

TEŐEKKÖR

Bu alıŐmamn yűrűtűlmesi ve yűksek lisans eđitimim sűresince desteđini esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Adem ACIR'a ve tez alıŐmam boyunca sűrekli yardımcı olan ArŐ. Gűr. H. Erdi TANÖRÖN'e teŐekkűrű bir bor bilirim. Ayrıca eđitimim sűresince destek olan T.C. Cumhurbaşkanlıđı Savunma Sanayii BaŐkanlıđı Harp Gemisi Projeleri Műdűrű Cenk Cumhur KIYKIM'a ve kıymetli mesai arkadaşlarıma teŐekkűr ederim.

Son olarak bu zor sűrete sűrekli desteklerini hissettiđim aileme ve sevgili eŐim Dr. Gizem AKIN'a sonsuz teŐekkűr ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. NACA KANAT PROFİL YAPISI VE KURAMLAR	11
3.1. NACA Kanat Profili ve Yapısı	11
3.2. Aerodinamik Kuvvetler.....	12
3.3. İrtifa Kaybı (Stall).....	14
4. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) VE VİSKOZ AKIŞLAR.....	17
4.1. Korunum Denklemleri	17
4.1.1. Kütleinin korunumu kanunu.....	17
4.1.2. Momentumun korunumu kanunu.....	18
4.1.3. Enerjinin korunumu kanunu.....	18
4.2. Türbülans Modelleri.....	18
4.2.1. Spalart-Allmaras (SA) türbülans modeli.....	19
4.2.2. k-ε realizable türbülans modeli	19
4.2.3. Transition SST türbülans modeli	20
5. MATERYAL VE METHOD	21
5.1. Kanat Geometrisi	21

	Sayfa
5.2. Çözüm Ağ Yapısı (Mesh) ve Bağımsızlık	24
5.3. Ağ Bağımsızlık Çalışması	25
6. SAYISAL VE DENEYSEL ÇALIŞMA	29
6.1. Rüzgâr Tüneli Deneyi	29
6.1.1. Deney düzeneği oluşturulması	29
6.1.2. Deneysel belirsizlik	32
6.1.3. Deney çalışması	33
6.2. Farklı Türbülans Modeli Çalışmaları	35
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	39
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	59

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Ağ yapısı kalite değerleri.....	23
Çizelge 5.2. Ağ yapısı sayısından bağımsızlık	24
Çizelge 6.1. Pürüzlülük değerleri ölçüm sonuçları.....	27
Çizelge 6.2. Ölçüm cihazlarının belirsizlikleri	28
Çizelge 6.3. Hesaplamalar için maksimum belirsizlikler	28



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Türkiye’de kurulu rüzgâr enerjisi gücü (2020, MW)	2
Şekil 3.1. Kanat profili parametreleri	11
Şekil 3.2. İrtifa kaybının C_L üzerine etkisi.....	14
Şekil 5.1. K_0 profili şematik görünümü	19
Şekil 5.2. K_1 kanat profili	19
Şekil 5.3. K_1 kanat profili pürüzlü yüzey yapısı	20
Şekil 5.4. K_2 kanat profili şematik gösterimi.....	20
Şekil 5.5. K_2 Kanat profili pürüzlü yüzey yapısı	20
Şekil 5.6. a) C Tipi hesaplama alanı, b) K_1 kanat profili ve c) Pürüzlü yüzey özellikleri.....	21
Şekil 5.7. a) Ağ yapısı ve b) Detay görünüm.....	22
Şekil 5.8. Pürüzlü yüzey etrafındaki ağ yapısı.....	22
Şekil 5.9. C_L ve C_D değerlerinin ağ sayısına göre değişimi.....	24
Şekil 6.1. Rüzgâr tüneli şematik görünüm.....	26
Şekil 6.2. Pürüzsüz yüzeye sahip kanat yapısının 3 boyutlu yazıcıdan alınan model.....	27
Şekil 6.3. Pürüzlü yüzeylere sahip kanat profillerinin modelleri.....	27
Şekil 6.4. Pürüzlülük ölçümü a) izometrik b) üstten görünüm	28
Şekil 6.5. K_0 , K_1 ve K_2 profilleri deneysel çalışmaya göre C_L yönünden karşılaştırılması	30
Şekil 6.6. K_0 , K_1 ve K_2 profilleri deneysel çalışmaya göre C_D yönünden karşılaştırılması	31
Şekil 6.7. Farklı türbülans modellerinin karşılaştırılması.....	32
Şekil 6.8. K_0 kanadı y^+ değeri.....	33
Şekil 6.9. K_1 kanadı y^+ değeri.....	33

Şekil	Sayfa
Şekil 6.10. K_2 kanadı y^+ değerleri.....	34
Şekil 7.1. Farklı türbülans modelleri ve deneysel çalışmanın C_L karşılaştırılması.....	35
Şekil 7.2. a) K_0 ve K_1 , b) K_0 ve K_2 ve c) K_1 ve K_2 kanat modellerinin C_L değerleri.....	36
Şekil 7.3. a) K_0 ve K_1 b) K_0 ve K_2 c) K_1 ve K_2 kanat modellerinin C_D değerleri.	38
Şekil 7.4. a) K_0 K_1 ve K_2 b) K_0 ve K_1 c) K_0 ve K_2 d) K_1 ve K_2 C_L/C_D değerleri	40
Şekil 7.5. 15° ve $22,5^\circ$ değerleri için K_0 , K_1 ve K_2 kanat profillerinin C_p grafikleri.....	43
Şekil 7.6. Kanat profillerinin 15° hücum açısında basınç dağılımları ve akım hatları.....	44
Şekil 7.7. Kanat profillerinin $22,5^\circ$ hücum açısında basınç dağılımları ve akım hatları.....	44
Şekil 7.8. Kanat profillerinin 35° hücum açısında basınç dağılımları ve akım hatları.....	45
Şekil 7.9. 15° hücum açısı için hız vektörleri	45
Şekil 7.10. $22,5^\circ$ hücum açısı için hız vektörleri	46
Şekil 7.11. 35° hücum açısı için hız vektörleri	46
Şekil 7.12. 15° hücum açısında türbülans kinetik enerjisi dağılımı.....	46
Şekil 7.13. K_1 kanadının 15° hücum açısında türbülans kinetik enerji dağılımı	47
Şekil 7.14. K_2 kanadının 15° hücum açısında türbülans kinetik enerji dağılımı	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

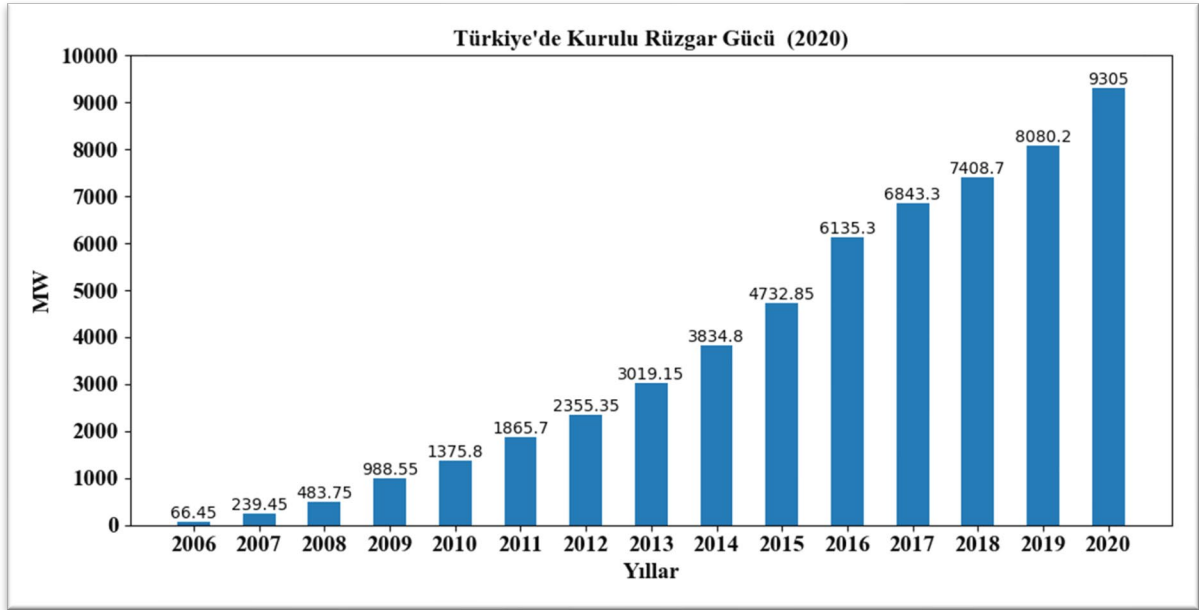
Simgeler	Açıklamalar
c	Veter Uzunluğu
C_D	Sürüklenme Katsayısı
C_L	Kaldırma Katsayısı
C_L / C_D	Aerodinamik Performans
D	Sürüklenme
L	Kaldırma
σ_k	Prandtl Sayısı
V	Hız
A	Yüzey Alanı
G_b	Kaldırma Kuvvetinden Dolayı Türbülans Kinetik Enerji
G_k	Hızdan dolayı Türbülans Kinetik Enerji
m/s	Hız (SI)
α	Hücum açısı
ρ	Yoğunluk
σ_k	Prandtl Sayısı
V	Hız
A	Yüzey Alanı

Kısaltmalar	Açıklamalar
CFD	Computational Fluid Dynamic
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
SST	Shear Stress Transport
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine

1. GİRİŞ

İnsanların ve toplumların varlıklarını sürdürmek için ihtiyacı olan temel gereksinimlerin başında enerji gelmektedir. Teknoloji ilerledikçe toplumların ihtiyaç duyduğu enerji gün geçtikçe artmaktadır. Hâlihazırda bu enerji ihtiyacını karşılamak üzere fosil yakıtlar, nükleer yakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynakları başta olmak üzere çeşitli kaynaklardan faydalanılmaktadır [1]. Enerji ihtiyacımızın büyük çoğunluğunu karşılayan birincil enerji kaynaklarından olan fosil yakıtlar gibi kaynakların sınırlı olması yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini çevremiz ve doğa açısından bir kez daha göstermektedir. Ayrıca yenilenebilir enerjiyi “doğal kaynaklardan elde edilebilen ve kendini sürekli yenileyebilen bir enerji kaynağı” olarak tanımlamak mümkündür. Yenilenebilir enerji kaynakları yenilenemez kaynaklara bir alternatif oluşturmaktadır ve rüzgâr enerjisi de bu alternatif enerji kaynakları arasında büyük öneme sahiptir [2].

1970’li yıllarda ortaya çıkan petrol krizinden sonra gelişmiş ülkelerde petrole bağımlılığı azaltmak için enerji kaynaklarını çeşitlendirmeye başlamışlardır ve alternatif enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Enerji ithal eden ülkeler enerjinin sürdürülebilir kullanımı adına çeşitli politika arayışları içine girmişlerdir. 2000’li yılların başında alternatif enerji kaynaklarındaki arayış hızlanmış ve çalışmalar artmıştır. Türkiye’nin 2006 yılında sahip olduğu 59 MW’lık rüzgâr enerjisi kurulu güç kapasitesi 2016 yılsonu itibarıyla 6 bin 81 MW seviyelerine gelmiştir. Bu rakamın 2002 yılında 18,9 MW olduğu ve 14 yıl içerisinde rüzgâr enerjisinde hızlı bir ilerleme gösterildiği hesaba katılarak 2023 yılı için hedeflenen rüzgâr enerjisi toplam kurulu güç kapasitesinin (20 bin MW) gerçekleştirilebileceği söylenebilir. Şekil 1.1’de yıllara sari olarak ülkemizde kurulu rüzgar enerjisi gücü yer almaktadır [3].



Şekil 1.1. Türkiye’de kurulu rüzgâr enerjisi gücü (2020, MW)

Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği 2021 Ocak raporuna göre ülkemizde kurulu rüzgâr enerjisi gücü 9.305 MW’tır. İşletmede olan santral sayısı 239 adettir. Hâlihazırda toplam gücü 1.872 MW olan 41 adet santralde inşa halindedir. Bu santrallerin devreye alınması ile kuru toplam güç 12.000 MW’a yaklaşacaktır [3].

Rüzgâr türbinleri, rüzgâr üzerinde yüklü bulunan potansiyel enerjiyi kullanarak elektrik üretmektedir. Birçok sistem/alt sistemden oluşan rüzgâr türbininin performans parametresi açısından en önemli yapı elemanından birisi kanat profilidir. Rüzgârın sahip olduğu potansiyel enerji alçak ve yüksek basınç bölgelerinde bulunan havanın hareket etmesinden kaynaklanmaktadır. Rüzgârdaki potansiyel enerjiyi elektrik enerjisine çeviren rüzgâr türbinleri dikey eksenli (HAWT) ve yatay eksenli (VAWT) olarak ikiye ayrılmaktadır [4].

Rüzgâr türbinleri başta olmak üzere kanat yapısının kullanıldığı platformlarda akışı yönetmek için çeşitli kontrol mekanizmaları geliştirilmiştir. Bu geliştirilen akış kontrol mekanizmalar sayesinde, geçiş bölgesi ötelemesi, akış ayrılmasının geciktirilmesi, kaldırma katsayısının artırılıp ve sürüklenme katsayısının azaltılması hususlarında katkı sağlamıştır.

Akış kontrol mekanizmaları aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Aktif akış kontrol yönteminde sisteme dışarıdan enerji verilmesi gerekmekte iken pasif kontrol yönteminde sisteme dışarıdan enerji verilmesine ihtiyaç duyulmamaktadır. Jet üfleme veya emme,

piezoelektrik kanatlar vb. yöntemler aktif kontrol yöntemlerindedir. Pasif akış kontrolün uygulanmasında ise; kanat üzerine eklenen tümsek veya çukur yapılar, girdap oluşturuvcu geometrilerin eklenmesi ve akış hattını değiştiren kanal yapıları gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında; pasif akış kontrol mekanizmalarından olan yüzey pürüzlülüğünün rüzgâr türbini kanat profilinde yaygın olarak kullanılan NACA 0015 üzerine etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Pürüzsüz yüzeye sahip kanat profili ile oluşturulan farklı konfigürasyonlara sahip kanat profilleri için analizler ve deneyler yapılmış olup elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Türbin kanat yapısının rüzgâr türbininin aerodinamik performansı üzerine büyük etkisi olmaktadır. Türbinin aerodinamik performansını etkileyen çeşitli parametreler bulunmaktadır. Kanat geometrisinin modifiye edilmesi ile verim üzerinde pozitif yönde katkı sağladığı görülmektedir. Bu sebepten dolayı performans olarak optimum kanat yapısını elde etmek için bu konu üzerinde birçok literatürde çalışma mevcuttur.

Laws P. ve diğerleri OpenFoam açık kaynaklı analiz programını kullanarak NACA 0018 kanadı için $5-30^\circ$ arasında değişen hücum açılarında k- ϵ türbülans modelinde çözüm elde edilmiştir. Açık kaynaklı programdan elde edilen çözüm ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırılması sonucunda analiz sonuçlarını doğrulaması sağlanmıştır [5].

Triet N. ve diğerleri yaptıkları çalışmada Ansys Fluent yazılımı ile NACA 2412 kanat profilinin analizini gerçekleştirmişlerdir. Kanat yüzeyine etkiyen kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri yardımı ile kaldırma ve sürüklenme katsayıları hesaplandı. Elde edilen sonuçlar teorik olarak hesaplanan sonuçlar ile örtüşmektedir. Triet N. ve diğerleri, NACA 2412 kanat profilinin insansız hava aracı (UAV) platformunda kullanılabileceğini belirtmektedirler [6].

Ahadi A. ve diğerleri simetrik profil olan NACA 0025 profilinin düşük Reynolds sayısında 3 boyutlu olarak analizini ve deneysel çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. K-epsilon ve Spalart-Allmaras türbülans modelleri kullanarak yapılan analizler deneysel çalışma ile doğrulanmıştır. Sınır tabaka ve türbülans bölgesinin irdelendiği bu çalışmada Reynolds sayısının artışı ile aerodinamik verimin yükseldiğini belirtmektedirler [7].

Li S. ve diğerleri yeni geliştirilen dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde kullanılacak kanat profilinin yüzey pürüzlülüğünü rüzgâr tüneline deneysel olarak incelemiştir. Statik ve dinamik yükler bakımından test edilen kanat profilinin yeni geliştirilen dikey eksenli rüzgâr türbininde kullanımının uygun olacağını belirtmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü yüksekliğinin basınç katsayısı, kaldırma katsayısı ve sürüklenme katsayısına 14° 'den yüksek hücum açılarında etkisi olduğu ifade edilmiştir. Kaldırma katsayısı stall açısından sonra pürüzlülük yüksekliğinin artması ile azalmaktadır [8].

Chen P. ve diğerkleri düşük kanat açıklığına sahip olan NACA 0003 kanat profilinin aerodinamik verimini nümerik ve deneysel açıdan kritik Reynolds sayısı 3 boyutlu akım profili için incelemiştirlerdir. Çalışmanın sonucunda kanat ucu girdabının laminar ayrılmanın gecikmesi üzerinde büyük etkisi olduğu belirtilmektedir. Yüksek kanat açıklık oranı ile düşük açıklık oranına sahip kanat profilleri karşılaştırıldığında hücum açısının artması ile laminar ayrışmanın düşük açıklık oranına sahip kanat üzerinden etkisinin yüksek olduğunu belirtmektedirler [9].

Şahin İ. ve Acır A., düşük Re sayılarında 0° ile 20° arasında, 2° hücum açısı aralıklarında NACA 0015 kanat modelinin sayısal ve deneysel olarak aerodinamik performanslarını incelemiştirlerdir. Deneysel sonuçları, rüzgâr tüneline yapılmış çalışmalardan elde edilmiş olup, ANSYS FLUENT programı kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Kanadın hücum açısı arttıkça kaldırma ve sürüklenme katsayılarının arttığı, ancak tutunma kaybının gerçekleştiği 16° 'den sonra kaldırma katsayısının dikkate değer şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Kanat modelinde en yüksek aerodinamik performans 8° hücum açısında gözlemlenmiştir [10].

Tanürün H.E. ve diğerkleri çalışmalarında farklı açıklık oranlarına sahip NACA 0018 kanat profilinin aerodinamik performansını deneysel ve sayısal olarak incelemiştirlerdir. 0 dereceden 60 dereceye kadar yapılan analiz ve deneyler yapılmıştır. Analiz sonucunda stall açılarının analiz için $32,5$ derece ve 25 derece, deneysel sonucunda ise 35 derece ve 30 derece olarak elde etmişlerdir. Kanat modelinden birincisinde deneysel çalışma sonucu elde edilen C_L değeri, sayısal çalışma sonucu ulaşılan değerden $\%0,41$ daha yüksek, ikinci modelde de C_L değeri, deneysel çalışmada sayısal yöntemden $\%2,71$ daha yüksek olarak elde edilmiştir. Hem deneysel hem de sayısal çalışma sonucunda NACA-0018 kanat modelinin iki farklı açıklık oranına sahip yapılarından birinci model yapısının aerodinamik verimi, irtifa kaybı öncesi ve sonrasında ikinci modelin kanadına göre belirgin bir avantaja sahiptir [11].

Rubel R.I. ve diğerkleri yaygın olarak kullanılmakta olan NACA 0015 ve NACA 4415 kanat profillerinin aerodinamik performans yönünden incelemiştirlerdir. Simetrik ve asimetric kanat yapılarından olan bu kanat profilleri 18° 'ye kadar olan hücum açılarında sayısal ve deneysel olarak incelenen kanat profilleri asimetric kanat yapısı olan NACA 4415 kanat profilinin aerodinamik performansının simetrik kanat yapısı olan NACA 0015'ten daha yüksek olduğunu belirtmektedirler [12].

Saad M.M.M. ve diğeri, FX 63-137, FX76-100, S835, S809, NACA63415 ve NACA63215 kanat profillerini aerodinamik performans yönünden incelemek için Fluent yazılımı kullanarak analizler gerçekleştirmişlerdir. -15° ve 15° arasındaki hücum açıları için yapılan analizlerde yüksek Re sayısına sahip akış için FX 63-137 kanat profilinin aerodinamik performans açısından optimum olduğunu belirtmektedirler [13].

Shukla V. ve Kaviti A. dikey eksenli rüzgâr türbin kanatlarından simetrik yapıda olan (NACA 0012,0015, 0018 ve 0021) modelleri üzerinde modifiye edilerek analizleri yapılmıştır. Bu modifiyeler Gurney kanatçığı ve dimple yapısının kombinasyonlarından oluşmaktadır. Elde edilen CFD sonuçlarını kaldırma katsayısı, hız ve kanat kuvveti yönünden karşılaştırmışlardır. Bu sonuçlar daha önce deneyler ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Bu analizler sonucunda bahsedilen üç parametre için en iyi sonuçları NACA 0012 ve NACA 0015 kanat yapısının verdiğini belirtmişlerdir [14].

Tanürün H.E. ve Acır A. çalışmalarında NACA 0015 kanat profilinin hücum kenarı bölgesine tüberkül yapısı ekleyerek elde edilen kanat profilleri ile düz kanat profilini aerodinamik performans, kaldırma katsayısı ve sürüklenme katsayısı yönünden sayısal olarak incelemişlerdir. Tüberkül yapıları kanat profillerinden genliği en düşük olan kanat profilinin düz kanat profilinden daha yüksek aerodinamik performans sergilediğini belirtmektedirler [15].

Kabir A. ve arkadaşları yaptıkları çalışmada NACA 0015 kanat yapısının emme yüzeyinde arka bölümüne yakın olarak basamak tasarımı ile kanadın aerodinamik performansının analizini yapmışlardır. Eklenen bu basamak ile akış hatlarının kalitesi artırılmış olup, sürüklenme katsayısının azaltılmasının olabileceği değerlendirilmiştir. Sürüklenme katsayısı ayrıca basamak derinliğinin artması ile azaldığını belirtmişlerdir [16].

Karthick.M ve Senthil Kumar. M çalışmalarında dikey eksenli rüzgâr türbini (Vertical axis wind turbine) kanatlarında kullanılan NACA 0015 kanat yapısını kaldırma ve sürüklenme katsayılarının performansı üzerine çalışılmıştır. k- ϵ türbülans modeli ile 0 dereceden 20 dereceye kadar değişen hücum açılarında sürüklenme ve kaldırma katsayısı hesaplaması yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda NACA 0015 kanadının VAWT için ideal bir kanat yapısı olduğu sonucunu yayımlamışlardır [17].

Demir H. ve diğeri NACA 4412 kanat profili için farklı kanat açıklık oranının aerodinamik performans üzerine etkilerini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. 25000 ve 50000 Re sayısına sahip akış için yapılan çalışmalar sonucunda kanat ucu hücum kenarında oluşan girdaplar deneysel çalışma ve sayısal çalışma sonucunda örtüşmektedir [18].

Mizoguchi M. ve diğeri kanat açıklık oranının kanat aerodinamik performansı üzerine olan etkilerini incelemek üzere farklı açıklık oranlarına sahip kanat modellerine düşük Reynolds sayısında rüzgar tüneline deney yapmışlardır. Hücum açısının 30 ve 40 derece arasında farklı kanat açıklık oranına göre stall açılarını elde etmiştir [19].

Matyushenko A.A. ve Garbaruk A.V. $k-\omega$ SST türbülans modelini yüksek Re sayıları için uyarlanması konusunda çalışmışlardır. $0-30^\circ$ arasında değişen hücum açılarında katsayının $a_1=0,28$ olarak alınması sonucunda aerodinamik performans olarak daha doğru tahminlerde bulunmuşlardır. Önerilen formülasyon kullanım alanı kanat profili etrafındaki akış ile sınırlandırılmıştır [20].

Eleni D. ve diğeri NACA 0012 kanat profili etrafındaki akış için türbülans modellerinin değerlendirilmesini simülasyon ortamında gerçekleştirmişlerdir. Spalart-Allmaras, $k-\epsilon$ ve $k-\omega$ SST türbülans modelleri kullanılarak analizler yapılmıştır. Eleni D. ve diğeri yaptıkları çalışma sonucunda elde edilen değerler ile literatürde yer alan değerlerin arasında küçük farklılıklar olmasına rağmen $k-\omega$ SST türbülans modelini en uygun model olarak belirtmektedirler [21].

Wang R. ve Xiao Z. İki boyutlu kanat profili etrafındaki akışın geçiş etkilerini sayısal incelemişlerdir. Sayısal çalışmada kullanılmış olan $k-\omega$ SST- γ türbülans modeli hücum kenarı yakınlarında laminar ayrılma bölgelerinin tahminini daha doğru yaptığı ve tam türbülanslı modellere göre avantajının olduğunu belirtmektedirler [22].

Chakroun W. ve diğeri yüzey pürüzlülüğünün NACA 0012 kanat profili aerodinamik performansı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Farklı boyut ve sayıdaki yüzey pürüzlülüğüne sahip kanat profillerini rüzgâr tüneline tabi tutmuşlardır. Firar kenarına yakın yüzey pürüzlülüğüne sahip olan kanat profilinin aerodinamik performansının diğlerinden daha yüksek olduğunu belirtmektedirler [23].

Salazar F. ve Barrientos A. insansız hava aracı kanadının (IHA) yüzeyinde mikro ölçeklerde oluşan pürüzlülüğün IHA'nın performansı üzerine olan etkilerini incelemiştir. Pürüzlülüğün rastgele dağılmış olduğu kanat yüzeyde pürüzlülüğün etkisini tespit edebilmek için açılmalı benek korelasyonu kullanılmıştır. Pürüzlülük sebebi ile sınır tabaka içerisinde momentum kayıplarının fazla olabileceğini belirtmektedirler [24].

Zhang Q. ve diğerleri türbin kanat yüzeyindeki pürüzlülüğün farklı Mach sayıları için geçiş akışta uniform olmayan dağılım için çalışmışlardır [25].

Wang Y. ve diğerleri dikey eksenli rüzgar türbinlerinin deforme olması durumunda kanat performansını deneysel çalışma ile incelemiştir. NACA 0012 kanat profilinin mekanizma ile modifiye edilerek kamburluğun değiştirilmesi sonucunda kritik kamburluk aşıldığında sürtünme direnci kanat aerodinamik performansını etkileyen önemli bir direnç bileşeni haline gelmektedir [26].

El-Latief M. ve diğerleri çok düşük Re sayılarında mikro hava araçları kanatları için pürüzlü yüzeye sahip kanat profilini 2 boyutlu olarak analizini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar düz kanat yapısına sahip kanat profilinin sonucu ile karşılaştırılmıştır. Oluklu kanat yapısına sahip profil hava aracının süzülme açısında düz kanat profiline göre daha yüksek kaldırma katsayısı üretmektedir [27].

Murphy J. T., ve Hu H. mikro hava araçları için paralel girinti ve çıkıntıları olan kanat yüzeyinin performansının deneysel incelemesini yapmışlardır. Düşük Re sayısında yapılan deneysel çalışmanın sonucunda Murphy J. ve Hu H. kanat yüzeyinde girinti ve çıkıntı olan profillerinin düşük Re sayılarında düz kanat profiline göre daha yüksek kaldırma katsayısı ve aerodinamik performansa sahip olduğunu bildirmişlerdir [28].

Tamai M. ve diğerleri helikoptere ilham kaynağı olan yusuçuk kuşlarının pürüzlü kanat yapısından yola çıkarak düz kanat, düz plaka ve pürüzlü yüzeye sahip olan kanat profilinin aerodinamik performansını deneysel olarak incelemiştir. Düşük Reynolds sayısına sahip akış durumunda, akışın laminar ayrılma değil de sınır tabakanın daha hızlı ayrılmasına sebep laminar tabakadan türbülanslı tabakaya daha hızlı geçiş sağlamaktadır. Bu hızlı geçiş ile düşük Re sayısına sahip akış durumunda çıkıntılı yüzeye sahip kanadın aerodinamik performansının daha iyi olduğunu yaptıkları çalışma sonunda belirtmişlerdir [29].

Rubel R. ve diğerkleri yaptıkları çalışmada NACA 0015 simetrik kanat yapısı için 0-18 dereceler arasında değişen hücum açısı ile analizler ve deneyler yapmışlardır. Yaptıkları çalışmanın amacı sayısal yöntemler ile deneysel yöntemler sonucunda elde edilen değerlerin doğrulamasıdır. Çalışmada kanat çevresinde türbülans dağılımı, basınç dağılımı ve basınç-hız kontuarları elde edilmiştir. Kaldırma ve sürüklenme katsayılarının hücum açısı arttıkça arttığını, sürüklenme katsayısının ise Reynolds sayısı arttıkça azaldığını elde etmişlerdir. Reynolds sayısının artması kaldırma katsayısına pozitif bir etki oluştursa da bir noktadan sonra azalması yönünde etki oluşturmaktadır [30].

Zhang Q. ve Ligrani P., transiyonik akışta deneysel olarak yüzey pürüzlülüğü dahil olmak üzere kanat ucu türbülansı nedeniyle kanat performansının nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Elde edilmiş olan verilerini literatür verileriyle doğrulamışlar ve kanat ucu türbülansının profilin performansının dikkate değer ölçüde yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğunu göstermişlerdir. Bu bağımlılık, kanat profilinin gelişmiş akış difüzyon bölgesi üst yüzey arka kenarının bir sonucu olduğunu belirtmişlerdir [31].

Xia Y. ve diğerkleri kanat profili üzerinde yer alan oluklu yapının özellikle kaldırma ve sürüklenme katsayılarına olan etkisini araştırmışlardır. Simetrik kanat profili olan NACA 0012 kanat profilinin düz ve oluklu yapıya sahip modellerini farklı hücum açılarında hem sayısal hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışma ile doğrulanan sayısal çalışmaları pürüzlü yüzeye sahip olan kanat profilleri kaldırma katsayısı ve sürüklenme katsayısı yönünden daha iyi olduğunu belirtmektedirler [32].

3. NACA KANAT PROFİL YAPISI VE KURAMLAR

Rüzgâr türbinleri ile havacılık ve uzay sanayii başta olmak üzere Havacılık Ulusal Danışma Komitesi (NACA) tarafından geliştirilen kanat profilleri birçok alanda kullanılmaktadır. Kanat profili yapısı kullanıldıkları alana göre çeşitlilikler oluşturmaktadır. Kanat yapısından istenen kaldırma kuvvetini elde etmek için Bernoulli prensibi [33] gereği kanadın alt ve üst yüzeyleri arasında basınç farkının oluşması gerekmektedir. Kanadın emme ve basınç yüzeyi olarak adlandırılan bu yüzeylerden akan havanın akış özelliği aerodinamik performans açısından büyük öneme sahiptir.

Akış bölgelerinde farklı hızlarda hareket eden tabakalar arasında viskozite etkisi ile sürtünme kuvveti oluşur. Bu tür akışlar viskoz akış olarak tanımlanmaktadır. Viskoz akışlarda akım hatlarının dağılımına göre düzenli hareket ediyor ise laminer akış eğer düzensiz ise türbülanslı akış [34] olarak tanımlanmaktadır.

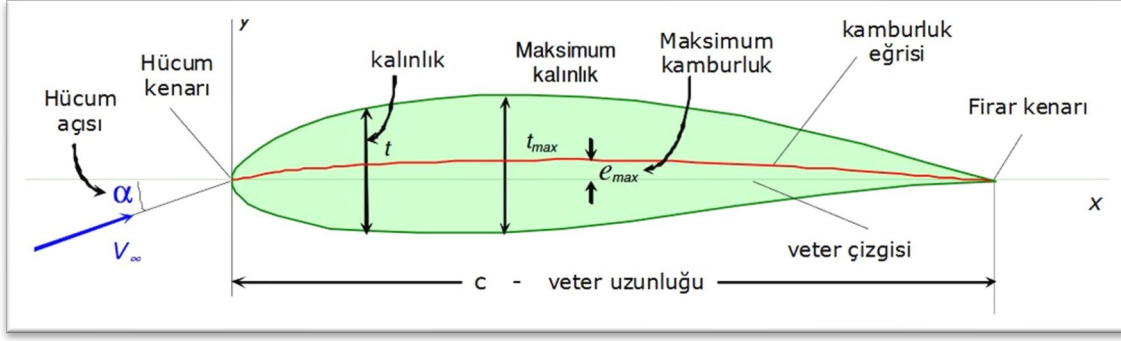
Akımın laminer mi yoksa türbülanslı mı olduğuna karar vermek için boyutsuz Reynolds sayısından (Re) faydalanılmaktadır. Eş. 3.1'de yer alan Re sayısı akış içerisindeki atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlere oranıdır.

$$Re = \frac{V \times L \times \rho}{\mu} \quad (3.1)$$

V akış hızını, L karakteristik uzunluğu, ρ akışkanın yoğunluğunu ve μ dinamik viskoziteyi ifade etmektedir.

3.1. NACA Kanat Profili ve Yapısı

Havacılık Ulusal Danışma Komitesi tarafından geliştirilen kanat profilini oluşturan temel parametreler Şekil 3.1'de [35] yer almaktadır.



Şekil 3.1. Kanat profili parametreleri

Şekil 3.1’de yer alan kanat profili geometrisini belirten ifadeler yer almaktadır. Burada yer alan c veter uzunluğu (chord uzunluğu) kanat profilinin hücum kenarı ile fırar kenarı arasındaki uzunluktur.

Hücum kenarı, kanat profilinde hava akımının geldiği ön ucu ifade etmektedir. Fırar kenarı, kanat profili çevresinden akan havanın kanadı terk ettiği noktadır.

Hücum açısı (α), havanın akış çizgisi ile kanat profilinin veter çizgisi arasında kalan açıyı ifade etmektedir. Kamburluk eğrisi veter uzunluğu boyunca kanadın yüzeyleri arasındaki orta noktaların birleştiği yerlerdir. Simetrik olmayan modeller için geçerli olup

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

olarak ifade edilmektedir.

Kalınlık, kanat profilinin alt ve üst yüzeyleri arasındaki dik mesafe olarak ifade edilmektedir.

3.2. Aerodinamik Kuvvetler

Hava araçlarında aerodinamik performansı etkileyen 4 kuvvet bulunmaktadır. Bunlar kaldırma, itme, sürüklenme ve yer çekimi kuvvetleridir. Kaldırma kuvveti (F_L), hava aracını belirli bir irtifada tutan kuvvettir. Bernoulli prensibine göre kanat yüzeyleri arasındaki basınç farkından meydana gelmektedir [36]. Sürüklenme kuvveti (F_D), kanat profilinde hava akımına karşı oluşan direnç kuvvetidir [36]. İtme, havanın sürtünme direncini yenerek ileri

yönde hareket etmesini sağlayan kuvvet. Yer çekimi, hava aracının ağırlığından dolayı yer çekiminin uyguladığı kuvvettir.

Kaldırma Kuvveti:

$$F_L = 0,5x C_L x \rho x S x V^2 \quad (3.3)$$

Sürüklenme Kuvveti:

$$F_D = 0,5x C_D x \rho x S x V^2 \quad (3.4)$$

Aerodinamik kuvvetler akışkanın yoğunluğuna, akışkanın hızına, profilin geometrisine bağlıdır. Bu bağlantıları sayısal olarak temsil etmek için boyutsuz sayılar kullanılmaktadır. Bu ifadeler kaldırma (C_L) ve sürüklenme (C_D) katsayılarıdır.

Kaldırma Katsayısı:

$$C_L = \frac{F_L}{0,5x \rho x S x V^2} \quad (3.5)$$

Sürüklenme Katsayısı:

$$C_D = \frac{F_D}{0,5x \rho x S x V^2} \quad (3.6)$$

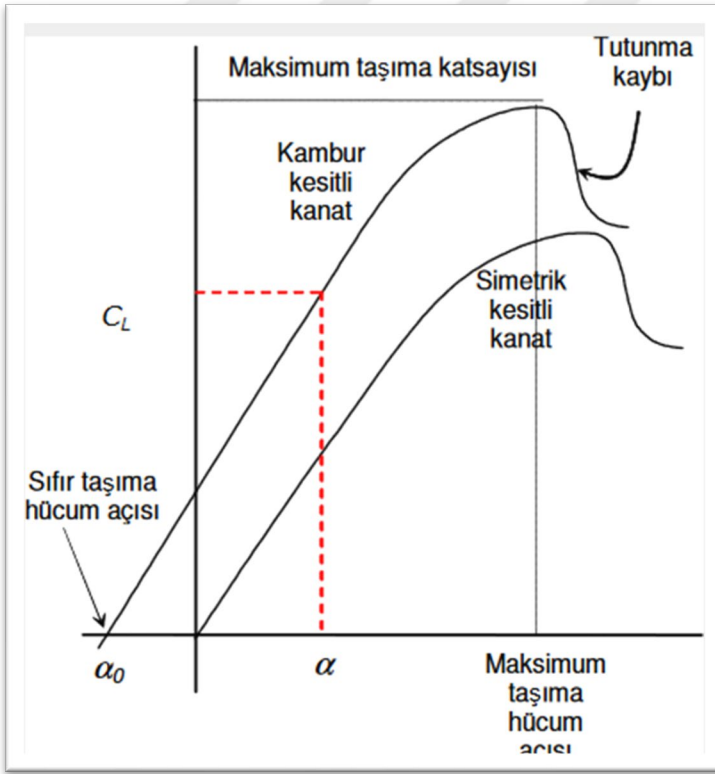
Kanat profili etrafında akan havanın basınç dağılımı aerodinamik için önemlidir. Sürekli değişen basınç dağılımını sayısal değer olarak belirtmek yerine boyutsuz katsayı ile olarak ifade edilmektedir. Bu boyutsuz katsayı basınç katsayısıdır (C_P) [37].

$$C_P = \frac{p - p_\infty}{0,5x \rho_\infty x V^2} \quad (3.7)$$

p_∞ serbest akan havanın basıncını, V_∞ havanın hızını ve ρ_∞ havanın yoğunluğunu belirtmektedir.

3.3. İrtifa Kaybı (Stall)

Hava araçları sabit irtifada seyirlerine devam edebilmesi için uçağın ağırlığına eşit bir kaldırma kuvveti tarafından dengede tutulması gerekmektedir. Hava aracını taşıyan bu kaldırma kuvveti kanat yüzeyine hava tarafından uygulanan yüzeysel kuvvetlerin bileşkesidir. Simetrik kanat profillerinde 0° hücum açısında alt ve üst yüzeyinde basınç dağılımı aynı olduğu için herhangi bir kaldırma katsayısı oluşmaz. Hücum açısı arttıkça kanat profiline bağlı olmak üzere belirli bir açıya kadar kaldırma katsayısı artmaktadır. Ancak hücum açısının artması kaldırma katsayısını sürekli arttırmamaktadır. Düşük hücum açısı ile gelen akımlarda akış ayrılması kanat profiline yakın bölgelerde meydana gelmektedir. Bununla birlikte hücum açısı arttıkça akış ayrılması kanadın hücum kenarına yakınsamakta ve belirli bir açıdan sonra üst yüzeyde meydana gelen akış ayrılmasından dolayı kaldırma üretilememektedir. Kanat üst yüzeyinde meydana gelen akış ayrılmasından dolayı irtifa kaybı (stall) meydana gelmektedir. İrtifa kaybının meydana geldiği açıya stall açısı denilmektedir.



Şekil 3.2. İrtifa kaybının C_L üzerine etkisi

Şekil 3.2 ile stall sebebi kaldırma katsayısında meydana gelen ani düşüş gösterilmektedir.

Kanadın basma yüzeyinde akış ayrılmasının meydana gelmesinden dolayı C_L değerinde ani azalma meydana gelmektedir. Stall meydana gelmesi hava araçlarında irtifa kaybına pompa, kompresör vb. gibi turbomakinalarda ise verim kaybına sebep olmaktadır.



4. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI (HAD) VE VİSKOZ AKIŞLAR

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akışkanlar mekaniği temelli mühendislik problemlerinin çözümünde sayısal yöntemler ve algoritmalar kullanılarak çözmeye yarayan akışkanlar mekaniğinin bir alt dalıdır. Bu yöntem kullanılarak çözülecek problemlerde fiziğin 3 ana temel kanunu baz alınarak çözüm elde edilir.

4.1. Korunum Denklemleri

HAD çözümlerinin temel denklemleri olan bu denklemler kapalı sistemde proses boyunca sabit kalması gereken özelliklerden meydana gelmektedir. Korunum denklemleri olarak da adlandırılan bu denklemler;

- Kütlelerin Korunumu (Süreklilik Denklemi)
- Momentumun Korunumu
- Enerjinin Korunumu

4.1.1. Kütlelerin korunumu kanunu

Korunum denklemlerinden ilki olan kütlelerin korunumunda kapalı bir sistem içerisinde proses esnasında kütlelerin sabit kalacağını belirtmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \mathbf{V} = 0 \quad (4.1)$$

Yoğunluğun değişmediği akışlar sıkıştırılamaz akış olarak tanımlanmaktadır [38].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4.2)$$

Akışını sıkıştırılamaz olması durumunda süreklilik denklemi;

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = 0 \quad (4.3)$$

olarak ifade edilmektedir.

4.1.2. Momentumun korunumu kanunu

Momentumun korunumu kanunu Newton'un ikinci olarak da bilinmektedir (Eş. 4.4). Bu kanunu bir cisme uygulanan kuvvet ve kazanacağı ivme arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Sıvı partikülüne Eş. 4.4'ün uygulanması sonucunda Eş. 4.5'te yer alan momentumun korunumu denklemini elde edilmektedir.

$$F=ma \quad (4.4)$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho g + \nabla \cdot \tau \quad (4.5)$$

g yer çekimini, ρ yoğunluğu ve stres tensorünü ifade etmektedir.

4.1.3. Enerjinin korunumu kanunu

Enerjinin korunumu termodinamiğin birinci yasası olup doğanın en temel yasalarından birisidir. Enerjinin vardan yok yoktan var edilemeyeceğini belirten bu yasada bir çevrim içerisinde çalışan sistemlerin giren ve çıkan enerji toplamının eşit olduğunu ifade etmektedir [39].

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \text{div}(k \nabla T) + \Phi \quad (4.6)$$

Φ yayılma fonksiyonu, T sıcaklık, p basınç ve k ise ısı iletim katsayısını ifade etmektedir.

4.2. Türbülans Modelleri

Viskoz akış problemlerinde akışı nümerik olarak çözümünü sağlamak için akışın fiziksel yapısına uygun olarak türetilen türbülans modelleri kullanılmaktadır. Türbülansın kesin olarak bir tarifi yapılamadığı için ampirik formüller ile modellenmesi yapılmaktadır. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) türbülans modelleri bu çalışmada incelenmiş ve en uygun olduğu değerlendirilen k - ϵ realizable türbülans modeli nümerik çözüm yapılmıştır. Spalart-Allmaras, k - ϵ Realizable, Transition SST ve k - ω SST türbülans modelleri bu çalışmada nümerik olarak en uygun türbülans modelini seçmek üzere çalışılmıştır.

4.2.1. Spalart-Allmaras (SA) türbülans modeli

Spalart-Allmaras türbülans modeli türbülanslı kinematik viskozitesinin bir bilinmeyenli transport denklemini çözmektedir[40]. Spalart-Allmaras modeli basınç gradyeni altındaki sınır tabaka akışları için daha kararlı sonuçlar vermektedir. Türbülans kinematik viskozitesi ($\tilde{\nu}$) için transport denklemi;

$$\rho \frac{D\tilde{\nu}}{Dt} = G_\nu + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \{ \mu + \rho \tilde{\nu} \} + C_{b2} \rho \left\{ \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\}^2 \right] - Y_\nu \quad (4.7)$$

G_ν türbülans viskozite üretimini, Y_ν duvardan kaynaklı viskozite kayıplarını, C_{b2} ve $\sigma_{\tilde{\nu}}$ sabit sayılar ve ν kinematik viskoziteyi ifade etmektedir.

4.2.2. k-ε realizable türbülans modeli

İki denklemlili türbülans modelleri arasında doğruluk oranı yüksek olması sebebi ile yaygın olarak kullanılan türbülans modelidir. Standart k-ε türbülans modelinin geliştirilmesi ile elde edilmiştir [41].

RNG k-ε modeli için türbülans kinetik enerji dağılım oranı (k);

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4.8)$$

ve dağılım (ε);

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (4.9)$$

olarak ifade edilmektedir.

G_k ortalama hız gradyanına bağlı olarak türbülans kinetik enerji oluşumunu, G_b türbülans kinetik enerji üretimini ifade etmektedir. σ_k ve σ_ϵ değerleri k ve ε için türbülans Prandtl sayılarıdır. C ise sabit sayıyı ifade etmektedir.

4.2.3. Transition SST türbülans modeli

Transition SST türbülans modeli $k-\omega$ SST türbülans modelinin uyarlamasıdır. Bu formülün temeli deneysel sonuçlara dayanmaktadır ve türbülanslı akış probleminin çözümünde kullanılmaktadır. Menter tarafından geliştirilen formül Reynolds sayısının düşük olduğu akışlarda kullanılabilir.

Türbülans kinetik enerji (k) denklemi;

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (4.10)$$

Spesifik Dağılıma Oranı (ω);

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega \quad (4.11)$$

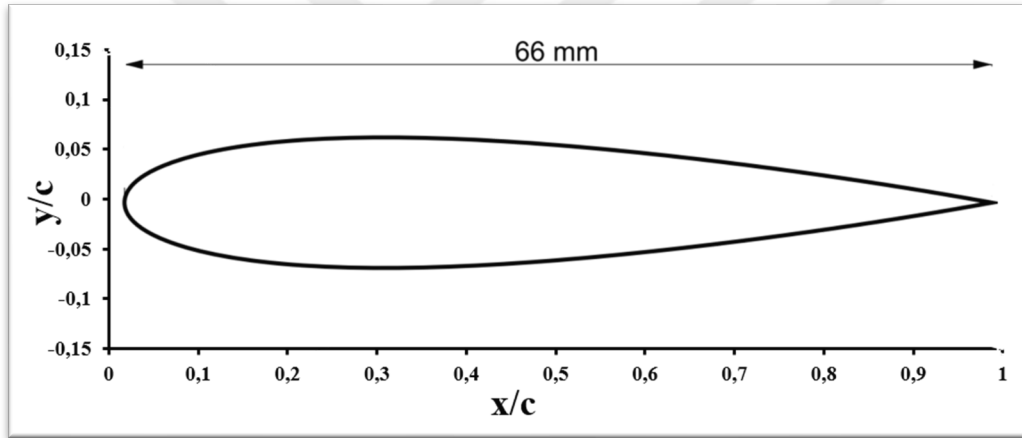
D_ω çapraz yayılma terimini ifade etmektedir

5. MATERYAL VE METHOD

5.1. Kanat Geometrisi

Yüzey pürüzlülüğünün kanat performansı üzerine etkisini daha iyi açıklayabilmek için rüzgâr türbinleri ve insansız hava araçlarında da çoğunlukla kullanılan, simetrik kanat modeli olan NACA 0015 modeli tercih edilmiştir.

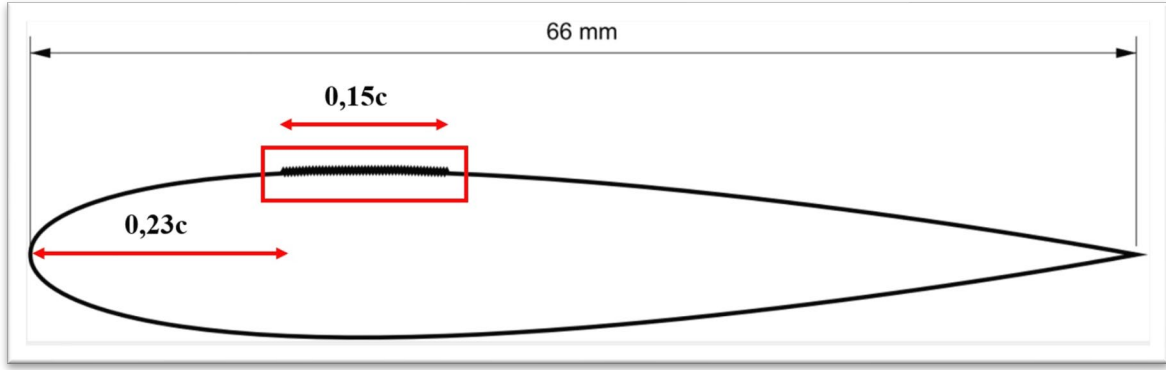
Veter çizgisinin alt ve üst yüzeye olan uzaklıklarının eşit olması sebebi ile simetrik kanat olarak tanımlanmaktadır. NACA 0015 kanat profilinin kamburluk oranı 0 ve kalınlığı %15'tir. Koordinatları "NACA 4 digit blade generator" [42] aracılığı ile elde edilen NACA 0015 kanadının 2 boyutlu tasarımı Rhinoceros tasarım programı kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 5.1. K_0 profili şematik görünümü

Şekil 5.1'de düz kanat profilinin veteruzunluğu 66 mm olarak belirlenmiştir. Çalışmamızın amacı olan pürüzlü yüzeyler düz kanat profiline (K_0) eklenmiştir.

Üst yüzeyinde bir tane pürüzlü yüzeye sahip olan kanat (K_1)'nin pürüzlülüğünün boyu 0,15c (10 mm) olup hücum kenarında olan uzaklığı 0,23c (15 mm)'dir. K_1 profili Şekil 5.2. ve Şekil 5.3.'te yer almaktadır.

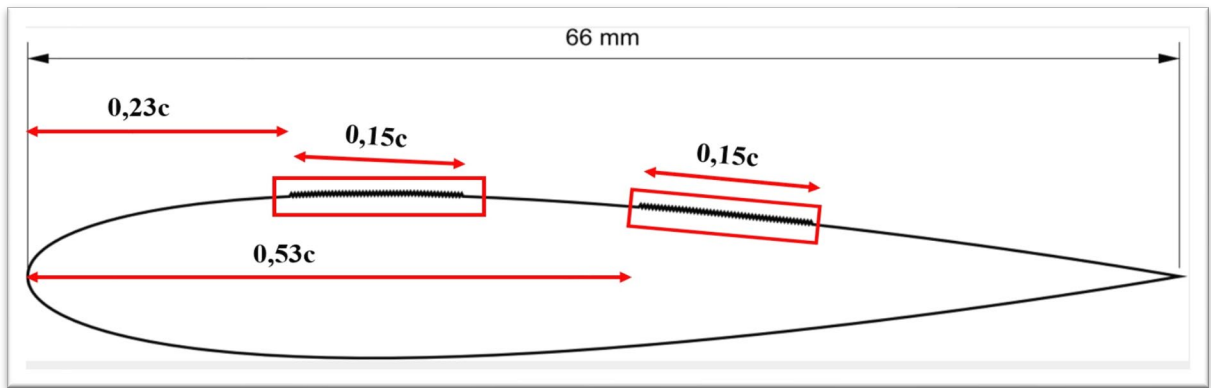


Şekil 5.2. K₁ kanat profili



Şekil 5.3. K₁ kanat profili pürüzlü yüzey yapısı

Üst yüzeyinde 2 adet pürüzlü yüzey bulunan kanat profilinde pürüzlülükler boyu K₁ profilinde olduğu gibi 0,15c (10 mm)'dir. Üst yüzey üzerinde yerleşimleri ise, birinci pürüzlülük hücum kenarından 0,23c (15 mm) ikinci pürüzlülük ise 0,53c (35 mm) uzaklıkta yer almaktadır. K₂ profili Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te yer almaktadır.



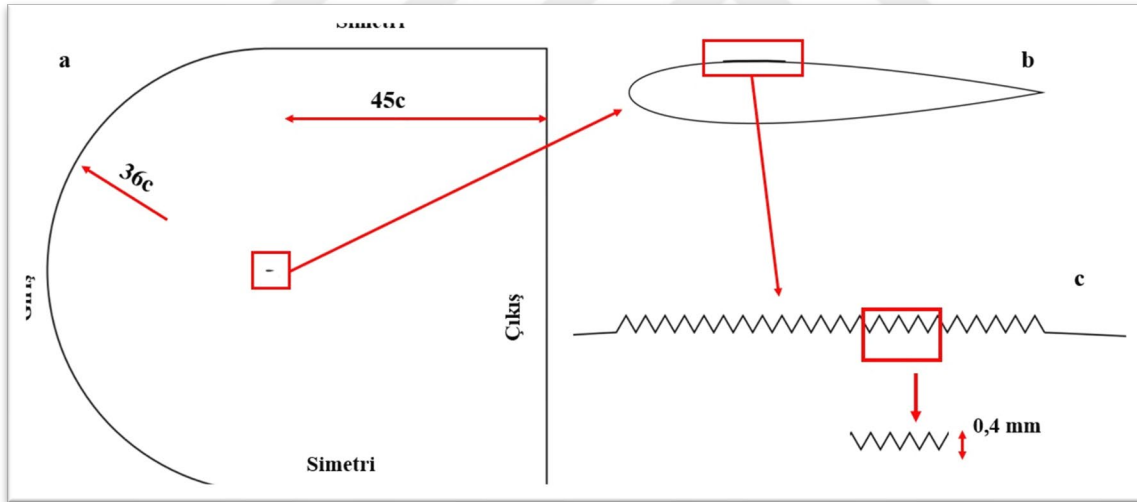
Şekil 5.4. K₂ kanat profili şematik gösterimi



Şekil 5.5. K₂ Kanat profili pürüzlü yüzey yapısı

Kanat profilinin oluşturulmasını müteakip Ansys-Fluent programında çözümün yapılabilmesi için hesaplama ağının oluşturulması gerekmektedir. Hesaplama ağının gereğinden çok fazla büyük olması durumunda yüksek özellikte çözücü bilgisayar gerekeceği için ve küçük olması durumunda ise akış karakteristiğini değiştireceği için optimum alanın seçilmesi büyük öneme haizdir. Yapılan analizlerde daha doğru sonuçlar verdiği için akademik çalışmalarda da kullanılan C-tipi hesaplama alanı kullanılmıştır.

C tipi hesaplama alanı kullanılmasının en önemli sebeplerinden bir diğeri de hız vektörünün yönünü ayarlamak için tercih edilmiştir [43].

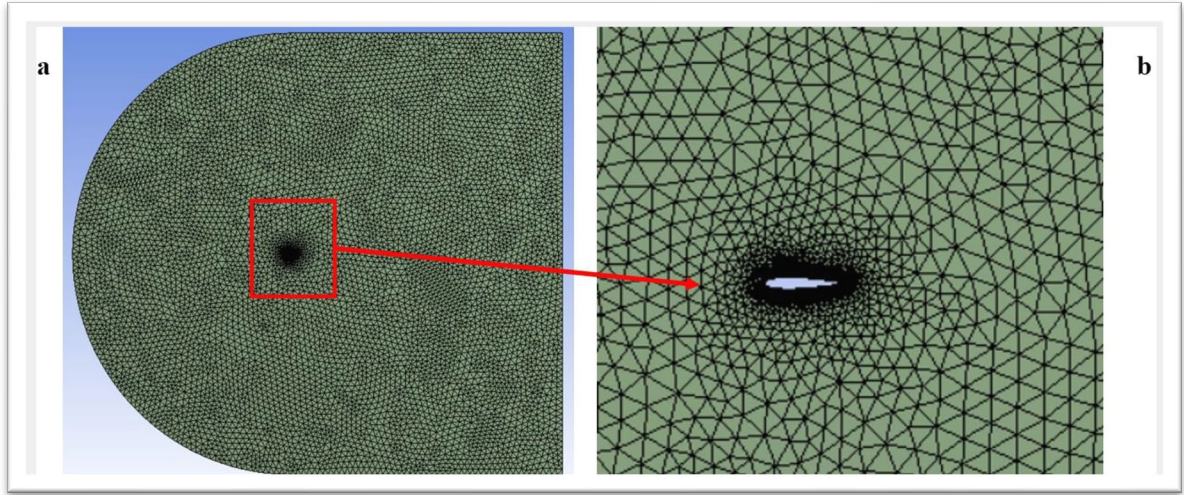


Şekil 5.6. a) C Tipi hesaplama alanı, b) K₁ kanat profili ve c) Pürüzlü yüzey özellikleri

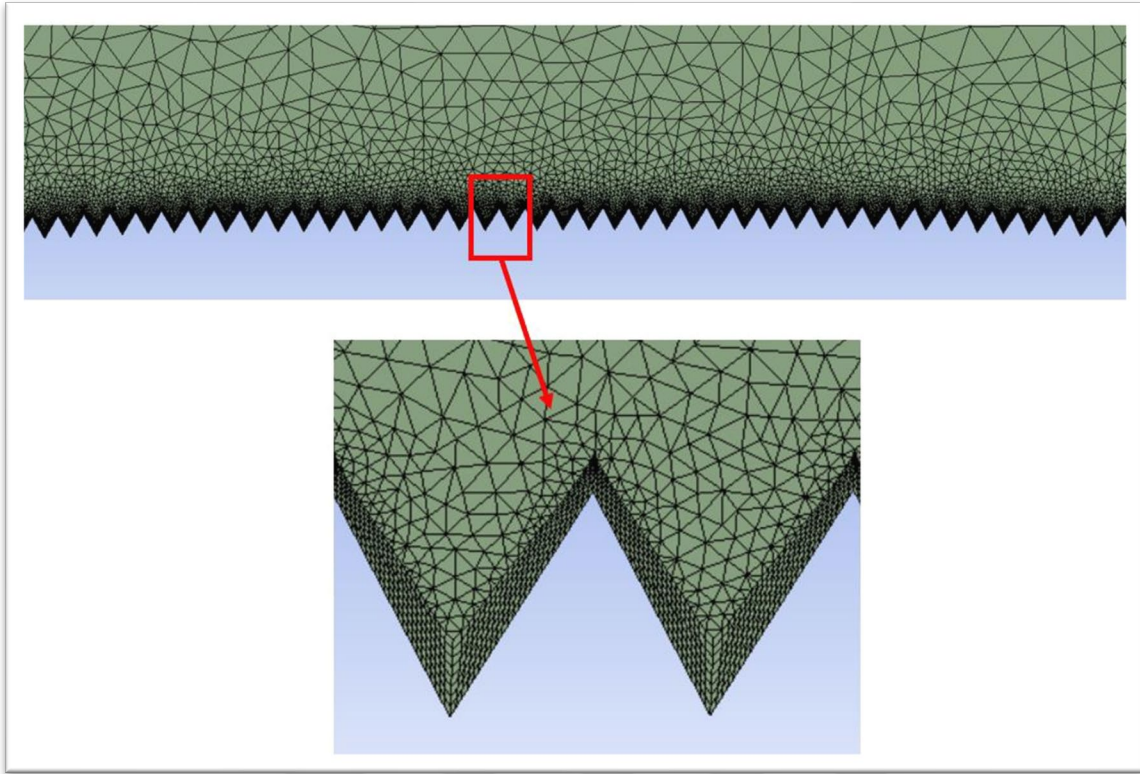
Optimum hesaplama alanının oluşturulmasında sonra sayısal çözümün yapılabilmesi için çözüm ağlarının (Mesh) oluşturulması gerekmektedir. Oluşturulan bu mesh yapısı analizlerin sonucuna doğrudan etki etmektedir.

5.2. Çözüm Ağ Yapısı (Mesh) ve Bağımsızlık

Ansys Fluent programını kullanarak akış analizi yapmak için akış alanının nümerik çözümler için alt parçalara bölünmesi gerekmektedir. Ağ yapısının kalitesi nümerik çözümün doğruluk payı üzerine büyük etkisi olmaktadır. Kanat profili etrafındaki viskoz akış bölgelerinde sınır tabaka koşulları geçerli olacağı bu bölgedeki mesh kalitesi ne kadar yüksek olursa doğruluk da o seviyede yüksek olmaktadır. Bu sebepten dolayı kanat etrafındaki çözüm ağını Fluent programının “inflation” aracı kullanılarak oluşturulmuştur. Hesaplama alanında “Üçgen Tipi Mesh” metodu kullanılarak alt çözüm alanları elde edilmiştir. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de ağ yapısı yer almaktadır.



Şekil 5.7. a) Ağ yapısı ve b) Detay görünüm



Şekil 5.8. Pürüzlü yüzey etrafındaki ağ yapısı

Mesh oluşturma işlemi yapılırken pürüzlülük olan bölgelerde inflation uygulanarak bu bölgelerdeki sınır tabaka probleminin hassas olarak elde edilmesi hedeflenmiştir. Şekil 5.8'de pürüzlü yapı etrafında inflation ile oluşturulan ağ yapısı yer almaktadır.

5.3. Ağ Bağımsızlık Çalışması

Ağ yapısı oluşturulduktan sonra ağ yapısının kalitesi kontrol edilmelidir. Ağ yapısının doğru sonuç vermesi için incelenmesi gereken parametreler; çarpıklık (skewness), ortogonal kalite (orthogonal quality), eleman kalitesi (eleman quality) ve eleman sayısı vb. olarak belirtilmektedir [15]. 2 boyutlu analizler için en önemli parametrelerden olan çarpıklık değeri 0 ile 1 arasındadır. Çarpıklık değeri ne kadar sıfıra yakın ise mesh kalitesi o kadar yüksek olmaktadır. Çarpıklık değerinin 1 veya 1'e yakın olması durumunda ise oluşturulan ağ yapısının çözüm için uygun olmadığını belirtmektedir. Ortogonal ve eleman kalitesi değerleri 0 ile 1 arasında yer almaktadır. Ortogonal ve eleman kalitesi değerlerinin 1'e yakın olması mesh kalitesinin yüksek, 0'a yakın olması ise düşük olduğunu göstermektedir. Çizelge 5.1'de oluşturulan ağ yapısına ait parametreler yer almaktadır.

Çizelge 5.1. Ağ yapısı kalite değerleri

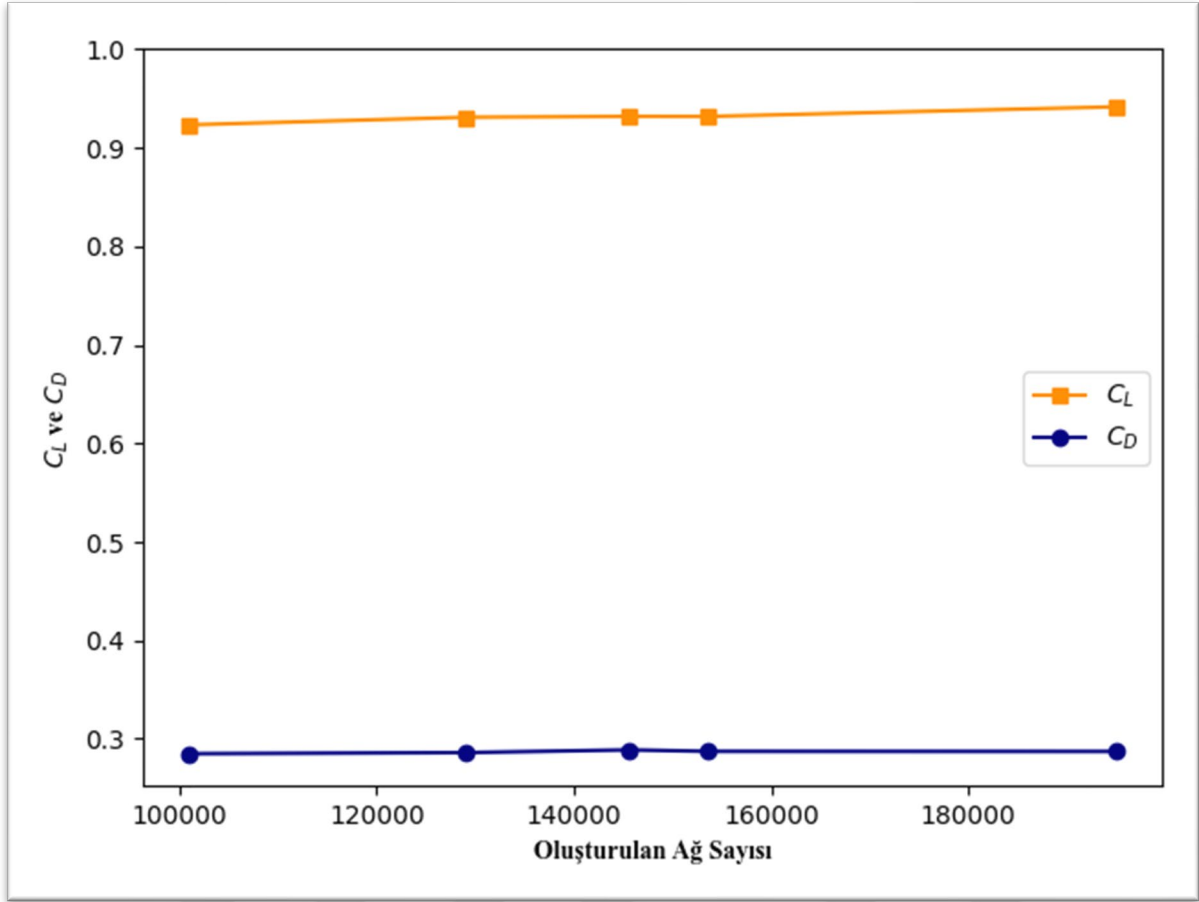
Ağ Yapısı Kalitesi	Eleman	Element Kalitesi	Ortogonal Kalite	Çarpıklık
Düz Kanat Profili (K_0)	128986	0,9332	0,9738	4,32E-02
Tek Pürüzlü Yüzeye Sahip Profil (K_1)	219000	0,9710	0,9734	4,32E-02
Çift Pürüzlü Yüzeye Sahip Profil (K_2)	296000	0,9704	0,9728	4,43E-02

Ağ yapısının kalitesinin yanında sayısal çözüm mesh sayısından bağımsız olması gerekmektedir. Ağ yapısı sayısının değişmesinin çalışmanın sonucunu değiştirmemesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı çeşitli sayılarda ağ oluşturularak optimum olan mesh sayısı oluşturularak analizler yapılmaktadır.

Çalışmamızda düz kanat profili için $17,5^\circ$ hücum açısında 100946, 128986, 145626, 153484 ve 194978 sayılarında ağ yapısı oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilene kaldırma (C_L) ve sürüklenme (C_D) katsayıları Çizelge 5.2’de yer almaktadır. Sonuçlar arasında %0,1 oranında hata farkı bulunmaktadır ve bu değer göz ardı edilebilmektedir.

Çizelge 5.2. Ağ yapısı sayısından bağımsızlık

	C_L	C_D	Element Sayısı
Düz Kanat Profili (K_0)	0,9234	0,2848	100946
	0,9311	0,2859	128986
	0,9320	0,2887	145626
	0,9319	0,2872	153484
	0,9417	0,2871	194978



Şekil 5.9. C_L ve C_D değerlerinin ağ sayısına göre değişimi

Şekil 5.9'da C_L ve C_D değerlerinin ağ yapısı sayısına göre değişimi belirtilmektedir. Ağ sayısından bağımsızlığın sağlanması ile analizde kullanılacak türbülans modeli belirlenmelidir. Doğruluk hassasiyetinin yüksek olması için $k-\epsilon$, Spalart-Allmaras, $k-\omega$ SST ve SST Transition türbülans modelleri ile analizler yapılmıştır. Yapılan analizler ve deneysel çalışma sonucunda $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır.

6. SAYISAL VE DENEYSEL ÇALIŞMA

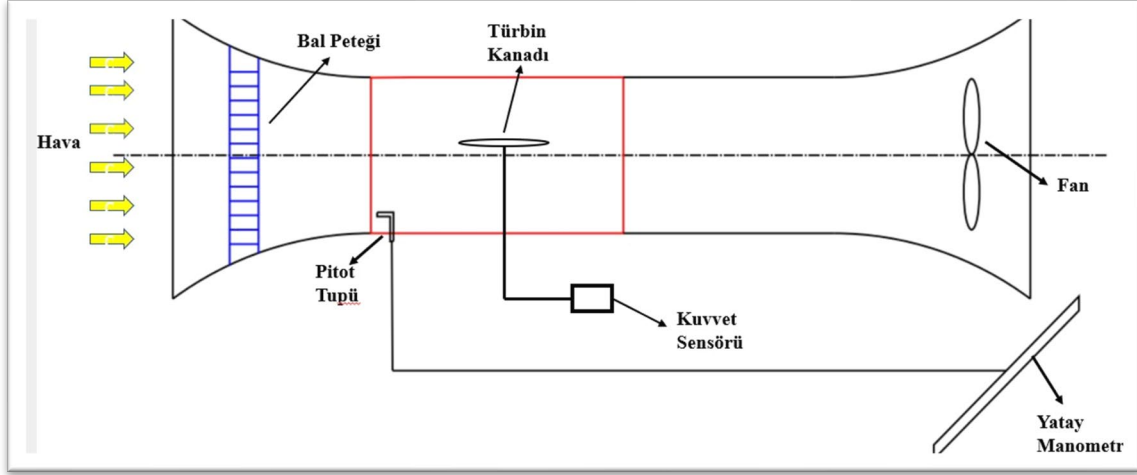
6.1. Rüzgâr Tüneli Deneyi

Sayısal olarak yapılan çalışmaların deneysel çalışma ile desteklenmesi çalışmanın doğrulu açısından büyük öneme haizdir. Ticari yazılımlar kullanılarak yapılacak olan sayısal çalışmadan önce oluşturulan kanat modellerinin 3 boyutlu yazıcıdan elde edilen modeller ile rüzgâr tüneli deneyi $0-35^\circ$ arasında $2,5^\circ$ 'lik hücum açısı aralık ile deneysel çalışma yürütülmüştür.

6.1.1. Deney düzeneği oluşturulması

Bu çalışmada NACA 0015 kanat profilinin düz ve pürüzlü yüzeye sahip kanat modellerinin C_L , C_D ve aerodinamik verim yönünden Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölüm laboratuvarında yer alan HM-170 GUNT model açık tip rüzgâr tüneli ile deneysel çalışma yürütülmüştür. Şekil 6.1'de laboratuvarında kurulu olan rüzgâr tünelinin şematik gösterimi yer almaktadır.

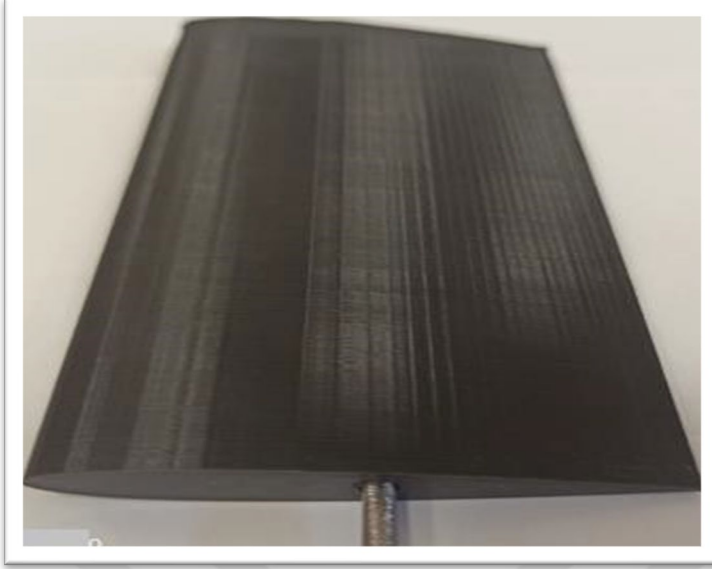
Test düzeneği giriş nozulu, test bölümü ve difüzer olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde yer alan bal peteği yapısı ile akışın test bölümüne kadar uniform ve düşük türbülans ile ulaşmasını sağlamaktır. Ölçümler, uzunluğu 0,4 m ve kesit alanı 0,3 x 0,3 m olan test bölümünde yapılmaktadır. Basınç ve hız parametreleri deney düzeneğinde bulunan Pitot tüpü ve eğimli manometreden alınmıştır. Serbest havanın akış hızı 0,1 m/s ayar adımı ile ayarlanabilmekte olup maksimum hız 28 m/s'dir. Test bölümünde model kanat yer almaktadır. Bir rod vasıtası ile kontrol edilmekte olan kanat modeli $2,5^\circ$ 'lik hücum açısı adımı ile ayarlanabilmektedir. $0^\circ-90^\circ$ arasındaki hücum açılarında deney yapılabilir.



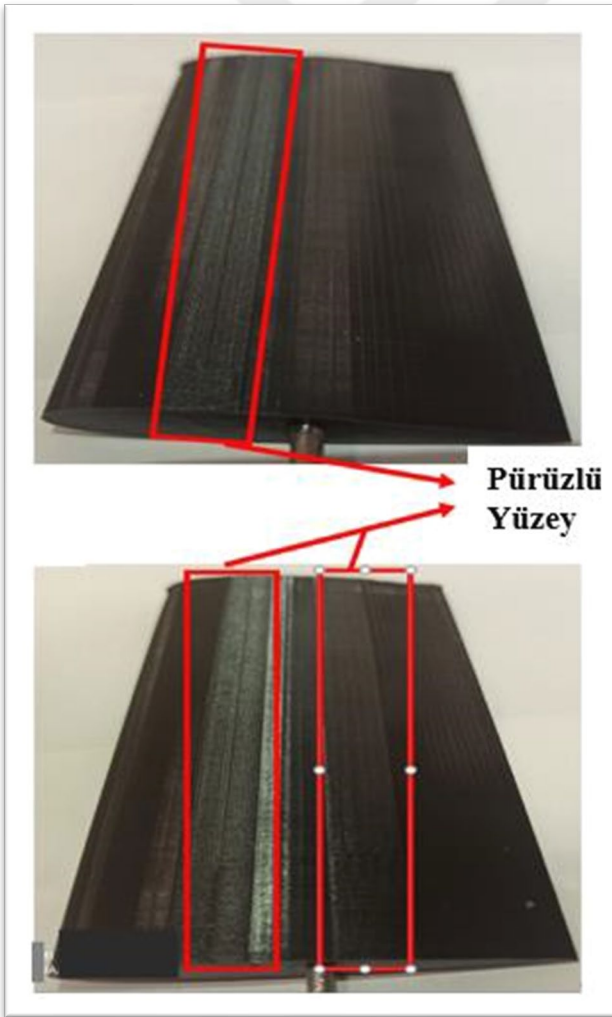
Şekil 6.1. Rüzgâr tüneli şematik görünüm

Rüzgâr tünelinin açık kesit bölgelerinde yan duvarların yer alması uniform akışın bozulmasına ve deneyde hata oranı yüksek sonuçlar elde edilmesine sebep olabilmektedir. Uniform akışın bozulmadan kanada ulaşması için tanımlanmış olan blokaj oranı kanat yüzey alanının rüzgâr tünelinin kesit alanına oranı olarak tanımlanmaktadır [45]. Literatürde yer alan birçok çalışmada bu oranın %20 aşağısında olması durumunda uygun olarak tanımlanmaktadır. Bizim çalışmamızın blokaj oranı ise %8,9 olup literatür ile örtüşmektedir [46].

Rüzgâr tüneli testlerinde kullanılacak olan kanat profilleri ULTIMAKER 3 boyutlu yazıcı kullanılarak elde edilmiştir. Model olarak çeşitli malzemeler kullanılmakla beraber düz kanatta yüzey pürüzlülüğü minimum seviyede tutmak için düşük seviye malzeme pürüzlülüğüne sahip olan CPA+ tipi filament kullanılmıştır.



Şekil 6.2. Pürüzsüz yüzeye sahip kanat yapısının 3 boyutlu yazıcıdan alınan model

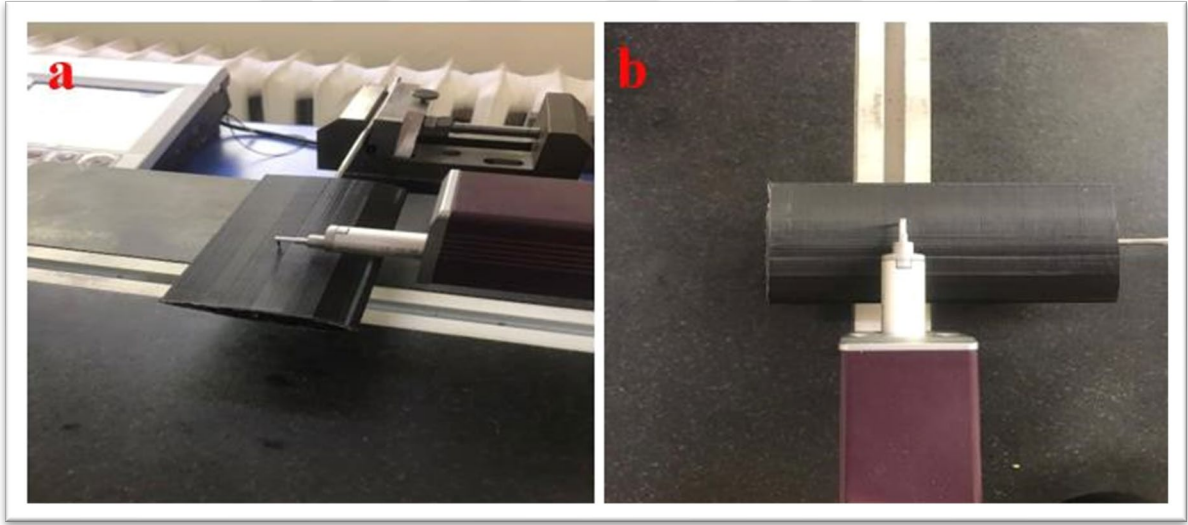


Şekil 6.3. Pürüzlü yüzeylere sahip kanat profillerinin modelleri

Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te 3 boyutlu yazıcıdan elde edilen kanat profilleri yer almaktadır. 3 boyutlu yazıcı vasıtası ile elde edilen kanat profilleri Mitutoyo J-412 90 ° / 5 µm yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. K₀ ve K₂ kanat profillerinin aynı bölgelerinden üçer defa alınan değerler ile ortalama değer elde edilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları Çizelge 6.1'de yer almaktadır. Ayrıca Mitutoyo ölçüm cihazı ile yapılan ölçümlere ait görüntüler Şekil 6.4'te yer almaktadır.

Çizelge 6.1. Pürüzlülük değerleri ölçüm sonuçları

	1.Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	Ortalama
K ₀ (µm)	1,061	0,903	1,224	1,062
K ₂ (µm)	6,122	6,665	6,267	



Şekil 6.4. Pürüzlülük ölçümü a) izometrik b) Üstten görünüm

6.1.2. Deneysel belirsizlik

Deneysel çalışmalarda her zaman belirli seviyelerde belirsizlik gerçekleşmektedir. Çeşitli sebepler bulunmakla beraber bu belirsizliğin sebepleri; kullanılan cihazların, malzemelerin ve aletlerin hata oranlarıdır. Cihazlara ait belirsizlikler Çizelge 6.2'de yer almaktadır.

Çizelge 6.2. Ölçüm cihazlarının belirsizlikleri

Ölçüm Cihazı	Belirsizlik
Kumpas	$\pm 2 \times 10^{-5}$ m
Anemometre	$\pm 0,10$ m/s
Manometre (Pitot tube)	$\pm 0,015$ Pa
Kuvvet Ölçer (Load cell)	$\pm 0,014$ N
Pürüzlülük Ölçer (roughness tester)	$\pm 0,01$ (μ m)

Çizelge 6.3. Hesaplamalar için maksimum belirsizlikler

Hesap	Belirsizlik
Kaldırma Katsayısı (C_L)	$\pm 0,036$
Sürüklenme Katsayısı (C_D)	$\pm 0,031$

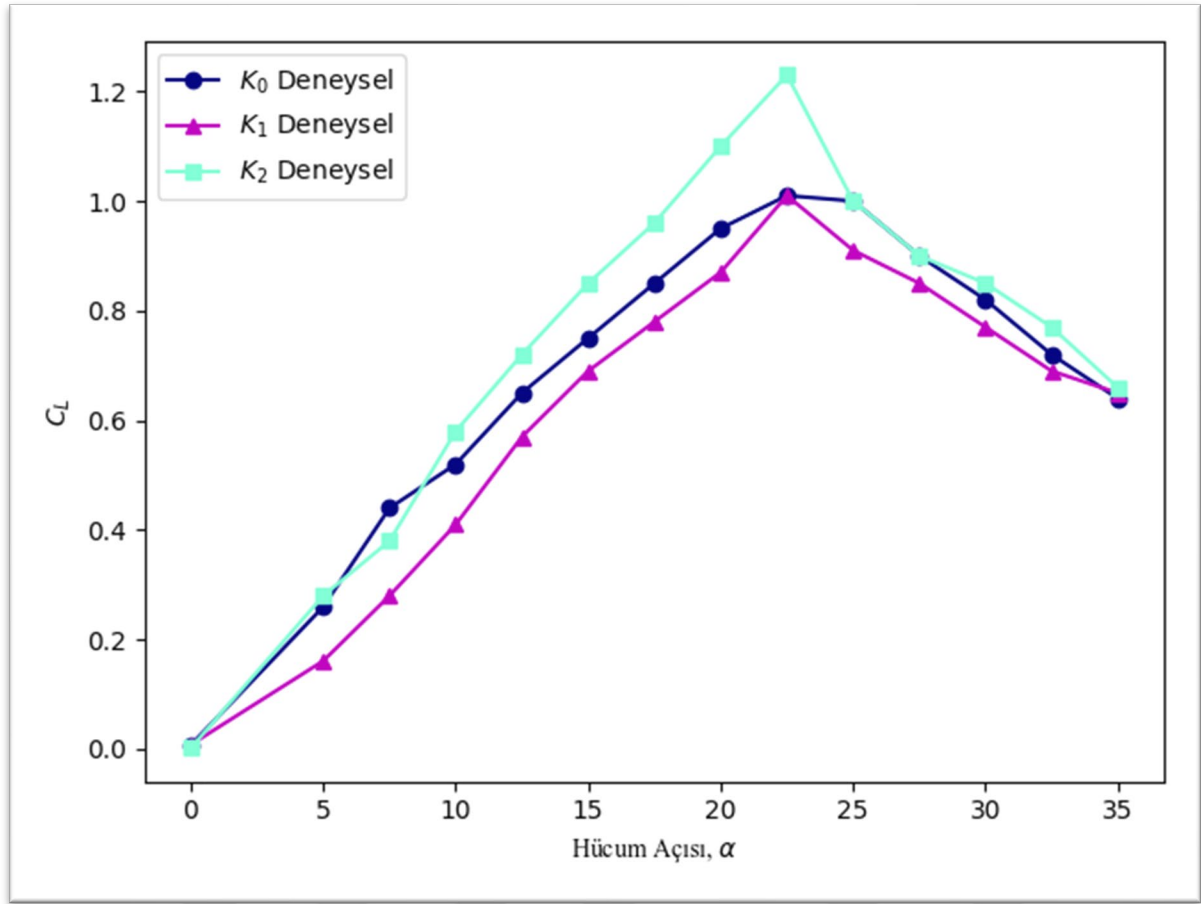
$$R = R(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (6.1)$$

$$W_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_N} w_N\right)^2} \quad (6.2)$$

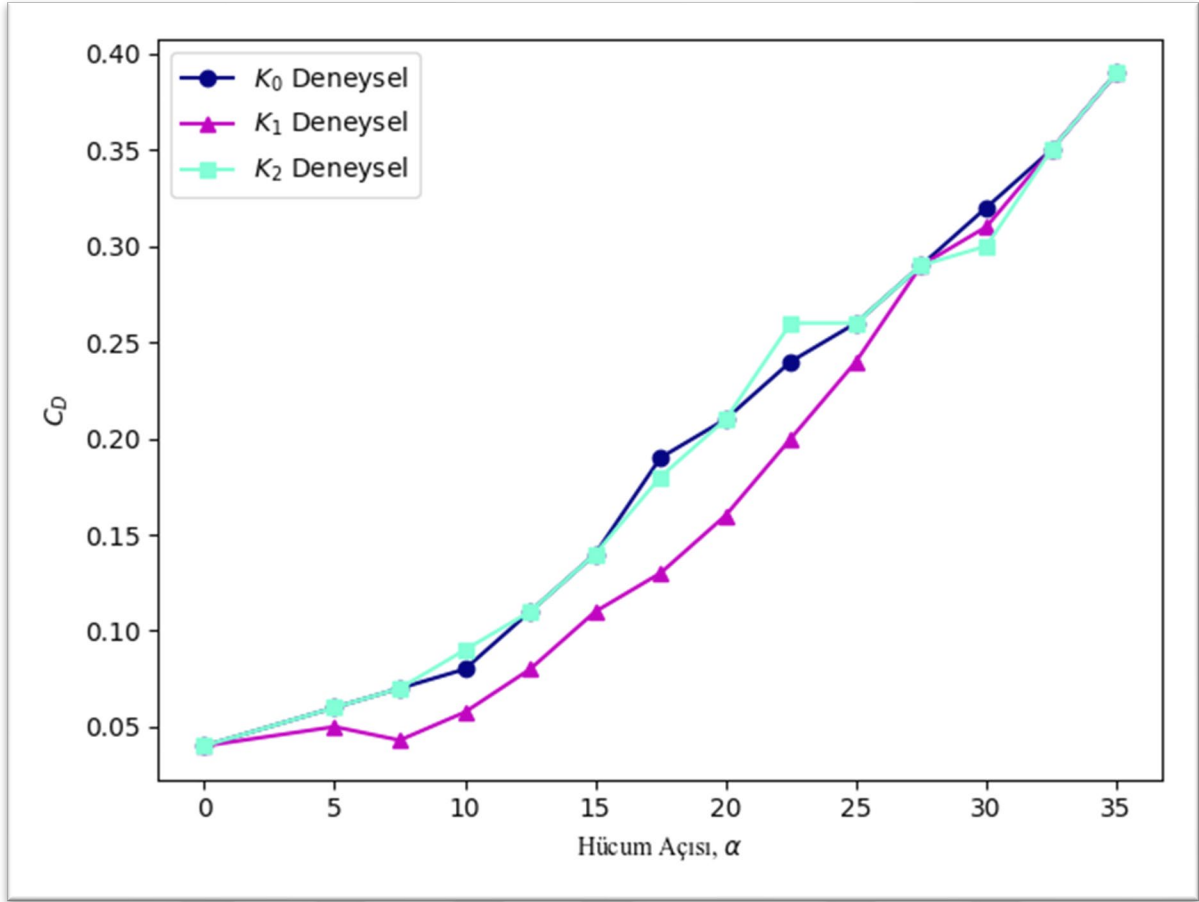
Deney düzeneğinde yer alan sistem/cihazların Tablo 6.2’de yer alan belirsizlik değerleri ile Eş. 6.1 ve Eş. 6.2 yardımı ile Kline ve McClintock methodu [47] kullanılarak hesaplanan kaldırma ve sürüklenme katsayılarına ait belirsizlik değerleri Tablo 6.3’te yer almaktadır.

6.1.3. Deney çalışması

Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği rüzgâr tüneli deney laboratuvarında icra edilen deney sonuçlarına ait C_L ve C_D grafikleri Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da yer almaktadır.



Şekil 6.5. K_0 , K_1 ve K_2 profilleri deneysel çalışmaya göre C_L yönünden karşılaştırılması



Şekil 6.6. K_0 , K_1 ve K_2 profilleri deneysel çalışmaya göre C_D yönünden karşılaştırılması

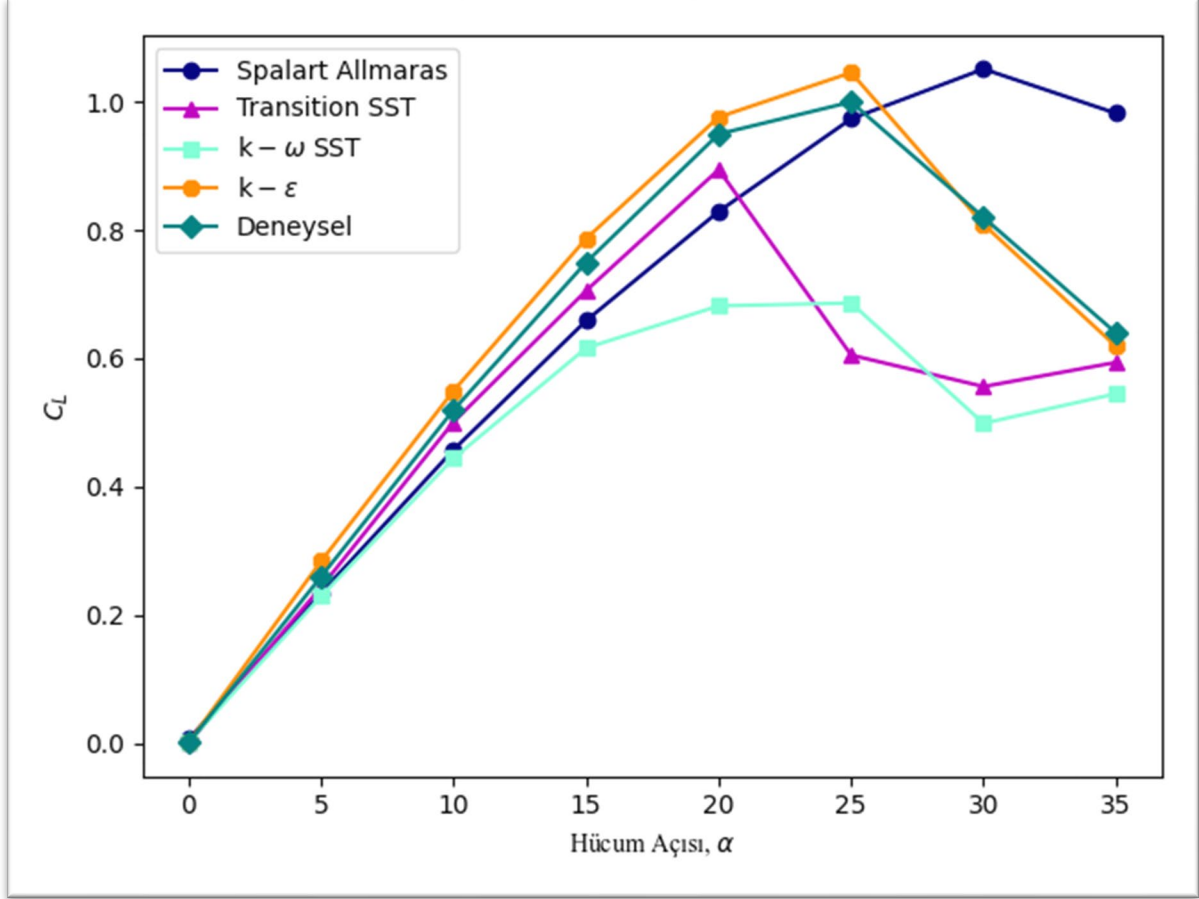
Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da rüzgar tüneli deneyinden elde edilen C_L ve C_D sonuçlarının grafiği yer almaktadır. İrtifa kaybı deneysel çalışmada K_1 ve K_2 kanatları için $22,5^\circ$ hücüm açısında gerçekleşmiştir. K_0 kanat profili için ise bu açı 25° dir.

6.2. Farklı Türbülans Modeli Çalışmaları

Şekil 6.7'de 4 farklı türbülans modeli ve deneysel çalışmanın C_L - α grafiği yer almaktadır. 5° 'ye kadar olan hücüm açılarında modeller ve deney sonucu arasında belirgin bir farklılık görünmemektedir. Bununla birlikte kanat yüzeylerinde oluşan türbülans nedeniyle çözüm hassasiyetinin değişmesi sonucunda 5° hücüm açısı sonrası türbülans modelleri sonuçları arasındaki grafikte farklılıklar görülmektedir. Bu açıdan sonra deney sonuçları k - ϵ ve SST Transition modelleri ile benzer ivme yakalamasına rağmen Spalart-Allmaras ve k - ω SST türbülans modeli ile farklılıklar göstermektedir.

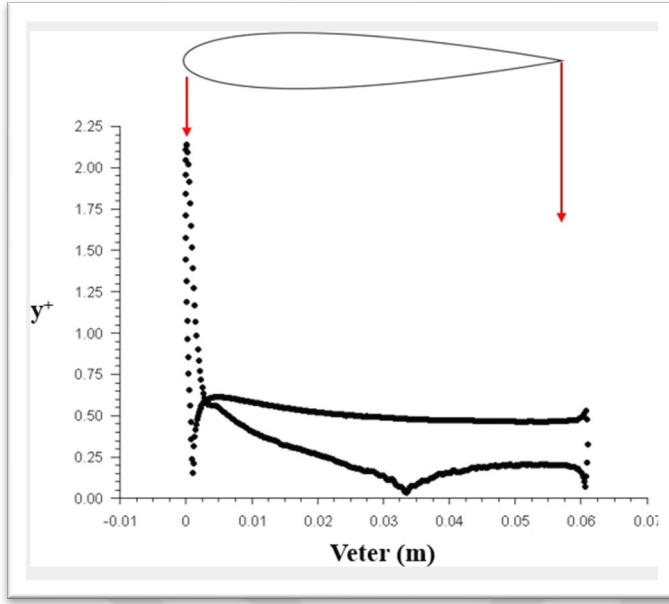
Hücüm açısının artması ile beraber kanat yüzeyinin geniş bölgesinde oluşan girdaplardan

dolayı diğer türbülans modelleri ile deneysel sonuçlar arasında farklılıklar meydana gelmektedir. Deneysel çalışma ile en fazla örtüşen model olan k- ϵ türbülans modeli çalışmamızda kullanılmıştır.

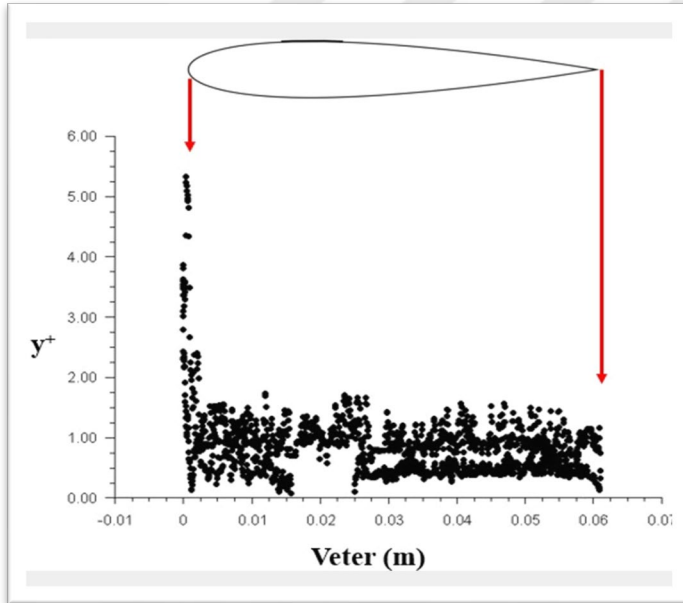


Şekil 6.7. Farklı türbülans modellerinin karşılaştırılması

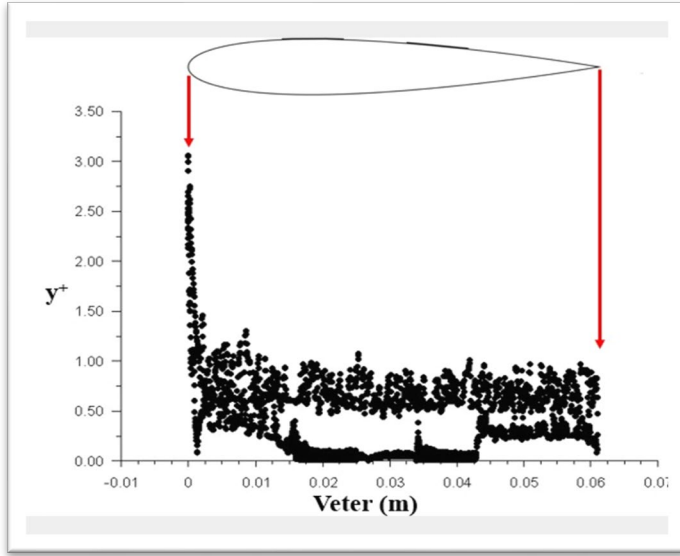
Viskoz kuvvetlerin etken olduğu kanat profiline yakın bölgelerde sonucu daha doğru elde edebilmek için Fluent'in inflation özelliğini kullandık. Duvar kenarlarında viskoz kuvvetlerden dolayı büyük gradyenler oluşmakta ve sonucu büyük ölçüde etkilemektedir. Boyutsuz bir katsayı olan y^+ ile tanımlanan bu sınır tabaka kalınlığı dış akış için $0 < y^+ < 5$ [44] aralığında olması beklenmektedir.



Şekil 6.8. K₀ kanadı y⁺ değeri



Şekil 6.9. K₁ kanadı y⁺ değeri



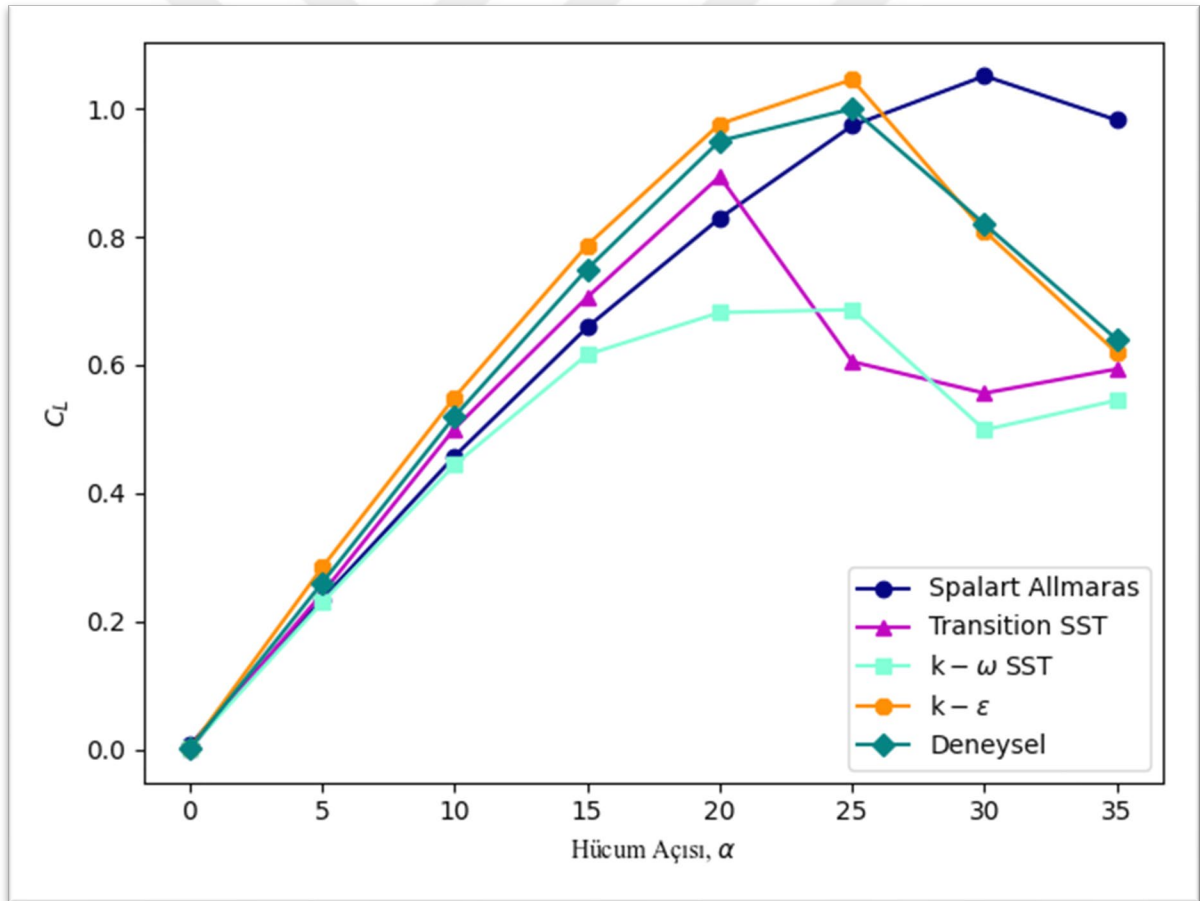
Şekil 6.10. K₂ kanadı y⁺ değerleri

Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da üç kanat profiline de ait y⁺ grafikleri yer almaktadır. Hücüm kenarında y⁺ değerinin yüksek olmasının sebebi bu bölgede düz akışın kanat profili ile karşılaşp girdap oluşturmasıdır. Kanat profili boyunca y⁺ istenen aralıkta yer almaktadır.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

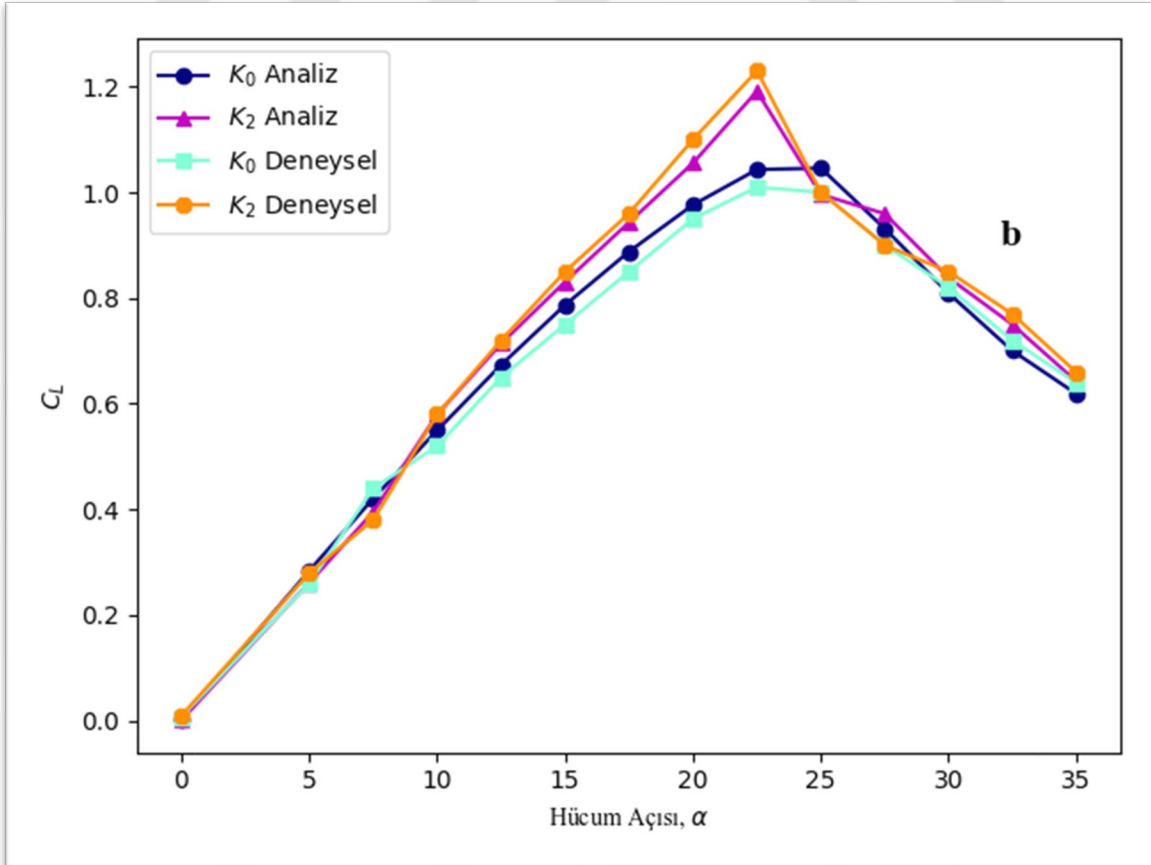
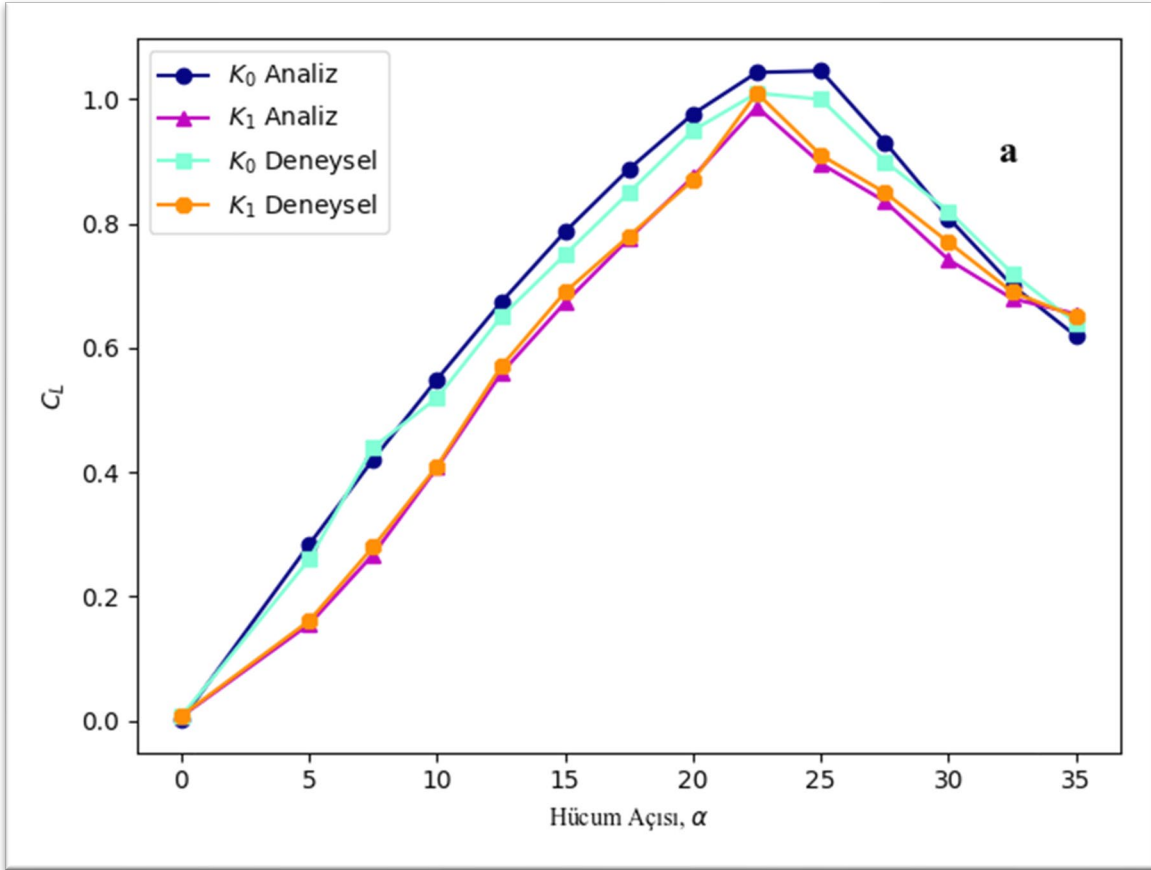
Bu çalışmanın amacı pasif akış kontrollü NACA 0015 rüzgâr türbini kanat profilinin sayısal ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda kaldırma (C_L) katsayısı, sürüklenme (C_D) katsayısı, aerodinamik verim (C_L/C_D) ve basınç dağılımı değerleri yönünden incelenmiştir. Oluşturulan pürüzlülükler hücum kenarından 0,23c ve 0,53c uzaklıkta yer almaktadır.

Sayısal çözümde en uygun türbülans modelini seçmek için 4 farklı türbülans modeli ile analizler yapılmıştır. C_L & α grafiği Şekil 7.1’de yer alan türbülans modelleri ve deneysel çalışmanın ardından en uygun model olan k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır.

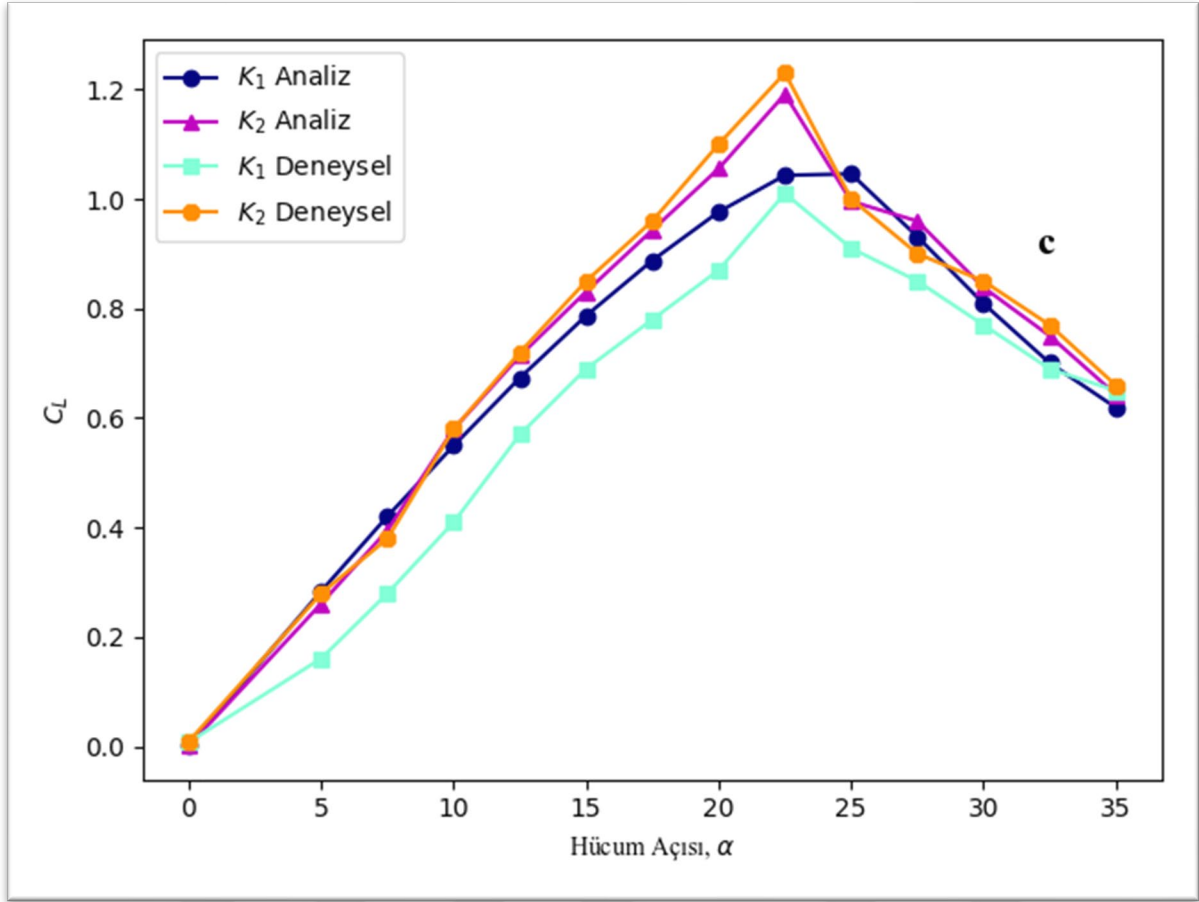


Şekil 7.1. Farklı türbülans modelleri ve deneysel çalışmanın C_L karşılaştırılması

0-35° arasında değişen hücum açıları için yapılan analiz ve deneysel çalışmanın sonucunda 3 farklı kanat modeli için elde edilen C_L grafiği Şekil 7.2’de yer almaktadır.

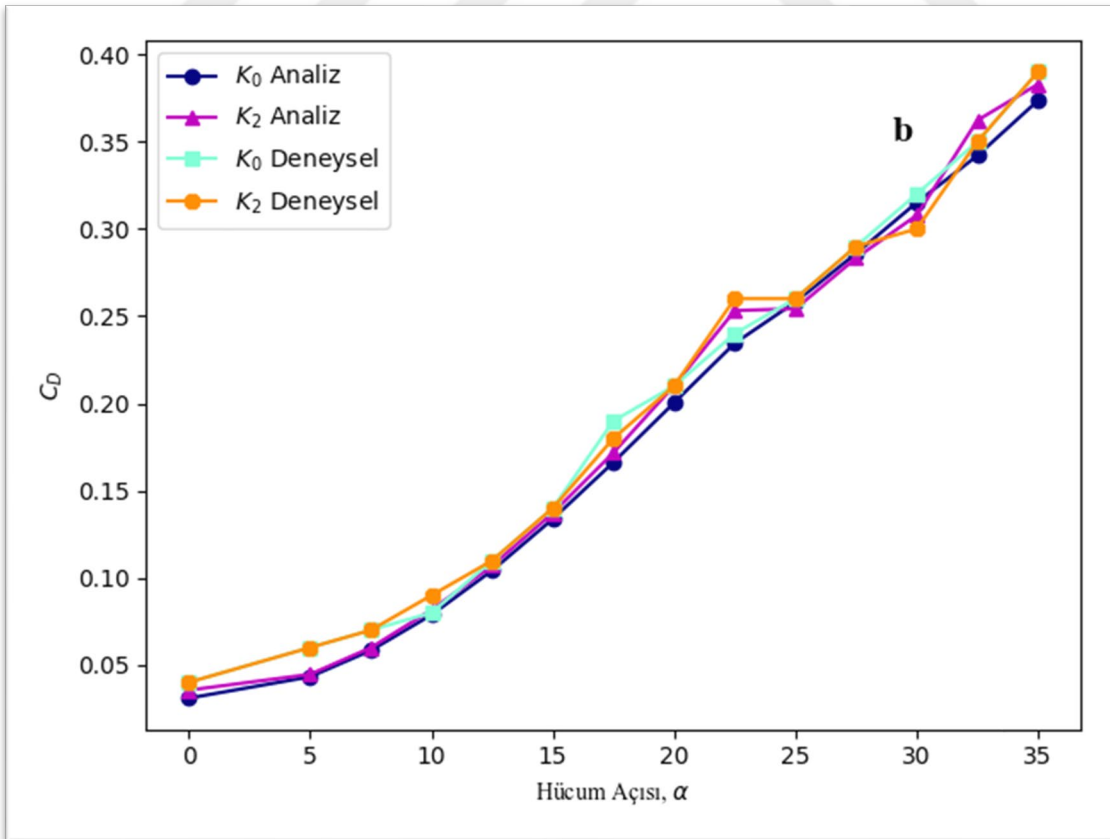
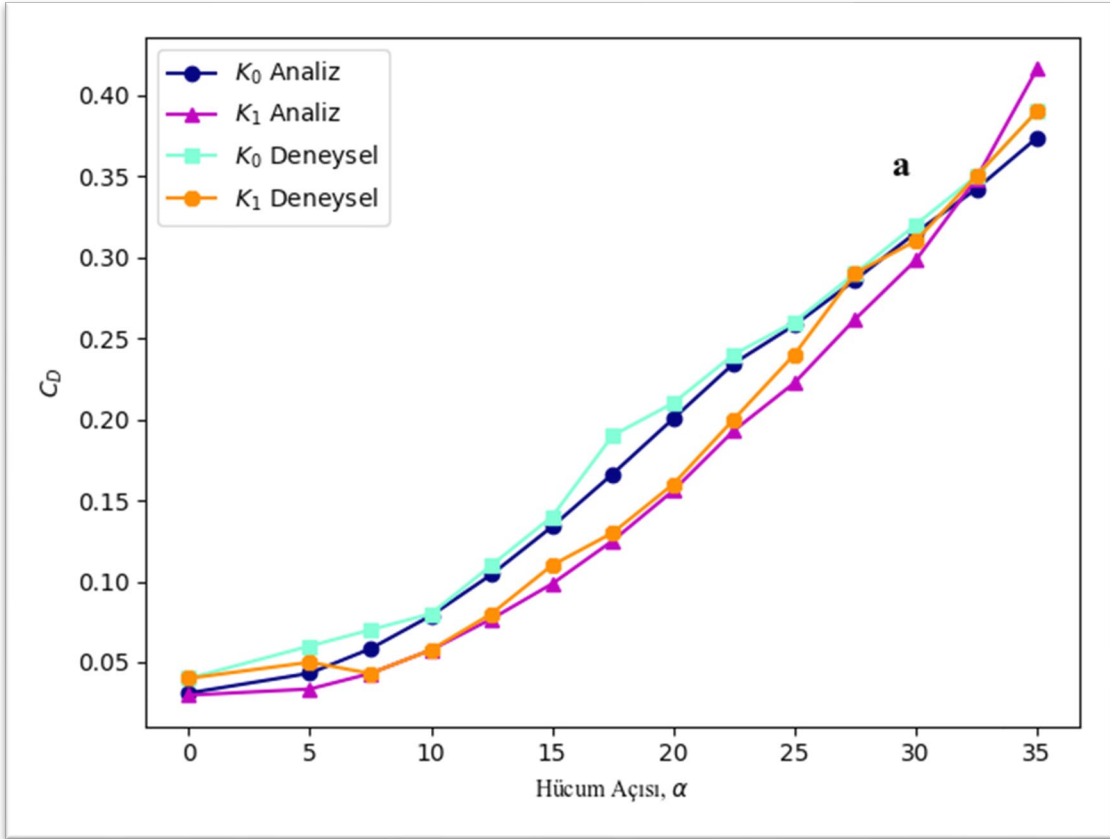


Şekil 7.2. a) K_0 ve K_1 , b) K_0 ve K_2 ve c) K_1 ve K_2 kanat modellerinin C_L değerleri

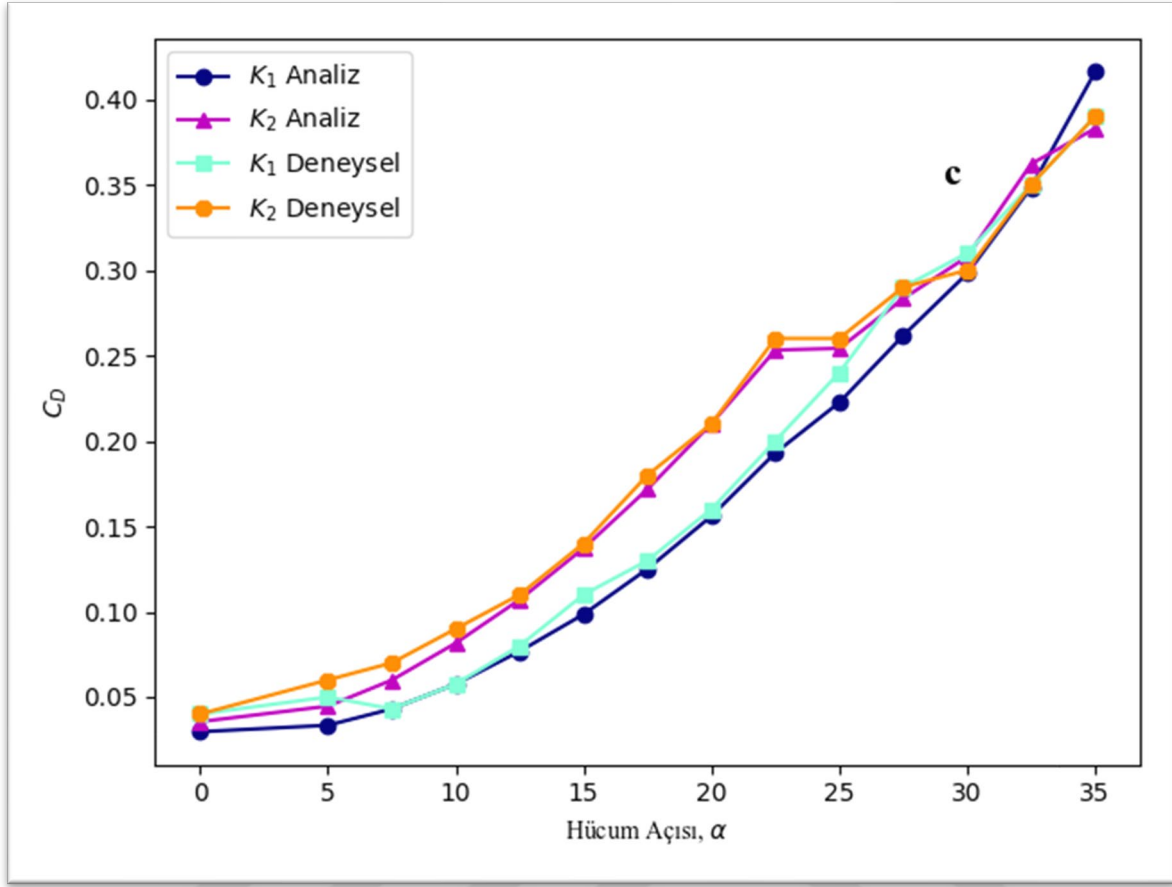


Şekil 7.2. a) K_0 ve K_1 , b) K_0 ve K_2 ve c) K_1 ve K_2 kanat modellerinin C_L değerleri.(devamı)

Şekil 7.2'de 3 kanat modeli için farklı hücum açılarında kaldırma katsayılarında meydana gelen değişimi gösteren grafik yer almaktadır. K_0 ve K_2 kanat profilleri 20° hücum açısına kadar benzer davranış göstermişler olup bu hücum açısı aralığında K_1 kanadı diğerlerine göre daha düşük kaldırma katsayısına sahiptir. K_1 ve K_2 kanat profilleri $22,5^\circ$ 'de stall olur iken K_0 25° 'de stall olmuştur. En yüksek C_L değerine K_0 kanadı 25° 'de ulaşırken K_1 ve K_2 kanat profilleri ise $22,5^\circ$ ulaşmıştır. En yüksek C_L değerleri karşılaştırıldığında K_2 kanadı K_0 kanat profilinden %14, K_1 kanat profilinden ise %21 yüksektir. Stall öncesinde stall sonrasında da olduğu gibi en yüksek C_L değerine sahip kanat profili K_2 'dir. 35° hücum açısında 3 kanat profili için C_L birbirine yakın değerlerdedir.

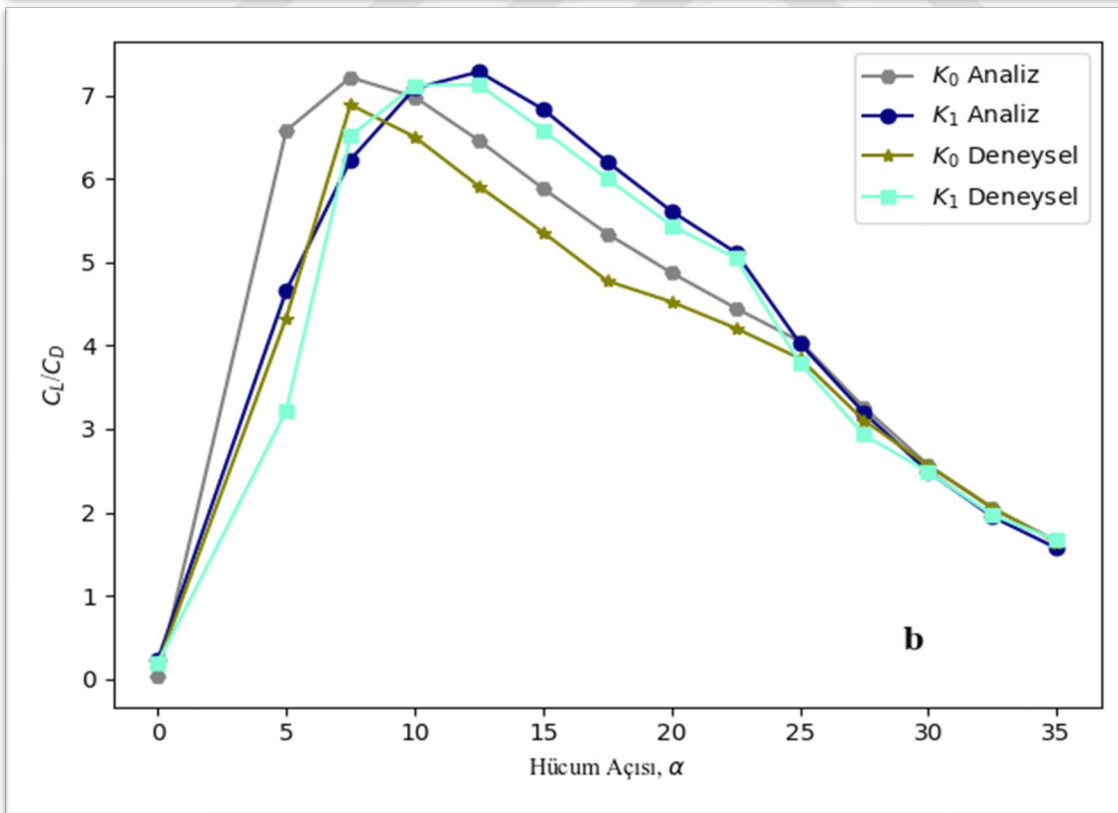
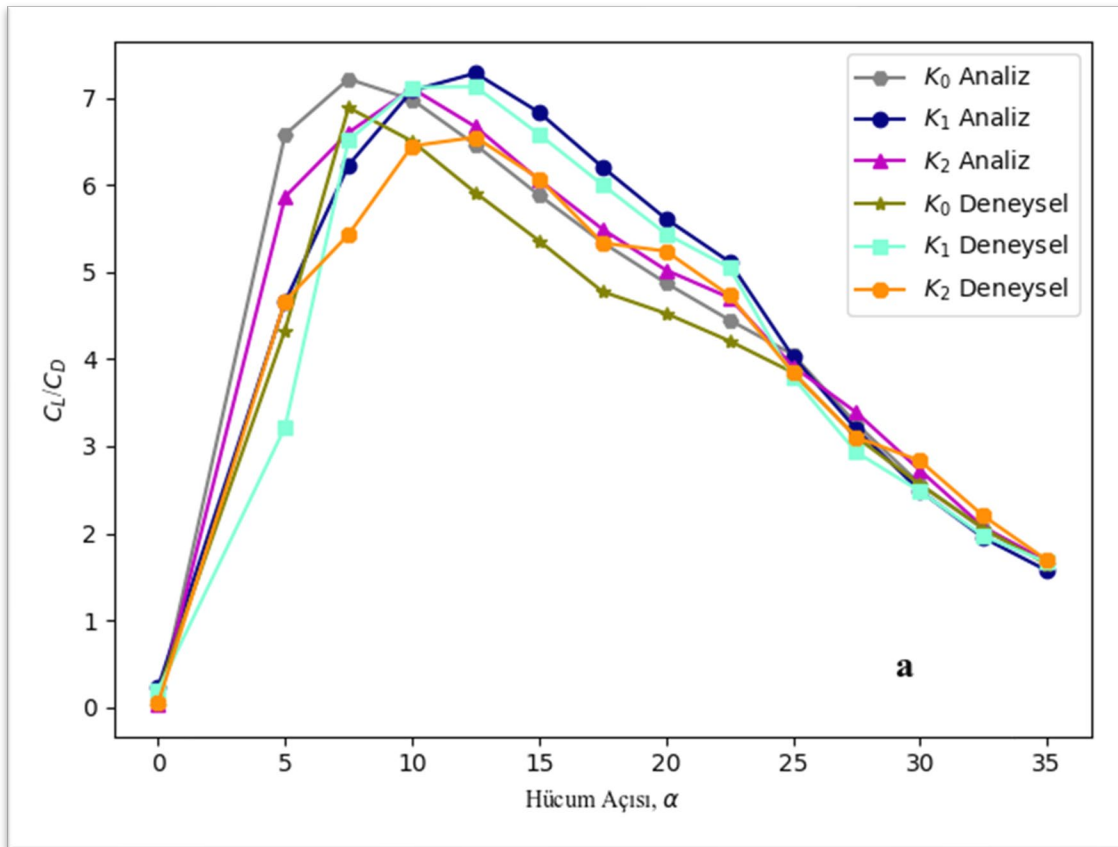


Şekil 7.3. a) K_0 ve K_1 b) K_0 ve K_2 c) K_1 ve K_2 kanat modellerinin C_D değerleri.

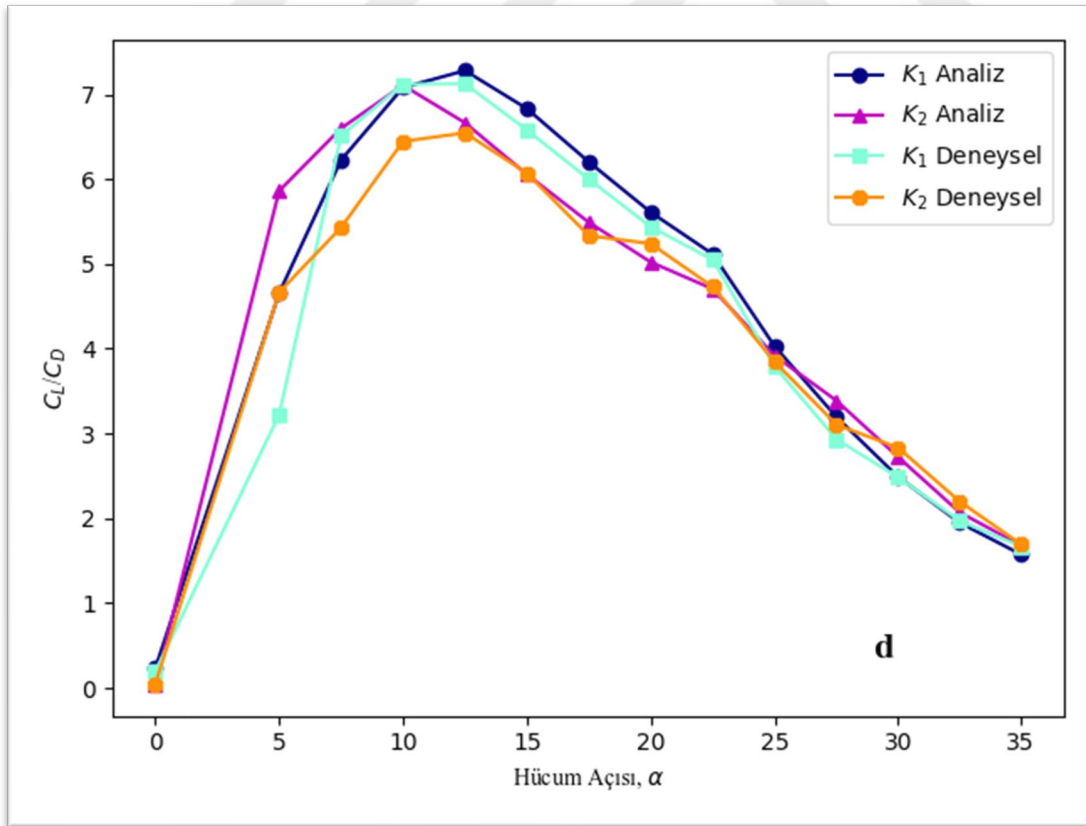
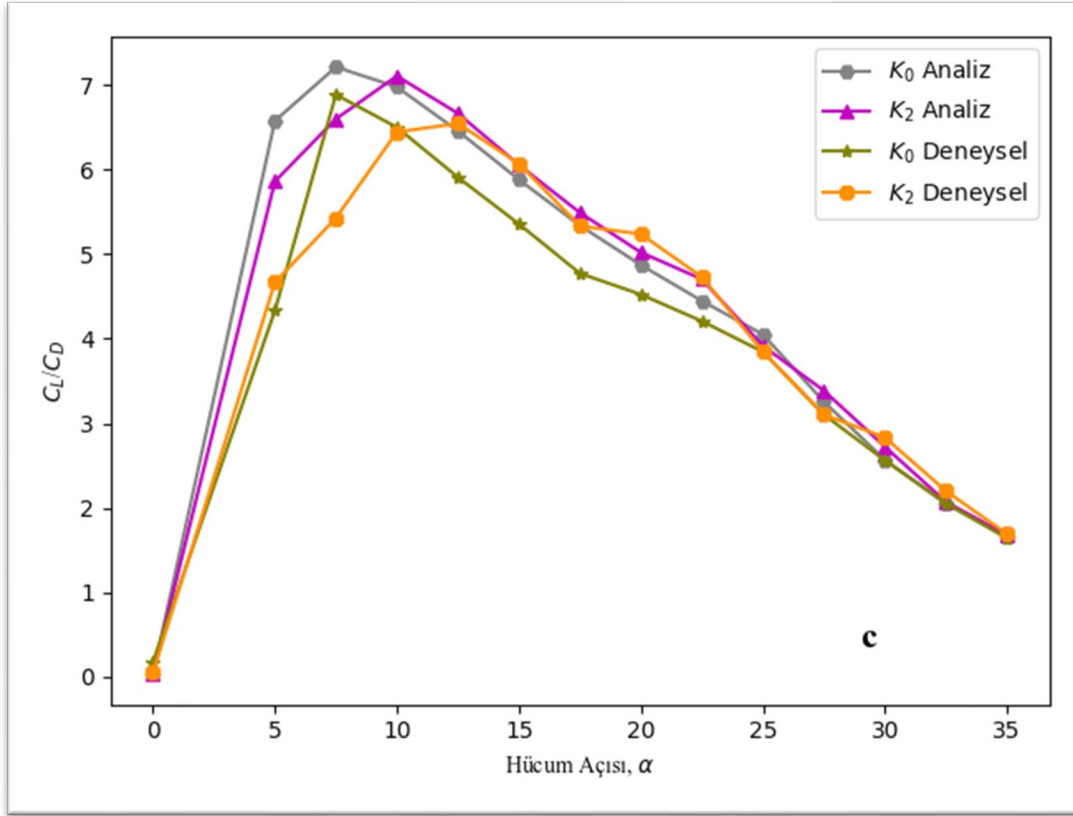


Şekil 7.3. a) K_0 ve K_1 b) K_0 ve K_2 c) K_1 ve K_2 kanat modellerinin C_D değerleri (devam)

Şekil 7.3'te 3 kanat profili için $0-35^\circ$ hücum açısı aralığında sayısal ve deneysel çalışmalar ile elde edilen sürtünme (C_D) katsayısı değerleri yer almaktadır. $0-5^\circ$ hücum açısı aralığında bütün kanat profilleri için C_D değerleri arasında belirgin fark görünmemektedir. $5-30^\circ$ aralığında K_1 profilinin C_D değeri diğer kanat profillerinden daha düşük olmaktadır. K_0 ve K_2 kanat profili 15° hücum açısına kadar benzer davranışı göstermektedir, $15-22,5^\circ$ arasında K_2 kanadını K_1 'ye göre daha fazla eğim göstermektedir. 25° 'den sonra K_2 kanadında ani bir düşüş gözlenmiştir. Kanat yüzeyinde oluşan sürtünme direncinin iki sebebi vardır. Birinci olarak yüzeyde meydana gelen girdaplardan dolayı indüklenme direnci bir de yüzey üzerinde yer alan çıkıntılardan dolayı olan dirençtir. K_2 kanat profilinin üst yüzeyinde yer alan sürtünmelerden dolayı düşük basınç bölgeleri oluşmakta ve yüksek hücum açılarında ortalama C_D değeri diğer iki kanat profiline göre daha yüksek olmaktadır.



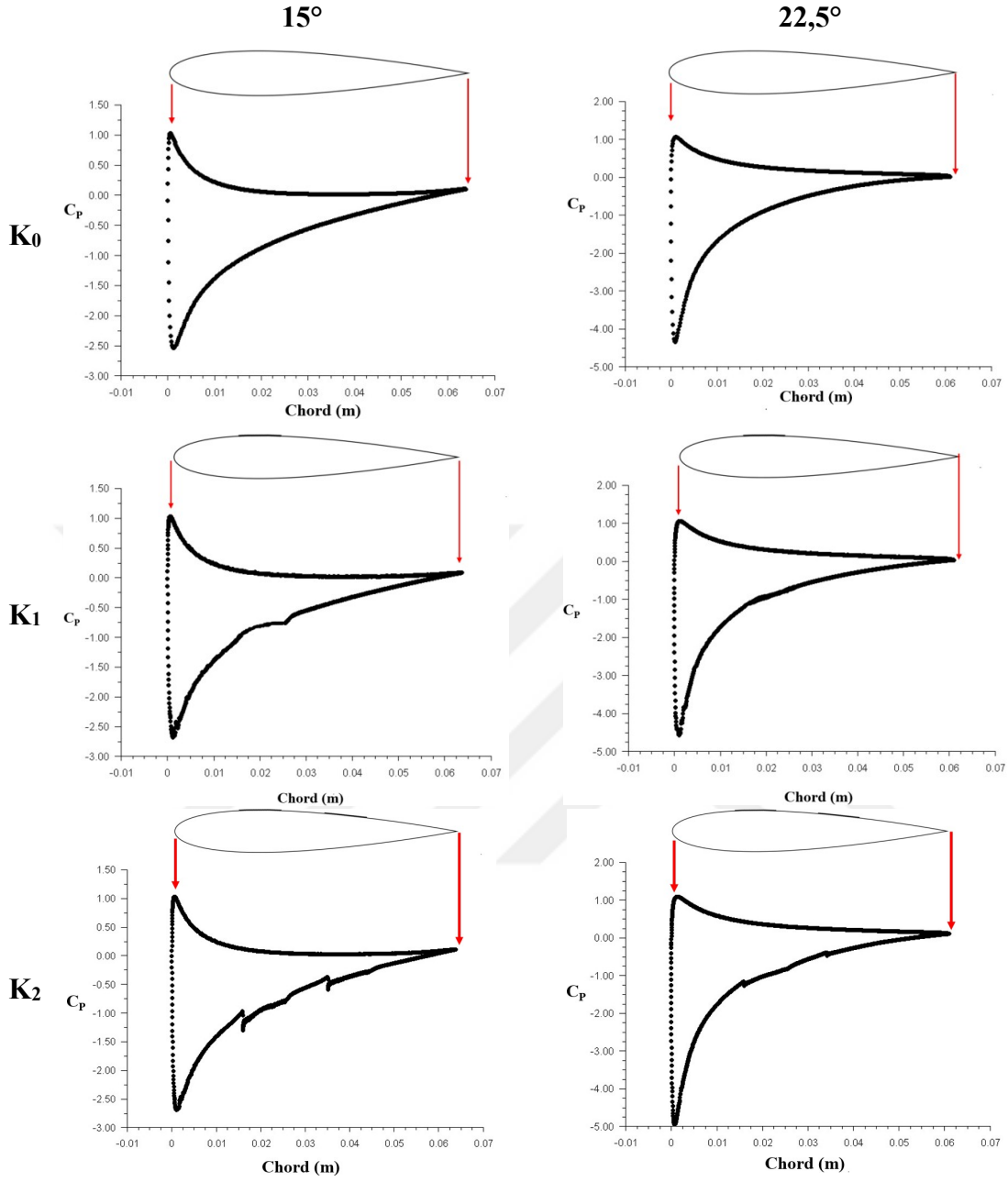
Şekil 7.4. a) K_0 , K_1 ve K_2 b) K_0 ve K_1 c) K_0 ve K_2 d) K_1 ve K_2 C_L/C_D değerleri



Şekil 7.4. a) K_0 K_1 ve K_2 b) K_0 ve K_1 c) K_0 ve K_2 d) K_1 ve K_2 kanatlarına ait C_L/C_D değerleri (devam)

Şekil 7.4'te her üç kanat profiline ait sayısal ve deneysel çalışmalar sonucu elde edilen C_L/C_D (aerodinamik verim) değerleri yer almaktadır. Şekil 7.14'te görüldüğü üzere pürüzlü yüzeye sahip kanat profillerinin ortalama aerodinamik verimi düz kanat profillerine göre daha yüksektir. Deneysel çalışma sonucuna göre K_1 kanat profilinin ortalama verimi 4,27 iken K_2 kanadı 4,17 ve K_0 kanadı için bu değer 3,92 olmaktadır. En yüksek verime K_1 ve K_2 kanadı $12,5^\circ$ hücum açısında elde eder iken K_0 kanadı 10° hücum açısında ulaşmaktadır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarda K_1 kanadının en yüksek aerodinamik verimi 7,125, K_2 kanadının 6,5455 ve K_0 kanadının 6,5 olmaktadır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre K_1 kanadının maksimum verimi K_0 ve K_2 kanat profillerinden sırasıyla %1 ve %2,5 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir.

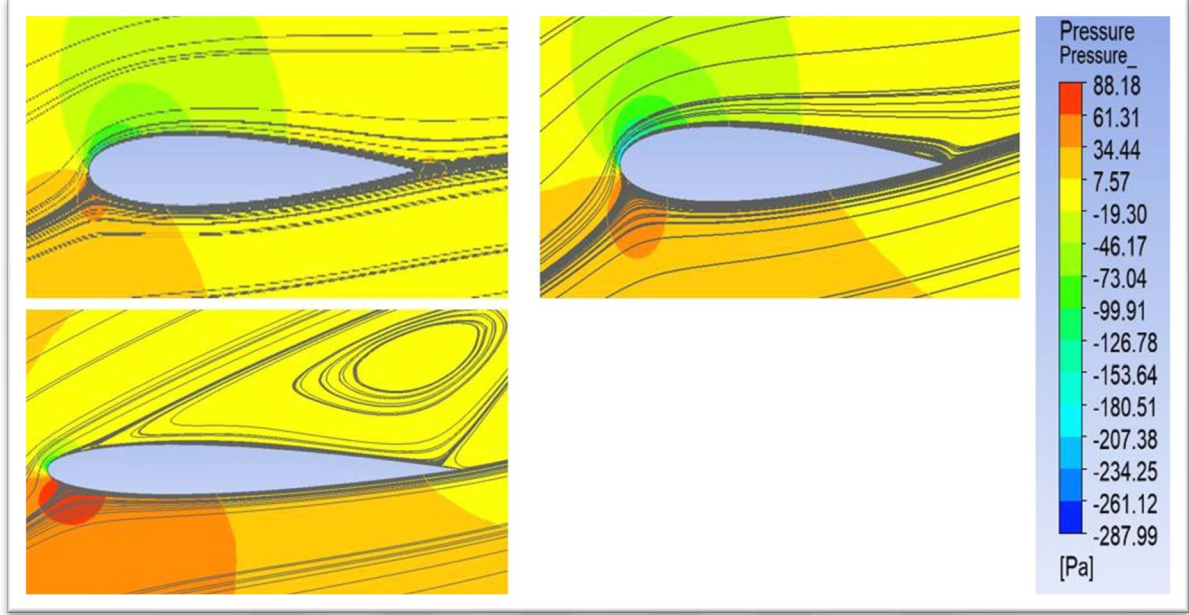
Sayısal çalışma sonunda K_1 ve K_2 kanat profilleri maksimum değerlerine $12,5^\circ$ ve 10° hücum açısında sahip olmaktadır. K_1 profili için bu değer 7,2799 iken K_2 kanadı için ise 7,1066'dir. K_0 kanat profili ise maksimum değeri olan 7,2178'e $7,5^\circ$ hücum açısında ulaşmaktadır. Sayısal çalışma sonunda elde edilen değerlere göre K_1 kanat profilinin maksimum verimi K_0 kanat profilinden %1 ve K_2 kanat profilinden %2 fazla olduğu görülmektedir.



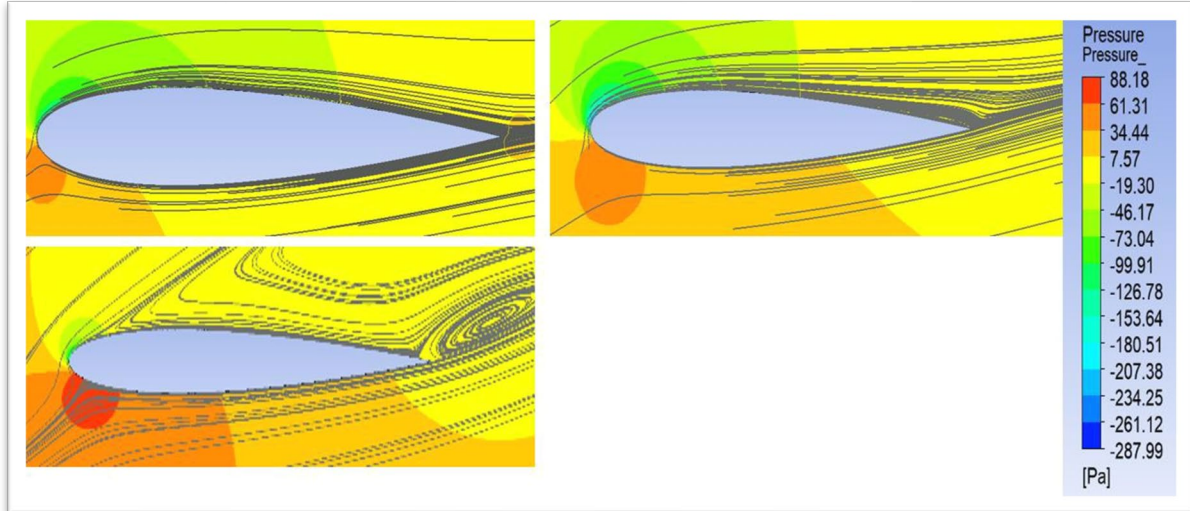
Şekil 7.5. 15° ve $22,5^\circ$ değerleri için K_0 , K_1 ve K_2 kanat profillerinin C_p grafikleri

Şekil 7.5'te üç kanat profilinin 15° ve $22,5^\circ$ hücum açılarında basınç dağılımı (C_p) grafikleri yer almaktadır. Her iki hücum açısı için de hücum kenarı bölgesinde büyük basınç bölgelerinin oluşmasının sebebi akımın kanat profiline çarpmasından kaynaklanmaktadır. 15° hücum açısında kanat üst yüzeyinde hücum kanadından firar kanadına doğru büyük basınç farklılıkları olmakta iken bu farklılık $22,5^\circ$ hücum açısında daha küçük olmaktadır. Bunun sebebi $22,5^\circ$ hücum açısında kanat üst yüzeyinde türbülans yapılarının gözlenmesidir. K_2 kanat profili için C_p değeri incelendiğinde pürüzlü yüzeylerde düz kanata göre farklılıklar oluşmaktadır.

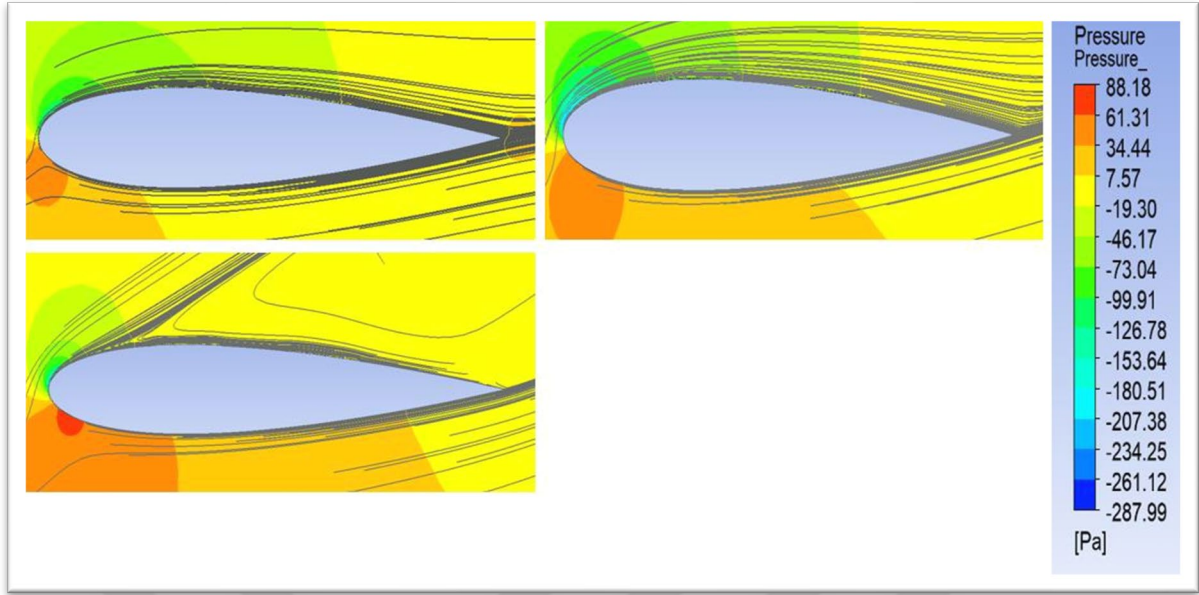
Bunun sebebi ise pürüzlü yüzeylerden dolayı düşük basınç alanı oluşmasıdır. Üst kanat yüzeyinde düşük basınç alanı oluşması ise daha yüksek kaldırma katsayısı (C_L) oluşturmaktadır.



Şekil 7.6. Kanat profillerinin 15° hücum açısında basınç dağılımları ve akım hatları



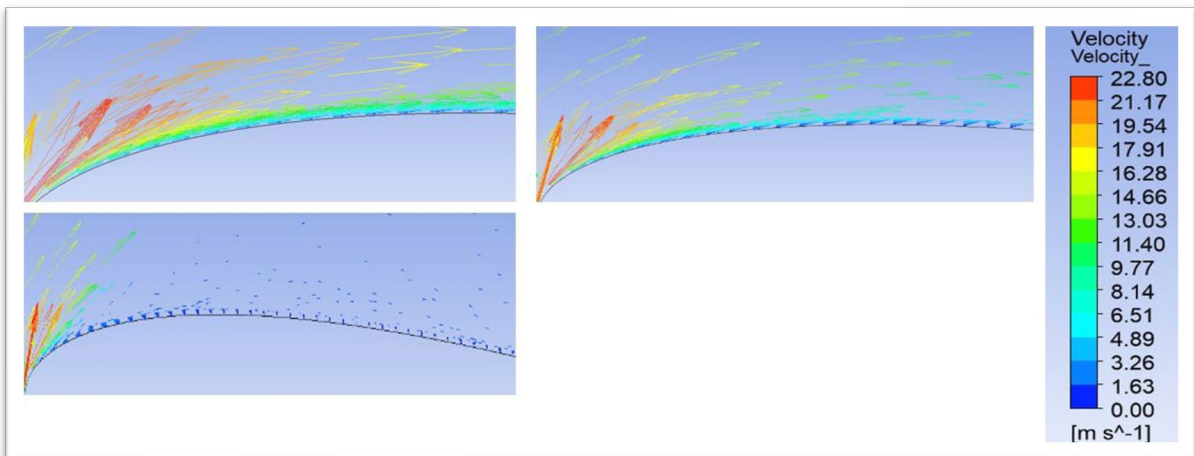
Şekil 7.7. Kanat profillerinin 22,5° hücum açısında basınç dağılımları ve akım hatları



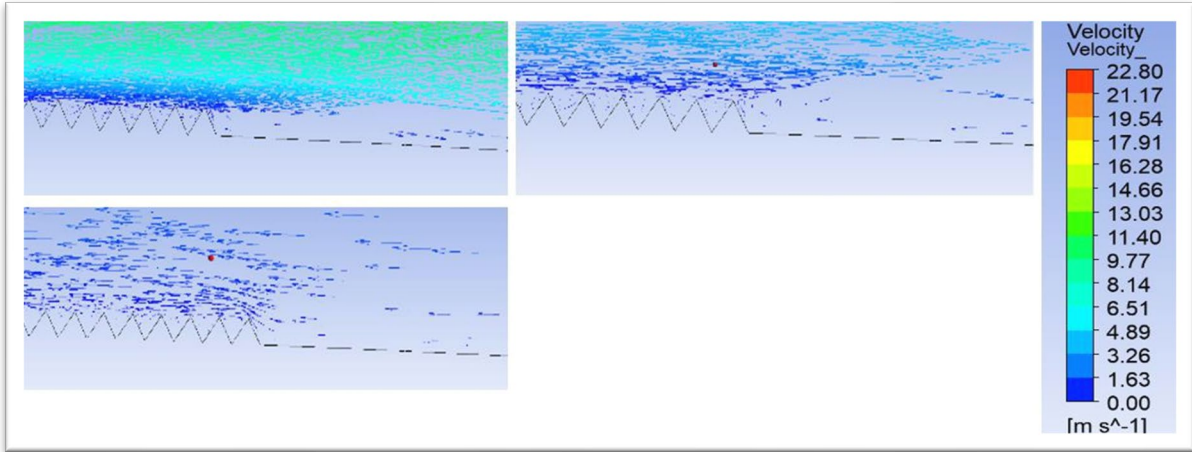
Şekil 7.8. Kanat profillerinin 35° hücum açısında basınç dağılımları ve akım hatları

Şekil 7.6, Şekil 7.7 ve Şekil 7.8’de üç kanat profili için 15°,22,5° ve 35° hücum açılarında basınç dağılımları ve akım hatlarını gösteren analiz sonuçları yer almaktadır. Hücum açısının artması ile K₀ kanat profili için hücum kenarında firar kenarına doğru lineer bir şekilde artmaktadır. Bununla beraber K₁ ve K₂ kanat profili için pürüzlü yüzey girdaplı alana sebep olması sebebi ile akım ayrılması düz kanada göre daha erken olmaktadır.

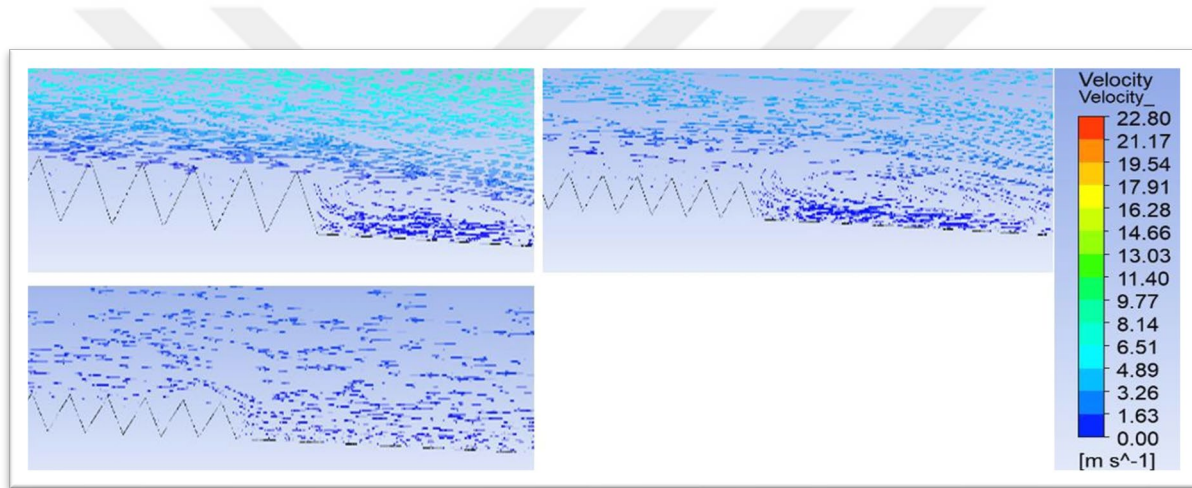
Düşük hücum açılarında dahi pürüzlü yüzey girdap oluşumuna sebep olmakta ve türbülans yoğunluğunu arttırmaktadır.



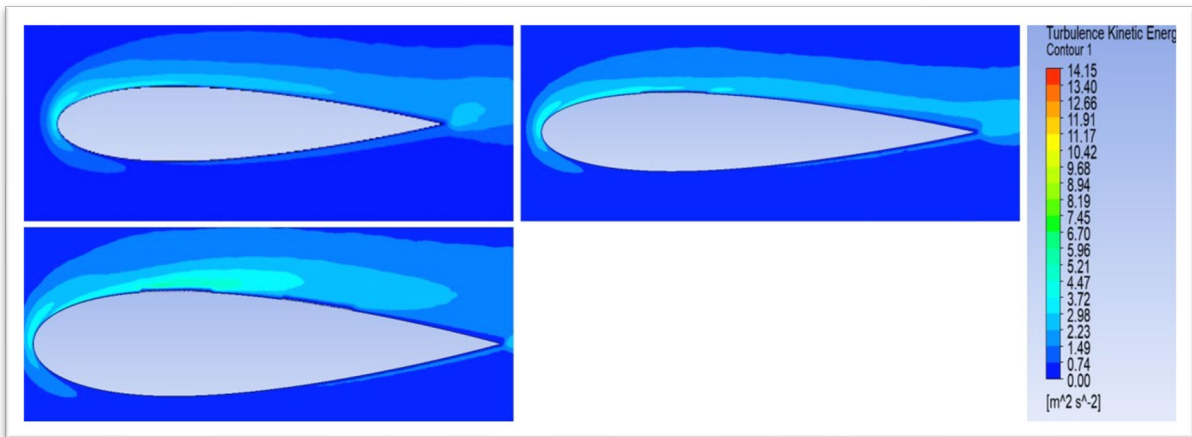
Şekil 7.9. 15° hücum açısı için hız vektörleri



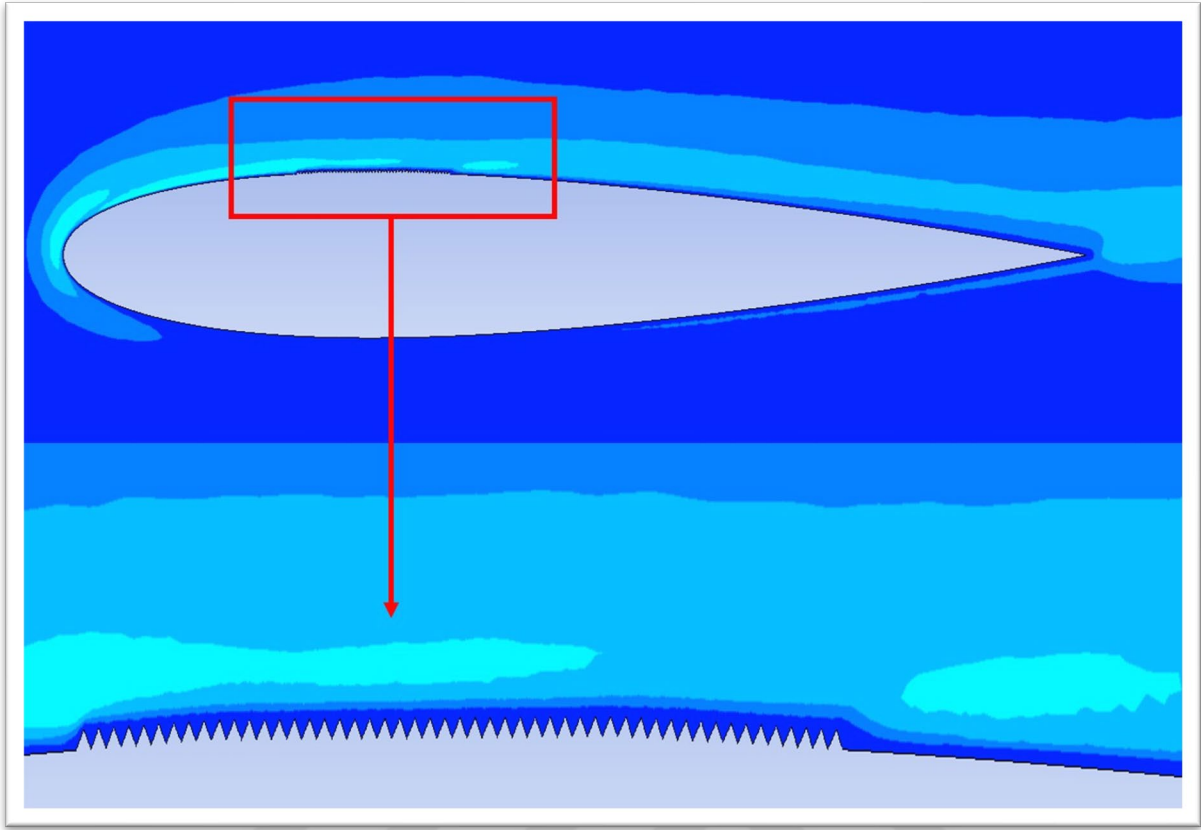
Şekil 7.10. 22,5° hücum açısı için hız vektörleri



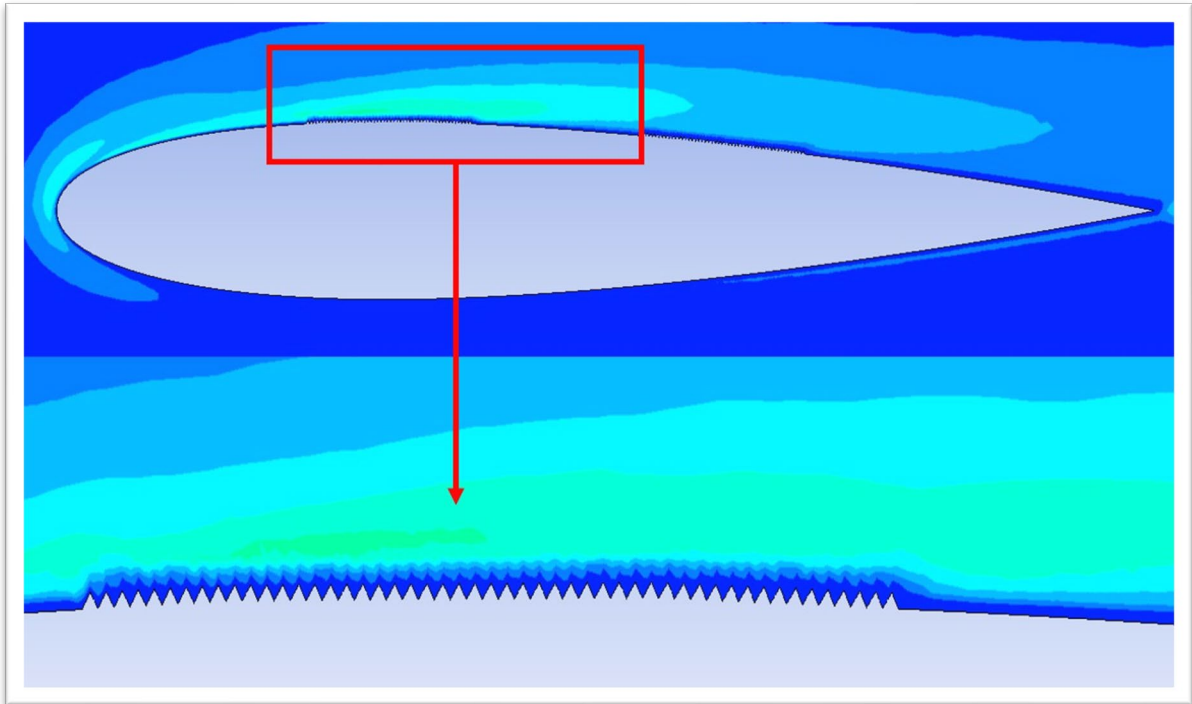
Şekil 7.11. 35° hücum açısı için hız vektörleri



Şekil 7.12. 15° hücum açısında türbülans kinetik enerjisi dağılımı



Şekil 7.13. K₁ kanadının 15° hücum açısında türbülans kinetik enerji dağılımı



Şekil 7.14. K₂ kanadının 15° hücum açısında türbülans kinetik enerji dağılımı

K_0 , K_1 ve K_2 kanat profilleri için 15° hücum açısında türbülans kinetik enerji dağılımı Şekil 7.12’de yer almaktadır. Türbülans kinetik enerjinin dağılımı bize akışın rejimini anlamada ve tanımlamada fayda sağlamaktadır. Akım ayrılmasından dolayı kanat üst yüzeyinde türbülanslı alan oluşmaktadır. Türbülans alanının ana parametreleri olan başlangıç noktası, yönü ve büyüklüğünü türbülans kinetik enerjisi verilerinden elde edilmektedir. Türbülans K.E.’nin dağılımı bize akımın karakteristiği hakkında detaylı bilgi vermektedir. K_0 kanadı için türbülans kinetik enerji yoğunluğu firar kenarına doğru artmaktadır. K_1 ve K_2 profili üst yüzeylerinde pürüzlü yüzeyden dolayı art izi oluşmaktadır. Şekil 7.13 ve Şekil 7.14’te pürüzlülüğünden dolayı oluşan türbülans alanı daha net gözükmemektedir. Pürüzlü yüzey K_1 kanadı için sürtünme katsayısının azalmasına ve aerodinamik verimin yükselmesine sebep olmaktadır. K_2 kanadı için ise kaldırma katsayısı artmaktadır.

K_1 ve K_2 kanadı üst yüzeyinde orta bölüm ve firar kenarı çevresinde pürüzlü yüzeyden dolayı girdap bölgeleri oluşmaktadır. Şekil 7.12’de görüldüğü üzere K_2 kanadı üst yüzeyinde diğer iki kanat profiline göre daha yüksek türbülans yoğunluğu gözlenmektedir. Bu durum Şekil 7.1’de yer alan C_L & α grafiği ile doğrulanmaktadır.

Kanat yüzeyinin üstünde 2 adet pürüzlü yüzeyin olması daha yüksek türbülans yoğunluğu oluşturmaktadır. K_2 kanadında da görüldüğü üzere diğer kanatlara göre daha yüksek türbülans yoğunluğu sürüklenme direncinin daha yüksek olmasına sebep olmuştur. K_2 kanadının C_L/C_D oranı K_1 kanadı ile karşılaştırıldığında %3 daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla beraber yüzey pürüzlülüğü stall açısından sonra aerodinamik verim yönünden sınırlı etkisi bulunmaktadır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında NACA 0015 kanat profilinin düz ve pürüzlü yüzeye sahip modifiye edilmiş versiyonları kaldırma (C_L) katsayısı, sürüklenme (C_D) katsayısı, aerodinamik verim (C_L/C_D) ve türbülans kinetik enerji dağılımı açısından incelenmiş olup sonuçlar maddeler halinde özetlenmiştir.

- Hem deneysel hem de sayısal analiz çalışmalarının sonucunda, pasif akış kontrol yöntemi ile kanat profilinin aerodinamik verimine olumlu yönde katkı sağladığını göstermektedir.
- Stall K_0 kanadı için analizlerde 25° 'de gerçekleşmiştir. K_1 ve K_2 kanatları ise $22,5^\circ$ hücum açısında stall olmuşlardır. Bu stall açıları deneysel çalışma ile elde edilen değerler ile örtüşmektedir.
- K_2 kanat profili maksimum C_L değerine $22,5^\circ$ hücum açısında ulaşmaktadır. Diğer kanat profilleri ile bu açıda ulaşılan C_L karşılaştırıldığında K_0 ve K_1 profillerinden %15 ve %17 daha fazla olduğu elde edilmiştir. Sürüklenme katsayısı yönünden değerlendirildiğinde K_1 profili diğerlerine göre daha fazla avantaj sağlamaktadır.
- Maksimum aerodinamik verime (C_L/C_D) K_1 kanat profili $12,5^\circ$ hücum açısında ulaşmaktadır. $10-25^\circ$ hücum açıları arasında ortalama aerodinamik verimi açısından K_2 kanat profili K_0 'den %3 fazladır. K_1 kanadının aynı hücum açıları arasında ortalama değeri K_0 'den %10 fazladır.
- Sayısal çalışma ile paralel olarak deneysel çalışmanın $10-25^\circ$ hücum açıları arasında ortalama aerodinamik verimi karşılaştırıldığında K_1 kanadı K_0 ve K_2 kanat profillerinden sırasıyla %15 ve %6 oranında fazla olduğu elde edilmiştir.
- HAD analizleri ile deney sonuçları çoğunlukla örtüşmekle beraber hücum açısının artması ile bazı farklılıklar meydana gelmiştir. Bunun sebebi olarak deney düzeneğinden alınan ölçüm sonuçlarının yeterli hassasiyete sahip olmaması sebebi ile bir miktar farklılığa sebep olduğu söylenebilir.
- HAD analizlerinde farklı türbülans modellerinde yapılan analizlerde, düşük hücum açılarında oldukça benzer sonuçlar elde edilmiş iken hücum açısının artması sonucunda farklılıklar gözlemlenmeye başlamıştır. Bunun sebebi ise akışın düzensizleşmesi ile farklı türbülans modellerinin probleme farklı yaklaşım ile çözüm getirmelerinden kaynaklanmaktadır.

- Çalışma sonucunda kanat profilinin pürüzlü olması durumunda aerodinamik verim açısından pürüzsüz yüzeye göre daha avantajlı olduğu değerlendirilmektedir.

Bu tez çalışmasında, kanat profili üzerinde yer alan pürüzlü yüzeyler ile akışın pasif kontrolü yöntemi kullanılarak düz kanat profili ile aerodinamik verim yönünden oluşturduğu farklılık sayısal ve deneysel yönden incelenmiştir. Gelecekteki çalışmalarda pürüzlü yüzeyin yeri ve sayısı değiştirilerek ve çeşitli geometrik yapılar eklenerek sayısal ve deneysel olarak tekrarlanabilir. Ayrıca oluşturulan pürüzlülüğün yüksekliği çeşitli çevre şartları göz önüne alınarak yenilenebilir ve çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

1. Şenel M.C., Koç E. (2015). Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Durumu-Genel Değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, 56 (663), 46-56.
2. Moriarty P. and Honnery D. (2016). Can renewable energy power the future?. *Energy Policy*, 93, 3–7.
3. Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu 2020 (2021), *Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği*, Ankara.
4. Pope K., Dincer I., and Naterer G. F. (2010). Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbines. *Renewable Energy*, 35(9), 2102– 2113.
5. Laws P., Saini J.S. and Kumar A. A. (2019). Study on OpenFOAM's Overset Mesh Support Using Flow Past NACA 0018 Airfoil. *Preprints*, 2019070217.
6. Triet N. M., Viet N. N. and Thang P. M. (2015). Aerodynamic Analysis of Aircraft Wing. *VNU Journal of Science: Mathematics-Physics*, 31(2), 68–75.
7. Ahadi A., Sullivan P. E. and Saghir M.Z. (2018). Comparison of numerical and experimental results over a NACA 0025 airfoil undergoing separation. *Fluid Mechanics Research International. Journal*, 2(1), 1–11.
8. Li, S., Li, Y., Yang, C., Zheng, X., Wang, Q., Wang, Y., and Hu, W. (2019). Experimental and numerical investigation of the influence of roughness and turbulence on LUT airfoil performance. *Acta Mechanica Sinica*, 35(6), 1178-1190.
9. Chen, P. W., Bai, C. J., and Wang, W. C. (2016). Experimental and numerical studies of low aspect ratio wing at critical Reynolds number. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 59, 161-168.
10. Şahin, İ., and Acir, A. (2015). Numerical and experimental investigations of lift and drag performances of NACA 0015 wind turbine airfoil. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 3(1), 22-25.
11. Tanürün, H. E., Ata İ., Canlı M. E., ve Acir A. (2020). Farklı açıklık oranlarındaki NACA-0018 rüzgâr türbini kanat modeli performansının sayısal ve deneysel incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 23(2), 371-381.
12. Rubel, R. I. (2017). Comparison Of Aerodynamics Characteristics Of NACA 0015 and NACA 4415 Aerofoil Blade. *International Journal of Research-Granthaalayah*, 5(11), 187-197.
13. Saad M. M. M., Bin Mohd S., Zulkafli M. F., and Shibani W. M. E (2017). Numerical analysis for comparison of aerodynamic characteristics of six airfoils. *AIP Conf. Proc.*, 1831 (1), 20004.
14. Shukla V. and Kaviti A. K. (2017). Performance evaluation of profile modifications on straight-bladed vertical axis wind turbine by energy and Spalart Allmaras models. *Energy*, 126, 766–795.

15. Tanürün H. E. ve Acır A. (2018). Modifiye Edilmiş NACA-0015 Kanat Yapısında Tüberkül Etkisinin Sayısal Analizi. *Journal of Polytech.*, 0900 (1), 185–195.
16. Kabir A., Chowdhury M. S., Islam M. J., and Islam M. (2019). Numerical Assessment of the Backward Facing Step for NACA 0015 Airfoil using Computational Fluid Dynamics. *1st Int. Conf. Adv. Sci. Eng. Robot. Technol. ICASERT 2019*, 2019, 1–6.
17. Kumar S. M. and Karthick M. (2016). Investigation of Aerodynamic Performances of NACA 0015 Wind Turbine Airfoil. *International Journal of Engineering Research*, 5(4), 327–331.
18. Demir H., Özden M., Genç M. S. and Çağdaş M. (2016). Numerical investigation of flow on NACA4412 aerofoil with different aspect ratios. *EPJ Web of Conferences*, 114, 1– 5.
19. Mizoguchi M., Kajikawa Y., and Itoh H., (2016). Aerodynamic characteristics of low-aspect-ratio wings with various aspect ratios in low Reynolds number flows. *Transactions of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 59 (2), 56–63.
20. Matyushenko A. A. and Garbaruk A. V. (2016). Adjustment of the k- ω SST turbulence model for prediction of airfoil characteristics near stall. *Journal of Physics: Conference Series*, 769.
21. Eleni, D. C., Athanasios, T. I., and Dionissios, M. P. (2012). Evaluation of the turbulence models for the simulation of the flow over a National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) 0012 airfoil. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 4(3), 100-111.
22. Wang, R., and Xiao, Z. (2020). Transition effects on flow characteristics around a static two-dimensional airfoil. *Physics of Fluids*, 32(3), 035113.
23. Chakroun, W., Al-Mesri, I., and Al-Fahad, S. (2004). Effect of surface roughness on the aerodynamic characteristics of a symmetrical airfoil. *Wind Engineering*, 28(5), 547-564.
24. Salazar, F., and Barrientos, A. (2013). Surface roughness measurement on a wing aircraft by speckle correlation. *Sensors*, 13(9), 11772-11781.
25. Zhang, Q., Goodro, M., Ligrani, P. M., Trindade, R., and Srekanth, S. (2006). Influence of Surface Roughness on the Aerodynamic Losses of a Turbine Vane. *ASME. J. Fluids Eng.*, 128(3), 568–578.
26. Wang Y., Tong H., Sima H., Wang J., Sun J., and Huang D.(2019). Experimental study on aerodynamic performance of deformable blade for vertical axis wind turbine. *Energy*, 181, 187–201.
27. Abd El-Latief, M. E., Elsayed, K., and Madbouli Abdelrahman, M. (2019). Aerodynamic study of the corrugated airfoil at ultra-low Reynolds number. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(10).
28. Murphy, J. T., and Hu, H. (2010). An experimental study of a bio-inspired corrugated airfoil for micro air vehicle applications. *Experiments in fluids*, 49(2), 531-546.

29. Tamai M., Zhijian W., Rajagopalan G., Hui H., and Guowei H. (2007). Aerodynamic performance of a corrugated dragonfly airfoil compared with smooth airfoils at low Reynolds numbers. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 9, 5800–5811.
30. Rubel, R. I., Uddin, M. K., Islam, M. Z., and Rokunuzzaman, M. D. (2016). Numerical and experimental investigation of aerodynamics characteristics of NACA 0015 aerofoil, *International Journal of Engineering Technologies*, 2(4), 132-141.
31. Zhang Q. and Ligrani P. M. (2006). Wake turbulence structure downstream of a cambered airfoil in transonic flow: Effects of surface roughness and freestream turbulence intensity. *International Journal of Rotating Machinery*, 2006, 1–12.
32. Xia, Y., Bilgen, O., and Friswell, M. I. (2014). The effect of corrugated skins on aerodynamic performance. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(7), 786-794.
33. Qin, R., and Duan, C. (2017). The principle and applications of Bernoulli equation. *In Journal of Physics: Conference Series*, 916, 012038.
34. Çengel Y. A. and Cimbala J. M. (2006). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Application*. New York, McGraw-Hill Series, 968
35. İnternet: Yükselen M. A., “Bölüm 5 Kanat Profillerinin Aerodinamiği” [PDF Belgesi] URL:<https://web.itu.edu.tr/yukselen/Uck351/05-%20Kanat%20profillerinin%20aerodinami%F0i.pdf>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2021
36. Sayed, M. A., Kandil, H. A., and Shaltot, A. (2012). Aerodynamic analysis of different wind-turbine-blade profiles using finite-volume method. *Energy conversion and Management*, 64, 541-550.
37. Yao, J., Yuan, W., Xie, J., Zhou, H., Peng, M., and Sun, Y. (2012). Numerical simulation of aerodynamic performance for two dimensional wind turbine airfoils. *Procedia Engineering*, 31, 80-86.
38. White, F. M., & Corfield, I. (2006). *Viscous fluid flow* (Third Edition). New York, McGraw-Hill, 433-434.
39. Magherbi, M., Abbassi, H., Hidouri, N., and Brahim, A. B. (2006). Second law analysis in convective heat and mass transfer. *Entropy*, 8(1), 1-17.
40. Ozcan O. A. (2004). *Uçak Kanatlarının CFD Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 11.
41. Shih T. H., Liou W. W., Shabbir A., Yang Z., and Zhu J. (1995). A New K-epsilon Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows. *Computers & Fluids*, 24, 227–238.
42. İnternet: “NACA 4 digit airfoil generator,” URL:<http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>, Son Erişim Tarihi: 30.07.2020
43. Yılmaz M., Koten H., Çetinkaya, E, Coşar, Z. (2018), A comparative CFD analysis of NACA0012 and NACA4412 airfoils, *Journal of Energy Systems*, 2(4), 145-159.

44. Shukla I., Tupkari S. S., Raman A. K., and Mullick A. N. (2012). Wall Y+ approach for dealing with turbulent flow through a constant area duct. *AIP Conference Proceedings*, 1440, 144.
45. Takeda K. and Kato M. (1992). Wind tunnel blockage effects on drag coefficient and wind- induced vibration. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 42(1), 897–908.
46. Ryi J., Rhee W., Hwang U. C., and Choi J. S., Blockage effect correction for a scaled wind turbine rotor by using wind tunnel test data. *Renewable Energy*, 79(1), 227–235.
47. Kline S. J. and McClintock F. A. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75 (1), 3–8.





GAZİ GELECEKTİR..