



**SİMETRİK VE ASİMETRİK NACA KANAT MODELİ ÜZERİNDE
FARKLI GEOMETRİK YAPILARIN AERODİNAMİK PERFORMANSA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Meltem SALMAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2020

Meltem SALMAN tarafından hazırlanan “SİMETRİK VE ASİMETRİK NACA KANAT MODELİ ÜZERİNDE FARKLI GEOMETRİK YAPILARIN AERODİNAMİK PERFORMANSA ETKİSİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Adem ACIR

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Doç. Dr. Serhat KARYEYEN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi İsmail ATA

Uzay Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Erciyes Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 15/01/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada 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.

Meltem SALMAN
15/01/2020

SİMETRİK VE ASİMETRİK NACA KANAT MODELİ ÜZERİNDE FARKLI
GEOMETRİK YAPILARIN AERODİNAMİK PERFORMANSA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Meltem SALMAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2020

ÖZET

Kanat modellerinin geometrik yapısı, rüzgar türbinlerinden ve hava araçlarından daha yüksek performans sağlamak için önemli bir parametredir. Bu tez çalışmasında, NACA 0015 ve NACA 4412 kanat modellerinin 14 m/s, 18 m/s ve 22 m/s olmak üzere 3 farklı hızda, kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından 0,2c uzaklıkta kare, üçgen ve küre olmak üzere 3 farklı dimple eklenerek ve düz kanat ile dimple yapısına sahip kanatların karşılaştırılarak aerodinamik performansları sayısal olarak incelenmiştir. SOLIDWORKS CAD programı kullanılarak elde edilen kanat modellerinin çizimleri, akış analizlerini gerçekleştirmek için ANSYS FLUENT programına aktarılmıştır. Analizler 0 ile 27,5° hücum açıları arasında ve 2,5° adım aralıklarında, kanat açıklık oranı (AR) 3 iken gerçekleştirilmiştir. Analizlerde SST k- ω türbülans modeli kullanılmıştır. Kanat modellerinin veter uzunlukları (c) 10 cm olarak belirlenmiştir. Düz kanatlarda farklı hızlarda gerçekleştirilen analizler sonrasında kanat üst yüzeyine, çapı 0,1c ve yüksekliği 0,04c olan kare, üçgen ve küre çukur yapısı (dimple) eklenerek sayısal analizler yapılmıştır. Her iki kanat modeli için de, rüzgarın giriş hızı artışı aerodinamik performansı olumlu yönde etkilemiştir. Kanat modeline eklenen dimple yapıları kıyaslandığında, küre dimple yapısının diğer dimple yapılarına göre daha yüksek performans sağladığı görülmüştür. Küre dimple yapısı eklenmesiyle NACA 0015 kanat modelinin maksimum C_L değeri 17° hücum açısında gerçekleşirken, kanat modeline çukur eklendiğinde 22,5° olduğu görülmüştür. NACA 4412 kanadı için ise bu değer 20°'den 22,5°'ye yükseldiği gözlemlenmiştir. Tutunma kaybı (stall) sonrasında, dimple yapısına sahip kanadın aerodinamik performansının düz kanat modeline kıyasla daha yüksek olduğu ve tutunma kaybının daha kademeli olarak gerçekleştiği belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 92806

Anahtar Kelimeler : NACA 0015, NACA 4412, Dimple, Kanat Modeli, ANSYS FLUENT, HAD

Sayfa Adedi : 73

Danışman : Prof. Dr. Adem ACIR

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT GEOMETRIC STRUCTURES
ON AERODYNAMIC PERFORMANCE ON SYMMETRIC AND ASYMMETRIC
NACA AIRFOIL MODEL

(M. Sc. Thesis)

Meltem SALMAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2020

ABSTRACT

The geometric structure of the airfoil is an important parameter to provide high performance from wind turbines and aircrafts. In this thesis, the aerodynamic performances of NACA 0015 and NACA 4412 airfoils were investigated numerically for 3 different speeds and dimpled airfoils. Square, triangle and spherical dimples were added on the top surface of airfoil at a distance of $0,2c$ from the leading edge. Drawing of airfoils obtained using SOLIDWORKS CAD program were transferred to ANSYS FLUENT program to perform flow analysis. Analyzes were performed at between 0 and $27,5^\circ$ angle of attacks in an interval of $2,5^\circ$. SST $k-\omega$ turbulence model was used and chord lengths of airfoils (c) were determined as 10 cm. After analysis for flat airfoils at different speeds, numerical analysis were investigated by adding dimple with a diameter of $0,1c$ and a height of $0,04c$. For both airfoils, the increasing wind speed had a positive effect on aerodynamic performance. When dimples added to the airfoil were compared, it was observed that the sphere dimple provided highest aerodynamic performance than other dimples. With the addition of sphere dimple, the maximum lift coefficient of the NACA 0015 airfoil increased from 17° to $22,5^\circ$. For NACA 4412 airfoil, this value changed from 20° to $22,5^\circ$. After the stall, the aerodynamic performance of dimpled airfoil was higher than that of the flat airfoil and it was observed that the stall was more gradual for dimpled airfoil.

Science Code : 92806

Key Words : NACA 0015, NACA 4412, Dimple, Airfoil, FLUENT, CFD

Page Number : 73

Supervisor : Prof. Dr. Adem ACIR

TEŞEKKÜR

Öncelikle, bana bu tez çalışmasında yol gösteren, tecrübesini ve bilgisini benden esirgemeyen ve tez konumu seçerken isteklerimi göz önünde bulunduran kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Adem ACIR'a gönülden teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamı özenle inceleyip kıymetli bilgilerini paylaşarak bana yol gösteren Doç. Dr. Serhat KARYEYEN'e, tez çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan Arş. Gör. H. Erdi TANÜRÜN'e, tezdeki yazım hatalarımı düzelten kıymetli arkadaşım Nükleer Mühendis Zeki KARDAŞ'a destekleri ve emekleri için teşekkür ederim. Yüksek lisansım boyunca bana olan desteklerinden dolayı biricik aileme sonsuz teşekkürler. |



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. Düz Kanat ile İlgili Çalışmalar.....	3
2.2. Dimple Yapısına Sahip Kanat için Yapılan Çalışmalar.....	4
3. KURAMSAL KAVRAMLAR.....	9
3.1. Temel Aerodinamik.....	9
3.2. Aerodinamik Terimler.....	9
3.3. Aerodinamik Kuvvetler.....	12
3.4. Aerodinamik İfadeler.....	13
3.4.1. Sürüklenme ve kaldırma katsayıları.....	13
3.4.2. Tutunma kaybı (Stall) ve kanat ucu vorteksi.....	14
4. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) VE TÜRBÜLANS MODELLERİ.....	17
4.1. Korunum Denklemleri.....	17
4.1.1. Kütlelenin korunumu.....	18
4.1.2. Momentum korunumu.....	18
4.1.3. Enerjinin korunumu.....	18

4.2. Türbülans Modelleri.....	19
4.2.1. Spalart-Allmaras türbülans modeli	19
4.2.2. Standart k- ϵ türbülans modeli	20
4.2.3. Realizable k- ϵ türbülans modeli.....	21
4.2.4. Standart k- ω türbülans modeli	22
4.2.5. Shear-Stress Transport (SST) k- ω türbülans modeli.....	22
5. MATERYAL VE METOT	25
5.1. Kanat Geometrisi	25
5.2. Ağ Yapısı (Mesh) ve Ağ Yapısından Bağımsızlık.....	27
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	33
6.1. NACA 0015 ve NACA 4412 Kanat Profillerinde Rüzgar Giriş Hızı Etkisi.....	35
6.1.1. NACA 0015 kanat profilinde rüzgar giriş hızı etkisi.....	36
6.1.2. NACA 4412 kanat profilinde rüzgar giriş hızı etkisi.....	39
6.2. NACA 0015 ve NACA 4412 Kanat Profillerinde Dimple Yapısının Etkisi.....	42
6.2.1. NACA 0015 kanat profilinde dimple yapısının etkisi.....	42
6.2.2. NACA 4412 kanat profilinde dimple yapısının etkisi.....	49
6.3. NACA 0015 ve NACA 4412 Kanat Profilleri ve Küre Dimple Etkisi	55
6.3.1. NACA 0015 kanat profili ve küre dimple etkisi	56
6.3.2. NACA 4412 kanat profili ve küre dimple etkisi	60
6.4. Tartışma.....	64
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ.....	73

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Hücre kalitesi – Çarpıklık değeri aralığı.....	28
Çizelge 5.2. NACA 0015 ve NACA 4412 Kanat profilleri ağ yapısı kalite değerleri.....	29
Çizelge 5.3. NACA 0015 ve NACA 4412 Kanat profillerinde farklı ağ sayısı ve katsayılar.....	30



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Golf topunda akış ayrılması	5
Şekil 3.1. Kanat ve kanat profili	10
Şekil 3.2. Kanat profilinin geometrik parametreleri	10
Şekil 3.3. Hava aracına etki eden aerodinamik kuvvetler	13
Şekil 3.4. Kanat profilinde akış ayrılmasının kaldırma katsayısına etkisi	14
Şekil 3.5. Re sayısının kaldırma katsayısına etkisi	15
Şekil 3.6. Kanat ucu girdapları	15
Şekil 5.1. NACA 0015 kanat profili	25
Şekil 5.2. NACA 4412 kanat profili	25
Şekil 5.3. NACA 0015 Düz kanat	26
Şekil 5.4. NACA 4412 Düz kanat.....	26
Şekil 5.5. NACA 4412 Küre dimple	26
Şekil 5.6. NACA 4412 Üçgen dimple.....	26
Şekil 5.7. NACA 4412 Kare dimple	26
Şekil 5.8. C-Tipi akış alanı	27
Şekil 5.9. Düz kanat ağ yapısı.....	28
Şekil 5.10. Kanat modeli etrafında ağ yapısı	28
Şekil 5.11. NACA 4412 kanat modelinde C_L ve C_D değerlerinin ağ yapısı sayısına göre değişimi.....	31
Şekil 5.12. NACA 0015 kanat modelinde C_L ve C_D değerlerinin ağ yapısı sayısına göre değişimi.....	31
Şekil 6.1. NACA 0015 - 4412 kanatlarının 18 m/s hızda C_L değerleri.....	33
Şekil 6.2. NACA 0015 - 4412 kanatlarının 18 m/s hızda C_D değerleri	34
Şekil 6.3. 18 m/s hızda ve 0° 'de basınç dağılımları a) NACA 0015 b) NACA 4412	35
Şekil 6.4. 18 m/s hızda ve 0° 'de hız vektörleri a) NACA 0015 b) NACA 4412.....	35

Şekil	Sayfa
Şekil 6.5. NACA 0015 kanadının farklı hızlarda C_L değerlerinin karşılaştırılması	37
Şekil 6.6. NACA 0015 kanadının farklı hızlarda C_D değerlerinin karşılaştırılması	37
Şekil 6.7. NACA 0015 kanadının farklı hızlarda C_L/C_D değerlerinin karşılaştırılması.....	38
Şekil 6.8. NACA 0015 kanat profilinin 17° 'de basınç dağılımları; a) 14 m/s, b) 18 m/s, c)22m/s.....	38
Şekil 6.9. NACA 4412 kanadının farklı hızlarda C_L değerlerinin karşılaştırılması	40
Şekil 6.10. NACA 4412 kanadının farklı hızlarda C_D değerlerinin karşılaştırılması	40
Şekil 6.11. NACA 4412 kanadının farklı hızlarda sürükleme polarının karşılaştırılması...41	
Şekil 6.12. NACA 4412 kanat profilinin 20° 'de basınç dağılımları; a) 14 m/s, b) 18 m/s, c)22m/s.....	41
Şekil 6.13. NACA 0015 kanadının farklı dimple yapılarında C_L değerlerinin karşılaştırılması	43
Şekil 6.14. NACA 0015 kanadının farklı dimple yapılarında C_D değerlerinin karşılaştırılması	43
Şekil 6.15. NACA 0015 kanadının farklı dimple yapılarında C_L/C_D oranlarının karşılaştırılması	44
Şekil 6.16. NACA 0015 kanadının kare dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) $17,5^\circ$, b ve e) $22,5^\circ$, c ve f) $27,5^\circ$	45
Şekil 6.17. NACA 0015 kanadının üçgen dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) $17,5^\circ$, b ve e) $22,5^\circ$, c ve f) $27,5^\circ$	46
Şekil 6.18. NACA 0015 kanadının küre dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) $17,5^\circ$, b ve e) $22,5^\circ$, c ve f) $27,5^\circ$	48
Şekil 6.19. NACA 4412 kanadının farklı dimple yapılarında C_L değerlerinin karşılaştırılması	50
Şekil 6.20. NACA 4412 kanadının farklı dimple yapılarında C_D değerlerinin karşılaştırılması	50
Şekil 6.21. NACA 4412 kanadının farklı dimple yapılarında sürükleme polarlarının karşılaştırılması	51
Şekil 6.22. NACA 4412 kanadının kare dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) $17,5^\circ$, b ve e) $22,5^\circ$, c ve f) $27,5^\circ$	51

Şekil	Sayfa
Şekil 6.23. NACA 4412 kanadının üçgen dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) 17,5°, b ve e) 22,5°, c ve f) 27,5°	53
Şekil 6.24. NACA 4412 kanadının küre dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) 17,5°, b ve e) 22,5°, c ve f) 27,5°	55
Şekil 6.25. NACA 0015 kanadının düz ve dimple yapısında C_L değerlerinin karşılaştırılması	57
Şekil 6.26. NACA 0015 kanadının düz ve dimple yapısında C_D değerlerinin karşılaştırılması	57
Şekil 6.27. NACA 0015 kanadının düz ve dimple yapısında C_L/C_D oranlarının karşılaştırılması	58
Şekil 6.28. NACA 0015 kanadının düz ve küre dimple yapısında hız vektörleri a ve c) 17,5°, b ve d) 22,5°	58
Şekil 6.29. NACA 0015 kanadının düz ve küre dimple yapısında türbülans kinetik enerjileri a ve c) 17,5°, b ve d) 22,5°	59
Şekil 6.30. NACA 4412 kanadının düz ve dimple yapısında C_L değerlerinin karşılaştırılması	61
Şekil 6.31. NACA 4412 kanadının düz ve dimple yapısında C_D değerlerinin karşılaştırılması	61
Şekil 6.32. NACA 4412 kanadının düz ve dimple yapısında sürüklenme poları karşılaştırılması	62
Şekil 6.33. NACA 4412 kanadının düz ve küre dimple yapısında hız vektörleri a ve c) 20°, ve d) 22,5°	62
Şekil 6.34. NACA 4412 kanadının düz ve küre dimple yapısında türbülans kinetik enerjileri a ve c) 20°, b ve d) 22,5°	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

c	Veter uzunluğu
C_D	Sürükleme katsayısı
C_L	Kaldırma katsayısı
C_L/C_D	Aerodinamik verim
D	Sürükleme kuvveti
L	Kaldırma kuvveti
k	Türbülans kinetik enerji
m/s	Hız birimi (SI Unit)
Re	Reynolds sayısı
v	Kinematik viskozite
ε	Türbülans dağılma oranı
ρ	Akışkan yoğunluğu
μ	Dinamik viskozite
α	Hücum açısı

Kısaltmalar

Açıklamalar

CFD	Computational Fluid Dynamic
DES	Detached Eddy Simulation
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
LES	Large Eddy Simulation
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
S-A	Spar Allmaras türbülans modeli

Kısaltmalar

Açıklamalar

SST

Shear Stress Transport

VAWT

Vertical Axis Wind Turbine



1. GİRİŞ

Dünya ülkelerinde ve ülkemizde, ekonomik büyüme, sanayileşme ve artan nüfusa paralel olarak enerjiye duyulan ihtiyaç günbegün artmaktadır. İnsanların hayat kalitesinin daha iyi olması, üretimin sağlanması ve ekonomik faaliyetlerin gerçekleştirilmesi için artan bu enerji talebinin karşılanması gerekmektedir. Talep edilen enerjinin büyük bir bölümü fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Özellikle 20. yüzyılda fazlaca kullanılan kömür, doğal gaz ve petrol gibi yakıtlar ozon tabakasının delinmesine ve küresel ısınmaya sebep olarak ciddi bir çevre kirliliğine yol açmaktadır. Ayrıca, sonlu olan bu yakıtların yakın gelecekte biteceğinin anlaşılmasıyla ve dünya çapında bu durumun fark edilmesi sonucunda ülkeler enerji politikalarında değişime gitmeye çalışmışlardır. Artan enerji talebini karşılamak ve çevreye zararlı olan fosil yakıtların kullanımında azalma sağlamak için yeni enerji kaynakları arayışı başlamıştır. Bu sayede yenilenebilir enerji kavramı ortaya çıkmıştır. Yenilenebilir enerji, sürekli olarak gerçekleşen doğal süreçlerdeki mevcut enerji akışından sağlanan enerji olarak tanımlanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilir olması, bu kaynaklara ilginin artmasını sağlamıştır. Bu enerji kaynaklarından biri de rüzgar enerjisidir [1,2].

Rüzgar enerjisi, ilk başlarda sulama ve yel değirmenlerinde tahıl öğütmek amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca, buhar motorlarının icadından önce yelken kullanan gemilerde itme kuvvetini sağlamak için de kullanılmıştır. Sanayi devrimi ile makineleşmenin artması sonucunda popülerliğini yitirmiştir. 20. yüzyılın başlarında elektrik üretim amaçlı kullanılmaya başlanmasına rağmen istenilen zamanda enerji elde edilememesi, fosil yakıtların daha ucuz olması ve bunların kullanılmasından dolayı 1960'lı yıllardan sonra rüzgar enerjisi kullanımı azalmıştır. Ancak yaşanan petrol krizi (1973) ile yenilenebilir enerji kaynaklarına geri dönüş yaşanmıştır. Özellikle 1990'lı yıllar ile birlikte rüzgar enerjisi dünyanın birçok yerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [3,4].

Rüzgar, alçak ve yüksek basınç bölgelerindeki havanın yüksek basınçtan alçak basınca hareket etmesiyle oluşan hava akımıdır. Bu akımın sahip olduğu kinetik enerji rüzgar enerjisini oluşturmaktadır. Rüzgar türbinleri (RT), rüzgarın sahip olduğu bu enerjiden faydalanmak için kullanılmaktadır. Rüzgardaki hareket enerjisini önce mekanik enerjiye daha sonra ise elektrik enerjisine çeviren RT'ler, yatay eksenli (HAWT) ve dikey eksenli (VAWT) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [5].

RT'lerin gelişimi ve veriminin iyileştirilmesi için rotor kanatları önemli bir yere sahiptir. Üretilen enerjinin maliyetini azaltmada uygun kanat modeli (airfoil) önemli faktörlerden biridir. Bu bağlamda, RT'lerde geliştirilen kanat model geometrisi, aerodinamik performansı ve tüm RT verimini etkilemektedir [6]. Günümüzde kullanılmakta olan kanatlar, orijinal olarak uçaklar için geliştirilen ilk NACA kanat profillerinden, özel rüzgar türbini kanatlarına kadar değişmektedir. Rüzgar türbini kanatları, tasarım noktası seçimi, tasarım dışı özellikler ve yapısal özellikler bakımından geleneksel havacılık kanatlarından farklı olmalıdır. Rüzgar türbini kanatlarının gelişimi 1980'lerin ortalarından bu yana devam etmektedir [7].

Diğer yandan, havacılık, insanlar için her zaman ilgi çekici ve merak uyandıran bir konu olmuştur. Uçma eylemine olan ilgiyle başlayan bu serüven, gelişen teknoloji sayesinde yıllarca değişime uğrayarak bugünkü konumuna gelmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalardan biri de hava araçlarının aerodinamik performansını geliştirmeye yönelik çalışmalardır. Bu amaçla, uçakların temel elemanlarından biri olan kanatların modellerinde iyileştirmeler yapılarak kanat verimini arttırmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Tezin amacı

Rüzgardan enerji elde etmek amacıyla kullanılan RT'lerin ve hava araçlarının kanat performansını sayısal olarak incelemek amacıyla ANSYS FLUENT kullanılarak yapılan bu çalışmada, NACA 0015 ve NACA 4412 kanat modelleri için tasarım geliştirilmesi amaçlanmıştır. Hıza bağlı olarak farklı Reynolds sayılarında aerodinamik kuvvetlerin değişimi incelenmiştir. Buna ek olarak aerodinamik performansı arttırmak için kanat üst yüzeyine çukur yapısı (dimple) eklenerek daha fazla kaldırma ve daha az sürükleme elde etmek amaçlanmıştır. Kare, üçgen ve küre olmak üzere 3 farklı dimple yapısı ile analizler yapılarak en iyi aerodinamik performansı sağlayan dimple yapısı belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

RT'lerin ve hava araçlarının performansını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. RT'lerde ve havacılıkta kullanılan NACA kanatlarının geometrisi performansı etkileyen önemli unsurlardan biridir. Bu yüzden kanat model geometrisinin iyileştirilmesinin aerodinamik performansı (C_L/C_D) geliştireceği aşikardır. Bu amaç doğrultusunda, düz kanatlar ve dimple yapısına sahip kanatlar ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada düz kanatlar ve dimple yapısına sahip kanatlar için yapılan çalışmalar sırasıyla verilmiştir.

2.1. Düz Kanat ile İlgili Çalışmalar

Kevadiya M. ve Vaidya H., NACA 4412 kanat modelini $0-12^\circ$ hücum açıları arasında 18 m/s akış hızına bağlı olarak 1×10^5 Re sayısında incelemiştir. Çalışmada Spalart-Allmaras türbülans modeli kullanılmıştır. Elde edilen verilen doğrultusunda C_L ve C_D değerleri hesaplanarak 8° 'ye kadarki hücum açılarında kaldırma/sürüklenme (C_L/C_D) oranının arttığı, buradan sonra ise C_L/C_D değerinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır [8].

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 incelemiştir. Deney sonuçları, rüzgar 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. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları paralellik göstermiştir [9].

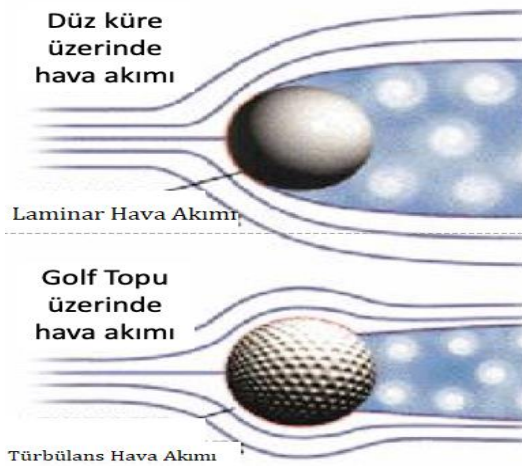
Mizoguchi M. ve diğerleri, $5,2 \times 10^4$ Re sayısında düşük kanat açıklık oranlarının tutunma kaybı karakteristiğine etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. $0,5$ ile $1,5$ değer aralığında $0,1$ artışlarla incelenen kanat açıklık oranı etkisi ile oranın azaldıkça maksimum kaldırma katsayısının arttığı ve yüksek açılarda aerodinamik verimdeki değişimin önemsiz olduğu sonucuna ulaşılmıştır [10].

R. I. Rubel ve diğeri, NACA 0015 kanat modelini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Düşük hızlı rüzgar tüneline deneysel analiz yapılırken, ANSYS FLUENT ile sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Farklı hızlarda 0° ile 20° arasında, 5° hücum açısı aralıklarında gerçekleştirilen analizler doğrultusunda Re arttıkça C_L değerinin arttığı, C_D değerinin ise azaldığı sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca sayısal modellemenin iyi sonuçlar verdiği ve rüzgar tüneli gibi masraflı deneysel çalışmalar yerine sayısal sonuçların kanat modeli özelliklerini belirlemede yeterli olduğu vurgulanmıştır [11].

Petinrin M. O. ve Onoja V. A., NACA 4412 kanat modelini 1×10^6 ila 13×10^6 Re sayısında, -10° ile 18° arasında, 2° hücum açısı aralıklarında, 2 boyutta sayısal olarak incelemiştir. Re arttıkça kaldırma kuvvetinin maksimum değeri arttığı için tutunma kaybının gerçekleştiği açının da arttığı gözlemlenmiştir. Re sayısı arttıkça maksimum kaldırma katsayısının da arttığı sonucuna ulaşılmıştır [12].

2.2. Dimple Yapısına Sahip Kanat için Yapılan Çalışmalar

RT'lerin ve hava araçlarının performansını etkileyen önemli unsurlardan biri kanat yapısıdır. Bu sebeple kanat profili geometrisinin geliştirilmesinin aerodinamik performansı aynı ölçüde geliştireceği aşikardır. Bu kapsamda, literatürde kanat geometrisi üzerine birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Literatürde yapılan bu çalışmalarda, aerodinamik performans analizleri gerçekleştirmek için kanat yüzeylerinin belirli bölgelerine içbükey ve dışbükey olmak üzere farklı geometrik yapılarda modeller eklenmiştir. Bu modeller kanat yüzeyinde türbülansın daha erken oluşmasını sağlayarak akış ayrılmasının geciktirir. Bu sayede tutunma kaybının başladığı açı artar ve sürüklenme azalır. Yüksek tutunma kaybı açılarında daha yüksek kaldırma elde edilir. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere çukurlu golf topu, pürüzsüz yüzeye göre daha az sürüklenme kuvvetine sahiptir. Çukurlar türbülansı sınır tabakası oluşturarak akış ayrılmasının geciktirmektedir. Akışın yüzeyden daha geç ayrılması sonucunda golf topunun arka kısmında alçak basınç oluşması ile daha dar iz bölgesi oluşmaktadır [13]. Böylece sürüklenme kuvvetinde azalma gerçekleşecektir. Golf topunun çukurlu yüzeyine benzer olarak kanat yüzeyine bu yapılar eklenerek sürüklenme kuvvetini azaltılmakta ve tutunma kaybı sırasında daha dengede bir profil sağlamaktadır [14].



Şekil 2.1. Golf topunda akış ayrılması [15]

Srivaastav D., NACA 0018 kanat modelinin aerodinamik karakteristiğini, iç bükey ve dış bükey dimple kullanarak 2 boyutta sayısal olarak incelemiştir. 20 m/s giriş hızında yapılan çalışmada $k-\omega$ türbülans modeli kullanılmıştır. En iyi sonucu veren dimple geometrisi belirlendikten sonra, bu modeli farklı şekillerdeki dimple yapıları kullanılarak 3 boyutlu olarak analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler incelendiğinde, kanat yüzeyine yerleştirilen dimple yapısının yüzeylerde daha çok türbülans yaratarak sınır tabakası ayrılmasını geciktirdiği ve böylece girdap oluşumunu azalttığı tespit edilmiştir [16].

Wang X. Y. ve diğerleri, pürüzsüz ve dimple yüzeye sahip iki farklı NACA 0018 kanat modelini FLUENT programını kullanarak 3 boyutlu olarak incelemiştir. 20 m/s hızda 320 000 Re sayısında gerçekleştirilen analizde dimple yapısına sahip yüzeyin sürüklenme katsayısını azalttığını ve kaldırma katsayısını artırdığını gözlemlenmiştir. 10° 'ye kadarki hücum açılarında düz kanattaki sürüklenme kuvvetinin dimple yapısına sahip kanattaki sürüklenme kuvvetinden daha az olduğu, ancak bu açıdan sonra pürüzlü kanattaki sürüklenme kuvvetinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir [17].

Rajasai B. ve diğerleri, NACA 2412 kanat profili için farklı kanat açıklık oranlarında dimple etkisini ANSYS FLUENT kullanarak incelemiştir. 20 m/s hızda 0° ile 20° arasında, 5° hücum açısı aralıklarında yapılan analizlerde, düz ve dimple yapısına sahip kanat olmak üzere iki farklı kanat profili karşılaştırıldığında, kanat üzerindeki dimple yapısının sürüklenme kuvvetini azalttığı ve daha yüksek bir kaldırma kuvveti sağladığı görülmüştür. Böylece, dimple etkisi ile tutunma kaybı açısı artmıştır. Bu durum, kanadın manevra yeteneğinin gelişmesine ve yakıttan tasarruf edilmesine olanak sağlamıştır [18].

Mustak R. ve diğerkleri, NACA 4415 kanat profiline 5 farklı dimple (dışbükey küre, içbükey küre, altıgen, dairesel ve dairesel-altıgen kombinasyonu) ekleyerek incelemiştirler. Dimple yapısı sayesinde akış ayrılmasında gecikme meydana gelmiştir. Düz kanatlarla kıyaslandığında, dimple yapısına sahip kanat modelinde kaldırmanın daha iyi olduğu gözlemlenmiştir [19].

Devi P. B. ve Shah D. A., NACA 0012 kanat modeli üzerine kare, dikdörtgen ve üçgen olmak üzere 3 farklı içbükey dimple yapısı ekleyerek oluşturulan kanat profillerini düşük Re sayılarında sayısal olarak incelemiştirler. Analizler, 0° ile 20° arasındaki hücum açısı değerleri için ve k- ω SST türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dimple yapısı eklenmesi ile tutunma kaybı açısı 15° 'den 18° 'ye çıkmıştır. Ayrıca aerodinamik verimde artış gözlenmiştir [20].

Livya E. ve diğerkleri, NACA 0018 kanat yapısının aerodinamik performansı hem deneysel hem sayısal olarak incelemiştir. İrtifa kaybı açısındaki akış ayrılmasını geciktirerek hava aracının manevra yeteneğini geliştirmek için sürtünmenin azalması, kanada dimple yapısı ekleyerek sağlanmıştır. 30 m/s ve 60 m/s hızlarda ve farklı hücum açılarında gerçekleştirilen sayısal analizlerde yarım küre, silindir, altıgen ve kare dimple modelleri kullanılmıştır. İncelemeler sonunda dimple etkisi ile aerodinamik verim (C_L/C_D) artmış olup uçaklar için gelişmiş performans sağlayan maksimum verim elde edilmiştir [14].

Soh Z. P. ve Al-Obaidi A. S. M., NACA 0012 kanat modelinin yüzeyine dimple ekleyerek aerodinamik verimin iyileştirilmesini ve dimple geometrisi değiştirildiğinde verim üzerindeki etkisinin neler olacağını incelemiştirler. Çalışmada asıl elde edilmek istenen en yüksek aerodinamik verimi sağlayan en iyi dimple geometrisini bulmaktır. ANSYS FLUENT kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde kare, üçgen ve eliptik dimple yapıları ile analizler yapılarak en iyi sonucu veren dimple yapısı kanadın hem alt yüzeyine hem üst yüzeyine hem de her iki yüze yerleştirilmiştir. Spalart-Allmaras türbülans modeli kullanılan çalışmada en iyi sonuç eliptik dimple ile elde edilmiştir. Ayrıca sadece alt yüzeye yerleştirilen dimple diğerk konfigürasyonlara göre daha iyi sonuç vermiştir [21].

Saraf A. K. ve diğerkleri, NACA 0012 kanat modelini düz kanat ve dimple yapısına sahip kanat olarak 2 boyutta sayısal olarak analiz etmişlerdir. k- ϵ türbülans modeli kullanılan analizde düz ve dimple yapısına sahip kanat modellerinin kaldırma ve sürüklenme katsayıları

karşılaştırılmıştır. Dimple yapıları kanadın üst yüzeyinde, 4 farklı yere eklenmiştir. Ağ yapısından bağımsızlık sağlanan bu çalışmada hücum açıları değiştirilirken akış hızı sabit tutulmuştur. Sonuçlara göre veter uzunluğunun %75'ine yerleştirilen dimple yapısına sahip kanatta kaldırma katsayısı düz kanadın kaldırma katsayısına göre %7 artmıştır. Ayrıca sürüklenme katsayısında %3'lük bir azalma gözlemlenmiştir [22].

Maheswaran R. ve Manikandan R., tutunma kaybı açısındaki akış ayrılmasını geciktirerek uçakların manevra yeteneğini geliştirmek amacıyla NACA 0018 kanat modeline dimple ekleyerek sayısal analiz gerçekleştirmişlerdir. 30 m/s akış hızında hücum açısı -5° ile 15° arasında, 5° hücum açısı aralıklarında gerçekleştirilen analizlerde, dairesel olarak içbükey ve dışbükey dimple yapıları kullanılmıştır. Elde edilen bulgulara göre C_L/C_D oranı artması ve böylece hava taşıtı için daha yüksek performans sağlayan maksimum aerodinamik verimlilik sağlanması dimple etkisini desteklemektedir [23].

Bu çalışmada, NACA 0015 ve NACA 4412 kanat modeli sayısal olarak incelenmiştir. 14 m/s, 18 m/s ve 22 m/s rüzgar hızlarına bağlı olarak, sırasıyla, 91 063, 117 082 ve 143 100 Re sayılarında yapılan analizlerde kanat açıklık oranı 3 olarak belirlenmiştir. Kanat performansının geliştirilmesine yönelik olarak kanat üst yüzeyine 3 farklı dimple yapısı eklenmiştir. En iyi performansı veren dimple yapısı belirlenmiştir. Kanat modelinin geometrisi SOLIDWORKS CAD programında elde edildikten sonra ANSYS FLUENT programında aerodinamik performans analizleri gerçekleştirilmiştir.



3. KURAMSAL KAVRAMLAR

3.1. Temel Aerodinamik

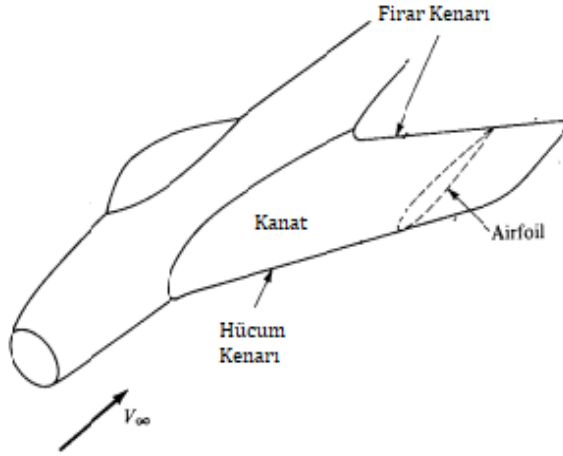
Aerodinamik analizlerde viskozite etkisi önemlidir. Akışkanın sahip olduğu viskozite özelliği, akışkan ile yüzey arasında bir sınır tabaka oluşmasına sebep olur [24]. Belirli bir Re sayısı altında akışkan, düzenli hareket ediyor olarak görülmektedir. Viskoz sıvılarda görülmekte olan bu akış, laminar akış olarak adlandırılmaktadır. Yüksek hızlarda ise hız dalgalanmaları sonucunda oldukça düzensiz olan akışlar meydana gelmektedir. Bu tür akışlara türbülanslı akış denilmektedir. Osborne Reynolds tarafından, bu iki akışı ayırt etmek için ve karşılaştırma sağlayabilmek amacıyla formül türetilmiştir. Hesaplanan değerin büyüklüğüne göre akışın karakteristiği belirlenmektedir [25].

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

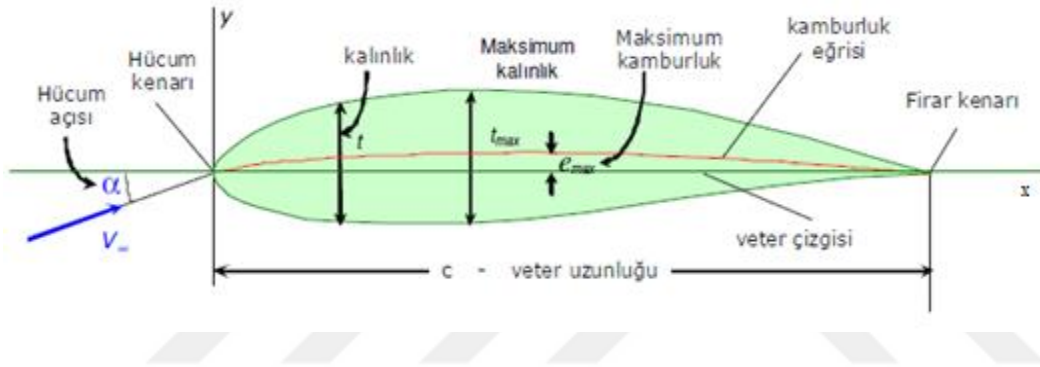
Burada, V , akışın ortalama hızını; L , geometrinin karakteristik uzunluğunu; ρ , akışkan yoğunluğunu ve μ ise dinamik viskoziteyi ifade etmektedir.

3.2. Aerodinamik Terimler

Kanadın birinci işlevi kaldırma kuvveti oluşturmaktır. Bu kuvvet, kanat profili (airfoil) denilen kanadın kesit alanı tarafından üretilmektedir. Kanat, kanat boyunca sabit veya sabit olmayan bir kesite sahip olabilir. Kanat, üç boyutlu bir bileşendir, kanat profili ise iki boyutlu bir kesittir [26]. Literatürde yapılan çalışmalarda yaygın olarak Şekil 3.1 ve 3.2’de görüldüğü üzere bu kesit alanı kullanılarak analizlerin gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.1. Kanat ve kanat profili [27]



Şekil 3.2. Kanat profilinin geometrik parametreleri [28]

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere kanat profil yapısında bazı temel terminolojiler vardır. Bunlar kısaca belirtilmiştir.

Veter Uzunluğu, c , hücum kenarı ile fırar kenarından geçen çizgi veter çizgisi, chord line, olarak adlandırılır. Kanat modeli kenarları arasındaki uzaklığa ise veter uzunluğu, chord length, denmektedir.

Hücum Kenarı, kanat modelinin uçuş doğrultusuna göre en öndeki noktadır.

Fırar Kenarı, kanat modelinin uçuş doğrultusuna göre en sondaki noktadır.

Hücum Açısı, α , veter uzunluğu ile akış doğrultusu arasındaki açıdır.

Kamburluk Eğrisi, veter uzunluğu boyunca kanadın yüzeyleri arasındaki orta noktaların birleştiği yerlerdir. Veter doğrultusuna göre yüzeyler arasındaki uzaklıklar eşit ise bu kanat

modelleri simetrik olarak adlandırılmaktadır. Kamburlu kanat modeli, simetrik olmayan modeldir. Kamburluk değerinin en fazla olduğu değer *maksimum kamburluktur*. Kamburluk oranı, γ , ile maksimum kamburluk, e_{max} , arasındaki ilişki verilmiştir.

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

Kamburluk oranı, kamburluğun en fazla olduğu değer veter uzunluğuna oranı olarak tanımlanmaktadır.

- Uçak kanatlarında % 1 – 4
- Kompresör ve türbin paletlerinde % 8 – 10

Kalınlık, kanat modellerinin basık yapısıdır. Hücüm kenarında sıfır olan kalınlık, firar kenarına doğru gidildikçe değeri değişir. Veter uzunluğu boyunca değişen kalınlığın en büyük olduğu değer *maksimum kalınlık* olarak adlandırılmaktadır. Kalınlık oranı, δ , ile maksimum kalınlık, t_{max} , arasındaki ilişki verilmiştir.

$$\delta = \frac{t_{max}}{c} \quad (3.3)$$

Kalınlık oranı, kalınlığın en fazla olduğu değer veter uzunluğuna oranı olarak tanımlanmaktadır.

- $\delta < \%10$ ince profil
- $\delta \sim \%10-14$ orta kalınlıkta profil
- $\delta > \%14$ kalın profil

NACA Kanat Profilleri

Bir cismin şekli, cisim üzerindeki akışta önemli bir etkiye sahiptir [29]. Havacılıkta ve RT'lerde kullanılan kanatlar için bu kanatlardaki akışı etkileyen birçok farklı yapıda kanat profili bulunmaktadır. Havacılık Ulusal Danışma Komitesi (NACA) kanat modelleri, en güvenilir kaynaklardan ve yaygın olarak kullanılan veritabanlarından biridir [26]. NACA kanat profilleri Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından üretilmiştir. En çok

ilgilenilen 4, 5 ve 6 digit olmak üzere 3 NACA kanat profili grubu vardır. Bu tez çalışmasında 4 digit NACA kanat modellerinden NACA 0015 ve NACA 4412 kanat profilleri kullanılmıştır.

3.3. Aerodinamik Kuvvetler

Aerodinamik kuvvetler, hava akışına maruz kalan nesnelere yaşadığı, zamanla değişen kuvvetlerdir. Bu kuvvetlerin etkisi, nesnelere şekline ve boyutuna bağlıdır. Uçak gibi akım çizgisi gövdesine etki eden aerodinamik kuvvet, bir kaba cisme etki eden kuvvetten farklıdır. Aerodinamik kuvvetler olmadan uçaklar uçamaz. Bu nedenle, bir uçağın performansını göz önüne alırken, aerodinamiğin hayati bir yönü vardır. İyi aerodinamik felsefesi temel olarak düşük sürtünmeden kaynaklanmaktadır [30]. Sürtünme, istenmeyen bir etkidir ve en aza indirmek için çalışmalar yapılır. Sürtünmenin azaltılması otomobillerde, denizaltılarda ve uçaklarda yakıt tüketiminin azaltılmasıyla yakından ilgilidir [29]. Bir uçağa etki eden dört temel aerodinamik kuvvet vardır.

- Sürükleme (Drag) Kuvveti
- İtme (Thrust) Kuvveti
- Ağırlık (Weight) Kuvveti
- Kaldırma (Lift) Kuvveti

Sürükleme kuvveti, uçağın ilerlemesini zorlaştıran yani hava akımına karşı gösterdiği dirençtir. Havanın sürtünme direncine maruz kalan uçak parçalarının yol açtığı parazit sürükleme ve kanat hücum açısından kaynaklanan indüksiyon sürükleme olmak üzere iki çeşit sürükleme kuvveti vardır.

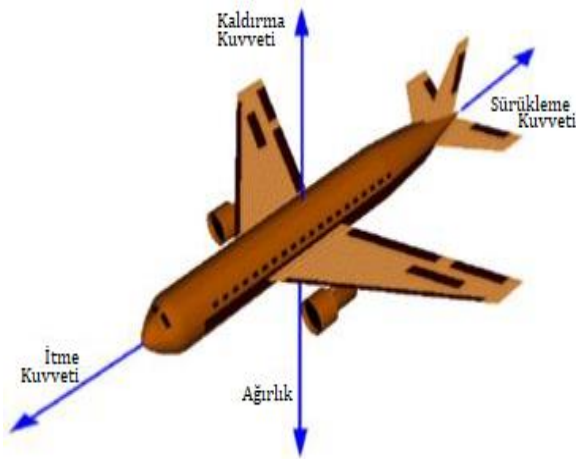
İtme kuvveti, ileri doğru hareketin gerçekleşmesi için gereken kuvvettir ve motorlar tarafından sağlanmaktadır.

Ağırlık kuvveti, yerçekim etkisinden kaynaklanan aşağı yönlü bir kuvvettir.

Kaldırma kuvveti, havada tutunmayı sağlayan bu kuvvet uçaklarda kanatlar tarafından elde

edilir. Motor gerekli itme gücünü sağladığında uçak hızlanmaya başlar. Kanadın aerodinamik yapısından dolayı kaldırma kuvveti oluşur. Bu kuvvet, Bernoulli ilkesine dayanmaktadır. Bernoulli ilkesine göre, akışkan bir cisim yüzeyinde hareket ederken cismin başlangıcından sonuna kadar aynı zamanda ulaşır. Yarım damla şeklinde olan uçak kanadında akışkan alt yüzeyde daha yavaş hareket ederken üst yüzeyde hızı daha fazladır. Bu yüzden, üst yüzeyde düşük basınç, alt yüzeyde ise yüksek basınç oluşur.

Uçağa etki eden aerodinamik kuvvetler incelendiğinde uçağın yatay eksenli hareketinde, itme, sürüklemeye eşit olursa uçak sabit hızda uçuşa devam eder. Eğer itme kuvveti, sürüklenme kuvvetinden daha fazla ise uçak hızlanır. Buna ek olarak, kaldırma kuvvetinin ağırlığa eşit olması uçağın sabit bir irtifada olduğu anlamına gelir. Kaldırmanın ağırlık kuvvetinden fazla olma durumunda ise uçak irtifa kazanır.



Şekil 3.3. Hava aracına etki eden aerodinamik kuvvetler [11]

3.4. Aerodinamik İfadeler

3.4.1. Sürüklenme ve kaldırma katsayıları

Sürüklenme (D) ve kaldırma (L) kuvvetleri, akışkanın yoğunluğuna, ρ , akış hızına, V , cismin büyüklüğüne, şekline ve yönüne bağlıdır [31]. Bu kuvvetleri çeşitli durumlar için listelemek pratik değildir. Bunun yerine, sürüklenme ve kaldırma özelliklerini temsil eden uygun boyutsuz numaralarla çalışmanın uygun olduğu bulunmuştur. Bu sayılar sürüklenme katsayısı, C_D ve kaldırma katsayısı C_L 'dir [29].

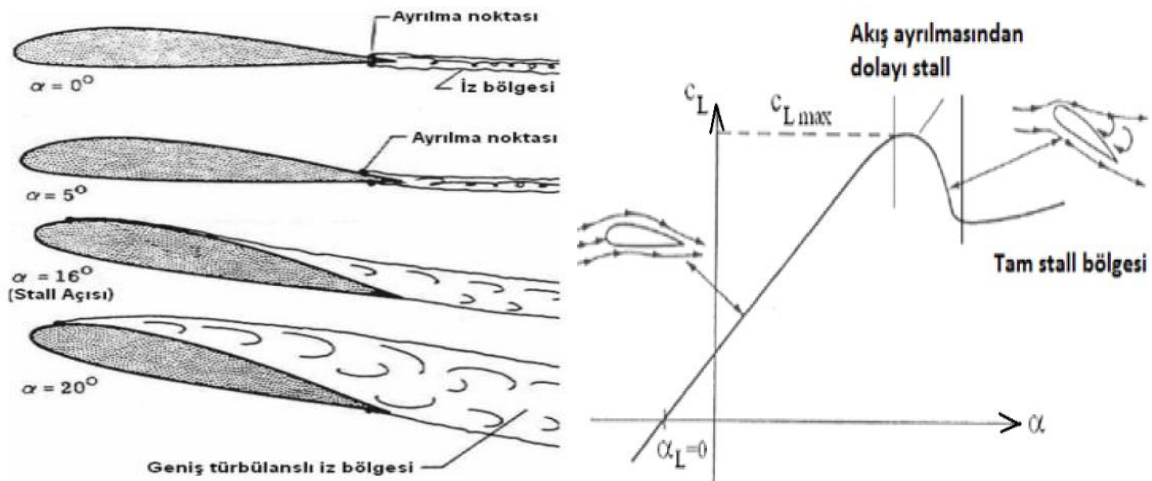
$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho_{\infty}V_{\infty}^2S} \quad (3.4)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho_{\infty}V_{\infty}^2S} \quad (3.5)$$

D, sürüklenme kuvvetini; L, kaldırma kuvvetini; ρ , akışkanın yoğunluğunu; V, akışkanın hızını ve S, kanat modelinin alanını ifade etmektedir.

3.4.2. Tutunma kaybı (Stall) ve kanat ucu vorteksi

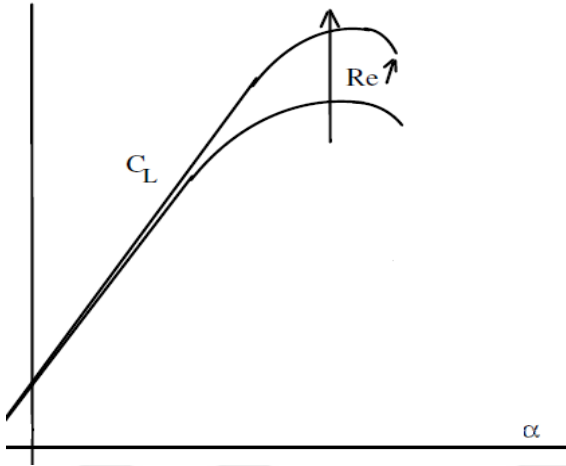
Hücum açısının artması kaldırma kuvvetini belirli bir açıya kadar arttırmaktadır. Ancak maksimum kaldırma kuvveti sağlanan hücum açılarından sonra, açı arttıkça yeterince kaldırma kuvveti elde edilemez. Hücum açısı düşük olduğunda hava, kanat yüzeyine yapışık bir şekilde hareket eder ve firar kenarından geçerek yüzeyden ayrılır. Hücum açısı arttıkça üst yüzeyde, firar kenarı etrafında akış yüzeyden ayrılır. Akışın yüzeyden ayrıldığı noktanın arkasında oluşan girdaplı akım alanı taşımadaki artışı sınırlamaktadır [32]. Daha yüksek açılarda ise akış ayrılması kanadın üst yüzeyinde, hücum kenarına daha yakın yerlerde meydana gelir. Kısaca, akışın ayrılmaya başladığı nokta kanadın firar kenarında başlayıp açı arttıkça hücum kenarına doğru devam etmektedir [13]. Akışın, yüzeyin tamamından ayrılması ile kaldırma kuvvetinde önemli bir düşüş yaşanmaktadır. Bu durum tutunma kaybı (irtifa kaybı, stall) olarak adlandırılır ve bu olayın gerçekleştiği açıya tutunma kaybı açısı denmektedir.



Şekil 3.4. Kanat profilinde akış ayrılmasının kaldırma katsayısına etkisi [33, 34]

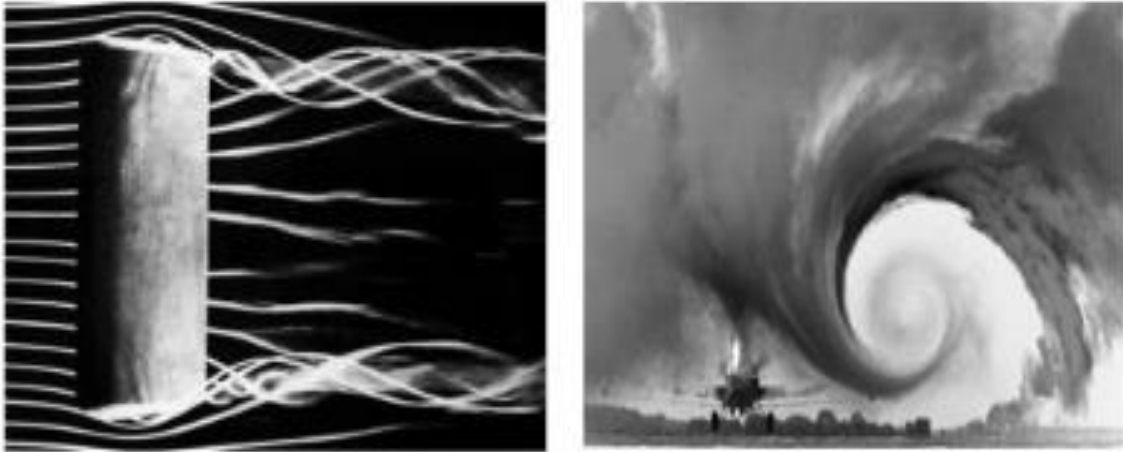
Akış hızı, tutunma kaybı açısını etkileyen faktörlerdendir. Şekil 3.5'te görüldüğü üzere hız

artıkça artan Re değeri ile daha fazla kaldırma kuvveti elde edilmektedir.



Şekil 3.5. Re sayısının kaldırma katsayısına etkisi [28]

Kanatın yüzeyleri arasında oluşan basınç farkı, kaldırma etkisi yaratmaktadır. Bu basınç farkı, akış kanattan ayrılırken firar kenarında vorteks (girdap) oluşmasına sebep olmaktadır. Akış, uç girdapları sayesinde, kanat yüzeylerine tutunmaya çalışmaktadır. Bu durum tutunma kaybı açısının gecikmesini sağlamaktadır [13].



Şekil 3.6. Kanat ucu girdapları



4. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ VE TÜRBÜLANS MODELLERİ

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), ısı transferi, akışkan akışı ve ilgili olayların bilgisayar tabanlı simülasyon yardımıyla çözümlenmesidir. Fiziğin temel kanunlarını baz alan momentum, enerji ve kütle korunum denklemleri bu yöntemin temelini oluşturmaktadır. Bu denklemler, HAD için tekrar düzenlenerek çözüm yolunu oluşturmaktadır. Analizin gerçekleştirileceği çözüm alanı, küçük alt hücrelere bölünmektedir. Sayısal metotlar ile ayrıştırlan korunum denklemlerinin çözüm alanında süreklilik sağlanması için her bir hücre yapısında akış özellikleri belirlenmektedir [35].

HAD metodu havacılık ve uzay, otomotiv, tıp ve biyomedikal, güç santralleri gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Bir kanat profili etrafındaki akış analizi teorik formüller, deneyler ya da HAD metodu ile gerçekleştirilebilmektedir. Teorik hesaplamalarda sonuçlar elde edilirken bazı kabuller yapılmaktadır. Bu durum, sonuçların doğruluğu açısından sorun yaratabilmektedir. Deneysel çalışmalar ise nispeten daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Deneyler gerçekleştirilirken birçok hücum açısında değerleri elde etmek maliyetli olmak birlikte çok zaman harcanmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, deney sonuçlarının güvenilirliği akış ayrılmasının gerçekleştiği hücum açısında azalmaktadır. HAD kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde kaldırma ve sürüklenme katsayıları gibi değerler daha kısa sürede sağlanabilmektedir. Bu metotta sonuçların güvenilirliği açısından ağ yapısının kalitesi ve türbülans model seçimi önemlidir. Bu kısımda korunum denklemleri ve türbülans modelleri açıklanacaktır.

4.1. Korunum Denklemleri

Korunum yasaları ilk olarak kapalı sistem olarak adlandırılan sabit miktarda maddeye uygulanmaktaydı. Daha sonra, kontrol hacim denilen sistemlerde de uygulanmaya başlandı [29]. Korunum gerçekleşen herhangi bir madde işlem boyunca dengede olmak zorunda olduğu için korunum denklemleri, denge denklemleri olarak da adlandırılır. HAD yönteminin temel taşı olan denklemler, bu denge kanunlarına dayanmaktadır.

Korunum ilkeleri aşağıda belirtilmiştir:

- Kütle Korunumu

- Momentum Korunumu
- Enerjinin Korunumu

4.1.1. Kütleinin korunumu

Kütleinin korunumu akışkanlar dinamiğinde, sıkıştırılamaz akışlarda, kütleinin sisteme giriş hızı ile sistemden ayrılış hızının eşit olması olarak tanımlanır. Bu durum süreklilik denklemi ile gösterilir ve diferansiyel ifadesi Eş. 4.1’de verilmiştir [36]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (4.1)$$

ρ , akışkan yoğunluğunu; U , akış hızı vektör alanını ve t , zamanı ifade etmektedir.

4.1.2. Momentum korunumu

Momentumun korunumu, Newton’un ikinci kanunundan elde edilmektedir. Bir cisme etki eden kuvvetlerin toplamı, momentum değişim oranı ile aynı olmalıdır. Momentum denkleminin gösterimi Eş. 4.2’de verilmiştir [36]:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla(\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \tau + S_M \quad (4.2)$$

τ , viskoz gerilmeleri; S_M , gövde kuvvetlerini ifade etmektedir.

4.1.3. Enerjinin korunumu.

Enerji korunumu, doğanın en temel yasalarından biri olan termodinamiğin birinci yasasına dayanmaktadır. Bir cisme ilave edilen ısı miktarı ile cisim üzerinde yapılan işin toplamı, enerjideki değişim miktarı ile aynı olmalıdır. Enerji denkleminin gösterimi Eş. 4.3’teki gibidir [36]:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U h_{tot}) = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(U \tau) + U S_M + S_E \quad (4.3)$$

4.2. Türbülans Modelleri

Türbülans modeli, deneysel araştırmalardan elde edilen çeşitli sabitlerle ortalama akış değişkenleri arasındaki dalgalı korelasyonu ilişkilendiren yarı-ampirik bir denklemdir. Türbülans modeli, her tür problem için evrensel değildir [37]. Çoğu HAD kodları, dikkate alınan akış türüne bağlı olarak uygun modelin seçilebileceği farklı türbülanslı modellere sahiptir. Kanatlar üzerindeki akışı simüle ederken, laminerden türbülanslı akışa geçiş, akış özelliklerinin belirlenmesinde ve kaldırma ve sürüklenme gibi kanat profili performansının ölçülmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, hem geçişin başlangıcı hem de kapsamı dahil olmak üzere uygun geçiş modellemesi daha doğru bir sürüklenme tahmini sağlamaktadır [38]. Farklı kanat şekilleri üzerinde birçok çalışma yapılmıştır ve farklı türbülans modelleri kullanılmıştır. Yapılan alışmalar doğrultusunda türbülans modelleri, Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes tabanlı türbülans modeli (RANS), Büyük alkantı Benzetimi (LES) ve Doğrudan Sayısal Benzetim (DES) olmak üzere 3 kategoriye ayrılmıştır. Bu çalışmalarda sıklıkla kullanılan RANS tabanlı türbülans modelleri aşağıda verilmektedir.

4.2.1. Spalart-Allmaras türbülans modeli

Spalart-Allmaras (S-A) türbülans modeli, kinematik türbülans viskozitesi için modellenmiş taşıma denklemini çözen tek denklemlidir. Özellikle duvar sınırlı akışları içeren havacılık uygulamaları için tasarlanmıştır ve ters basınç gradyanlarına maruz kalan sınır tabakaları için iyi sonuç verdiği görölmektedir. S-A modelinde taşınan değişken, $\tilde{\nu}$, türbülanslı kinematik viskozite ile aynıdır ve taşıma denklemi, Eş. 4.4'teki gibidir [39]:

$$\frac{\partial(\rho\tilde{\nu})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\tilde{\nu}u_i)}{\partial x_i} = G_\nu + \frac{1}{\sigma_\nu} \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \rho\tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_i} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_i} \right)^2 \right] - Y_\nu + S_\nu \quad (4.4)$$

G_ν türbülanslı viskozite üretim terimidir. Y_ν , duvar blokajı ve viskoz sönümlenme nedeniyle duvarın yakınında meydana gelen türbülanslı viskozitenin tahrip olmasıdır, σ_ν ve C_{b2} sabit değerlerdir. ν , moleküler kinematik viskozitedir ve S kullanıcı tanımlı bir kaynak terimidir.

Üretim Terimi, G_ν :

$$G_\nu = C_{b1} \rho \tilde{S} \tilde{\nu} \quad (4.5)$$

$$\tilde{S} \equiv S + \frac{\tilde{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}, \quad (4.6)$$

C_{b1} ve κ sabit değerlerdir, d duvardan uzaklıktır ve S ise deformasyon tensörünün skaler bir ölçüsüdür.

Tahribat Terimi, Y_v :

$$Y_v = C_{w1} \rho f_\omega \left(\frac{\tilde{v}}{d} \right)^2 \quad (4.7)$$

C_{w1} , sabit değerdir, f_ω ise sönümlenme fonksiyonudur.

Sabit değerler:

$C_{b1} = 0,1355$, $C_{b2} = 0,622$, $\sigma_{\tilde{v}} = 2/3$, $C_{w1} = 3,239$ ve $\kappa = 0,4187$ 'dir [40].

4.2.2. Standart k-ε türbülans modeli

Standart k-ε modeli, türbülans kinetik enerjisi, k , ve bunun dağılıma oranı, ε , için taşıma denklemlerine dayanan iki denklemlilik bir modeldir. Modelin oluşturulmasında, akışın tamamen türbülanslı olduğu ve moleküler viskozitenin etkileri göz ardı edilebilir olduğu varsayılmaktadır. Bu yüzden, yalnızca tamamen türbülanslı akışlar için geçerlidir [39]. Standart k-ε modeli, endüstriyel uygulamalar için en yaygın kullanılan mühendislik türbülans modelidir. Taşıma denklemi, Eş. 4.8 ve 4.9'da verilmiştir [40]:

Türbülans Kinetik Enerji, k , denklemi:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (4.8)$$

Dağılıma, ε , denklemi:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.9)$$

σ_k ve σ_ε değerleri k ve ε için türbülans Prandtl sayılarıdır. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve C_μ sabit değerlerdir. E_{ij} , deformasyon oranını temsil etmektedir. μ_t , türbülans (veya eddy) viskozitedir.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.10)$$

Sabit değerler [40]:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44, C_{2\varepsilon} = 1,92, C_\mu = 0,09, \sigma_k = 1,00 \text{ ve } \sigma_\varepsilon = 1,30$$

4.2.3. Realizable k-ε türbülans modeli

Realisable k-ε türbülans modeli, son yıllarda yeni bir model olarak literatürde yerini almıştır. "Gerçekleştirilebilir" terimi, modelin türbülanslı akışların fiziği ile tutarlı olarak normal gerilmeler üzerindeki belirli matematiksel kısıtlamaları sağladığı anlamına gelir. Türbülanslı viskozite için yeni bir formülasyon içermesi ve ortalama kare girdap dalgalanmasının taşınımı için tam bir denklemden türetilen dağılma hızı için yeni bir taşıma denkleminin oluşması, standart k-ε modelinden farklı olmasını sağlamaktadır. Taşıma denklemi, Eş. 4.11 ve 4.12'deki gibidir [41]:

Türbülans Kinetik Enerji, k , denklemi:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.11)$$

Dağılma, ε , denklemi:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (4.12)$$

G_k , ortalama hız gradyanına bağlı olarak türbülans kinetik enerji oluşumunu ifade etmektedir. G_b ise batmazlıktan dolayı türbülans kinetik enerji üretimidir. Y_M , sıkıştırılabilir türbülanstaki dalgalı genişlemenin toplam yayılma oranına katkısını temsil eder. σ_k ve σ_ε değerleri k ve ε için türbülans Prandtl sayılarıdır. $C_{1\varepsilon}$, C_2 sabit değerlerdir. S_k ve S_ε kullanıcı tanımlı kaynak terimleridir.

Sabit Değerler [40]:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44, C_2 = 1,9, \sigma_k = 1,0 \text{ ve } \sigma_\varepsilon = 1,2$$

4.2.4. Standart k- ω türbülans modeli

Standart k- ω modeli, düşük Re sayısı etkileri, kayma akışı ayrılması ve sıkıştırılabilirlik için modifikasyonları içeren Wilcox modeline dayanmaktadır. Bu model, türbülans kinetik enerjisi (k) ve spesifik dağılım oranı (ω) için taşıma denklemlerine dayanan bir modeldir. Taşıma denklemi, Eş. 4.13 ve 4.14'te verilmiştir [39]:

Türbülans Kinetik Enerji, k, denklemi:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (4.13)$$

Spesifik Dağılım Oranı, ω , denklemi:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (4.14)$$

G_k , ortalama hız gradyanına bağlı olarak türbülans kinetik enerji oluşumunu ifade etmektedir. G_ω , ω neslini, Y_k ve Y_ω , türbülans nedeniyle k ve ω dağılımını, Γ_k ve Γ_ω ise sırasıyla k ve ω 'nin etkili yayılmasını temsil etmektedir. S_k ve S_ω kullanıcı tanımlı kaynak terimleridir.

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (4.15)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (4.16)$$

σ_k ve σ_ω değerleri sırasıyla k ve ω için türbülans Prandtl sayılarıdır.

4.2.5. Shear-Stress Transport (SST) k- ω türbülans modeli

SST k- ω modeli, Standart k- ω modelinin bir varyasyonudur. Temel k- ω modeli, formülasyonun viskoz alt katmanı boyunca iç kısımdan duvarlara kadar çalıştığı sınır tabaka problemleri için kullanılabilir. Bu nedenle, Menter tarafından geliştirilen SST k- ω modeli, ekstra sönümlenme fonksiyonları olmadan düşük Re akış uygulamaları olarak kullanılabilir. Bu model, ana kayma gerilmesinin, ters basınç gradyanlı sınır katmanlarında taşınmasını hesaba katabilir. SST k- ω modeli, standart k- ω modeli ile benzer formülasyona sahiptir. Eş. 4.17 ve 4.18'de taşıma denklemi verilmiştir [39, 41]:

Türbülans Kinetik Enerji, k, denklemi:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (4.17)$$

Spesifik Dağılıma Oranı, ω , denklemi:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega \quad (4.18)$$

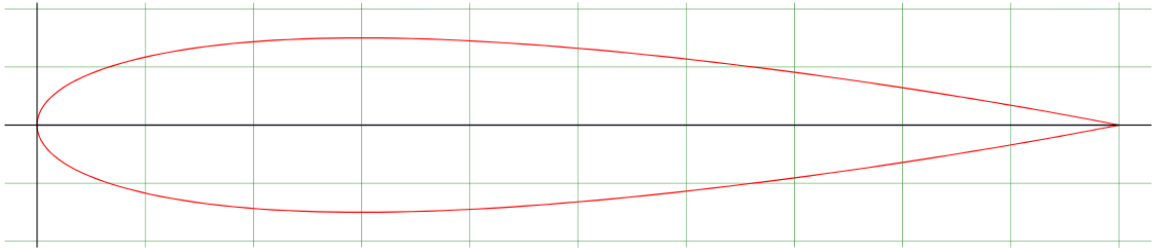
D_ω , çapraz yayılma terimini temsil etmektedir.



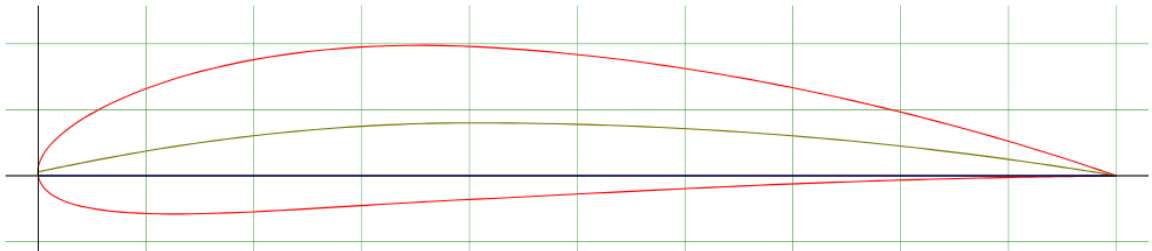
5. MATERYAL VE METOT

5.1. Kanat Geometrisi

Bu çalışmada NACA 0015 ve NACA 4412 kanat profilleri kullanılmıştır. Analizlerin gerçekleştirilmesi için seçilen kanat profillerinin koordinat noktaları elde edilmiştir. Kanat profilinde, veter çizgisinden üst yüzeye olan kalınlık ile veter çizgisinden alt yüzeye olan kalınlığın aynı olması kanadın simetrik olmasını sağlamaktadır. Kalınlıkların aynı olmadığı durumda ise kanat asimetrik bir yapıya sahiptir. NACA 0015 kanat profili simetrik bir yapıya sahip olduğu için maksimum kamburluk ve maksimum kamburluğun pozisyonu 0'dır. Kalınlık değeri %15'tir. NACA 4412 kanat profilinde ise maksimum kamburluk değeri %4 ve maksimum kamburluğun elde edildiği yer %40'tır. NACA 4412 kanat profilinin kalınlık değeri ise %12'dir. Her iki kanat, ayrı ayrı elde edilen bu koordinatlarda birleştirilen 200 nokta ile sağlanmıştır. Bu bilgiler doğrultusunda oluşturulan kanat profillerinin geometrik şekillerinin 2 boyutlu, 2D, görüntüleri Şekil 5.1 ve 5.2'de verilmiştir.



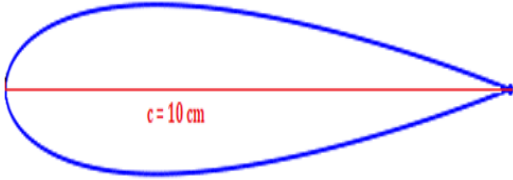
Şekil 5.1. NACA 0015 kanat profili



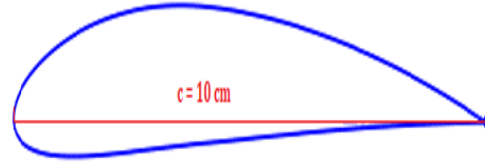
Şekil 5.2. NACA 4412 kanat profili

Bu çizimlerden elde edilen koordinat değerleri, SOLIDWORKS programına aktarılarak kanat profillerinin iki boyutlu (2D) modellenmesi için kullanılmıştır. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te görüldüğü üzere NACA 0015 ve NACA 4412 kanat modelleri için veter uzunluğu 10 cm olarak belirlenmiştir. NACA 0015 ve NACA 4412 kanat profillerinin düz kanat çizimlerinden sonra her iki kanat için dimple yapısı modellenmiştir. Dimple yapısı kanadın

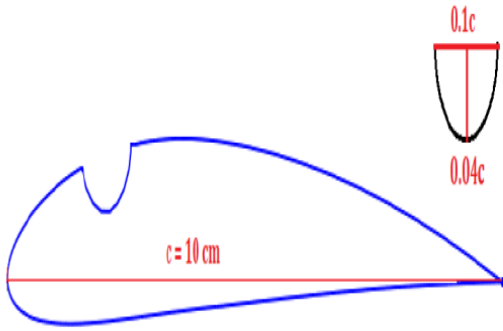
üst yüzeyine, hücum kenarından $0,2c$ uzaklıkta, çapı ve/veya genişliği $0,1c$, yüksekliği $0,04c$ olacak şekilde çizilmiştir. Kare, üçgen ve küre olmak üzere 3 dimple yapısı ile çalışılmıştır. Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7’de NACA 4412 kanadı için 3 farklı dimple yapısının çizimi gösterilmektedir.



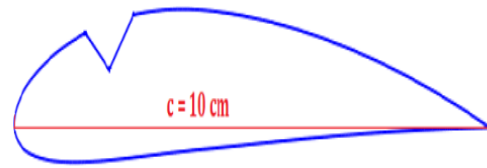
Şekil 5.3. NACA 0015 Düz kanat



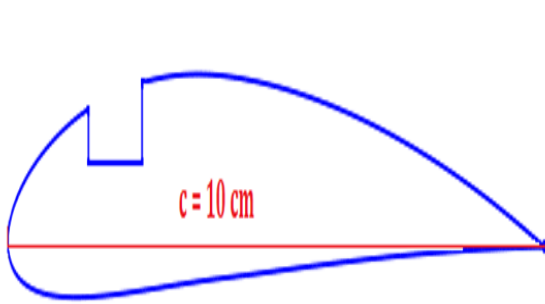
Şekil 5.4. NACA 4412 Düz kanat



Şekil 5.5. NACA 4412 Küre dimple



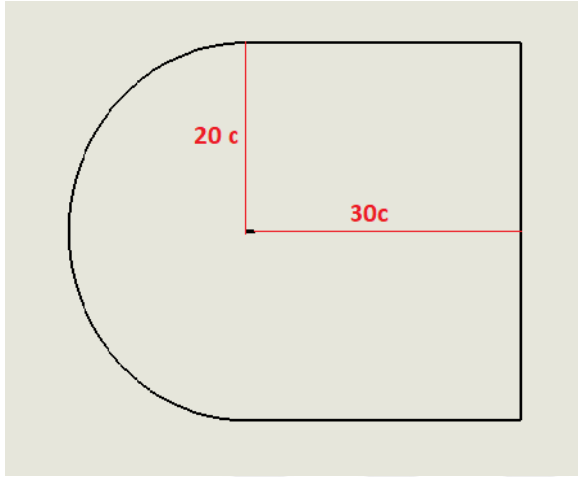
Şekil 5.6. NACA 4412 Üçgen dimple



Şekil 5.7. NACA 4412 Kare dimple

Kanat profili oluşturulduktan sonra sınır koşullarının belirtilmesi için ağ yapısının oluşturulabileceği bir yüzey belirlenmelidir [11]. Akışkan dinamiği probleminde hesap alanını doğru bir şekilde oluşturmak, modelleme sürecinin önemli bir basamağıdır. Akışın

etki ettiği alan, kanat profili etrafındaki akışın düzgün olarak üretilmesi için çok küçük olmamalıdır. Buna ek olarak, ağ sayısının ve dolayısıyla hesaplama zamanının artmasına sebep olacak kadar da büyük olmamalıdır [42]. Analizlerin düzgün yapılabilmesi için kanadın tamamını kapsayacak şekilde C-tip akış alanı kullanılmıştır. SOLIDWORKS kullanılarak elde edilen C-tip akış alanı, Şekil 5.8’de görüldüğü üzere firar kenarından $30c$ genişliğinde, hücum kenarından $20c$ yüksekliğinde çizilmiştir.

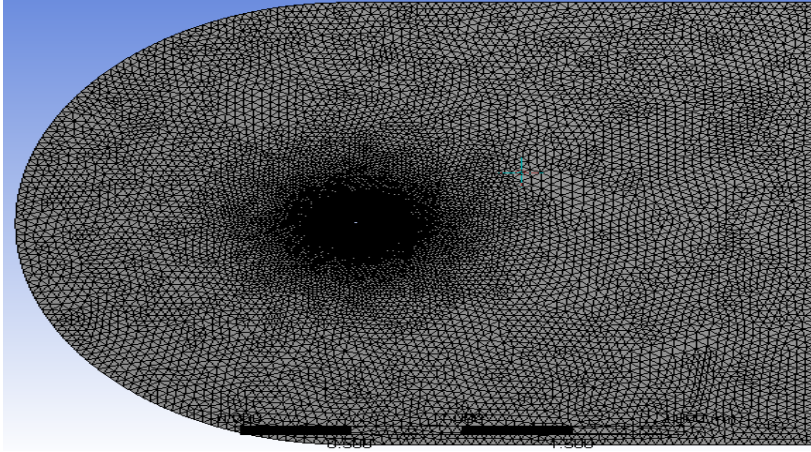


Şekil 5.8. C-Tipi akış alanı

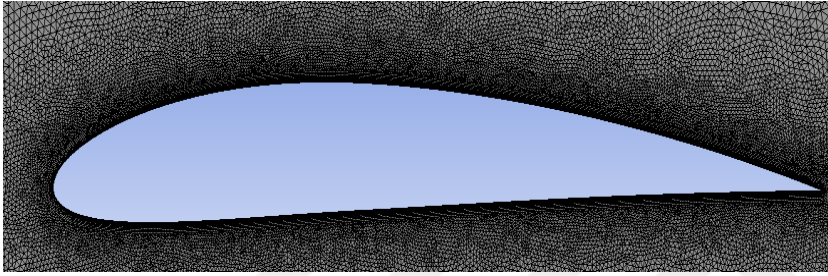
Hesaplamalı akış problemini çözmek için sonlu hacme dayalı bir CFD kodu olan ANSYS Fluent programı kullanılmıştır. C-tip akış alanı, bu programa aktarılarak sınır şartları belirlenmiştir. Uygulanan sınır şartları, giriş (inlet), çıkış (outlet) ve duvar (wall) sınır koşullarıdır. Bu aşamadan sonra akış hacminde ağ yapısı modellenmesi yapılmıştır.

5.2. Ağ Yapısı (Mesh) ve Ağ Yapısından Bağımsızlık

Akış alanı, akışı analiz etmek için daha küçük alt alanlara bölünür. Bunların her biri ağ yapısı elemanlarıdır [11]. Bu ağ yapısı elemanları, analiz sonuçlarının doğruluğunu etkileyen faktörlerden biridir. Bu yüzden ağ yapısı kalitesi çalışmada dikkat edilen hususlardan biridir. Ağ kalitesini arttırmak için kanat etrafında ‘inflation’ özelliğinden yararlanılmıştır. Şekil 5.9 ve 5.10’da görüldüğü üzere, kanat modeli etrafında daha yoğun ağ yapısı kullanılmıştır. Sebebi, kanat modeli etrafındaki eleman sayısı arttıkça daha yüksek kalitede analiz sonuçları elde edilmesidir [21]. Ayrıca, kanat profili etrafında küçük yerlerdeki akışta büyük değişimler gözlemlenmesi bu bölgede yoğun ağ yapısı seçilmesinin bir başka sebebidir [43].



Şekil 5.9. Düz kanat ağ yapısı



Şekil 5.10. Kanat modeli etrafında ağ yapısı

Analiz sonuçlarında ağ yapısı etkisi büyük olduğu için ağ yapısı belirlendikten sonra sonuçların uygunluğu kontrol edilmelidir [44]. Ağ yapısının kalitesini etkileyen faktörler çarpıklık (skewness), orthogonal kalite (orthogonal quality), eleman kalitesi (element quality) vb. olarak sıralanabilir. Ağ yapısının birincil kalite ölçütlerinden biri çarpıklıktır. 0 ile 1 arasında değerlere sahiptir. 2 boyutlu analizlerde değerler Çizelge 1'e göre iyi ya da daha iyi sınıfta yer alması gerekmektedir.

Çizelge 5.1. Hücre kalitesi – Çarpıklık değer aralığı

Çarpıklık Değeri	Hücre Kalitesi
1	Bozulmuş
0,9 - <1	Kötü
0,75 – 0,9	Düşük
0,5 – 0,75	Orta
0,25 – 0,5	İyi
>0 – 0,25	Mükemmel
0	Eşkenar

Ortogonal ve eleman kalitesi değerleri de 0 ile 1 arasında değişmektedir. En kötü değer 0; en iyi değer ise 1'dir. Çizelge 2'de görüldüğü üzere NACA0015 ve NACA 4412 kanat profilleri için elde edilen ortalama değerler, yukarıda belirtilen ağ yapısının kalite değerlerine uygundur.

Çizelge 5.2. NACA 0015 ve NACA 4412 Kanat profilleri ağ yapısı kalite değerleri

Kalite Faktörleri	Değerler (Ortalama)			
	NACA 4412		NACA 0015	
	Düz Kanat	Küre Dimple Yapı	Düz Kanat	Küre Dimple Yapı
Skewness	9,3606E-02	8,2184E-02	9,6105E-02	8,4056E-02
Orthogonal Kalitesi	0,94835	0,95073	0,94761	0,94928
Eleman Kalitesi	0,9076	0,92191	0,90125	0,92314

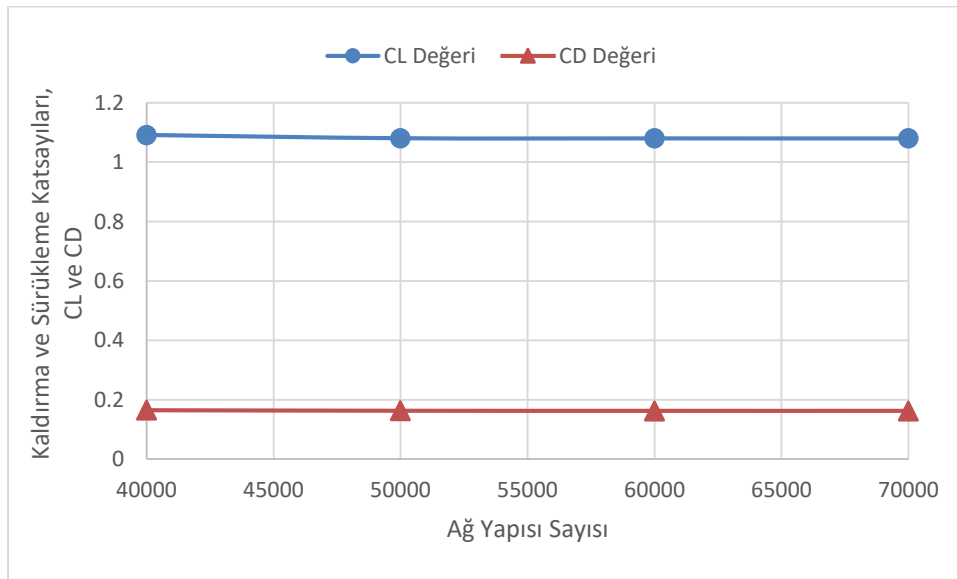
Ağ yapısı çözünürlüğü, kaldırma ve sürüklenme gibi önemli akış parametrelerini çözmek için yeterince iyi olmalıdır. Bu yüzden, sayısal analizlerde *ağ yapısından bağımsızlık* çalışması önemlidir. Bu çalışma, ağ yapısı hücrelerinde daha fazla bir artışın sonuçları değiştiremediği veya iyileştirmediği ideal ağ yapısını sağlayabilmelidir [37].

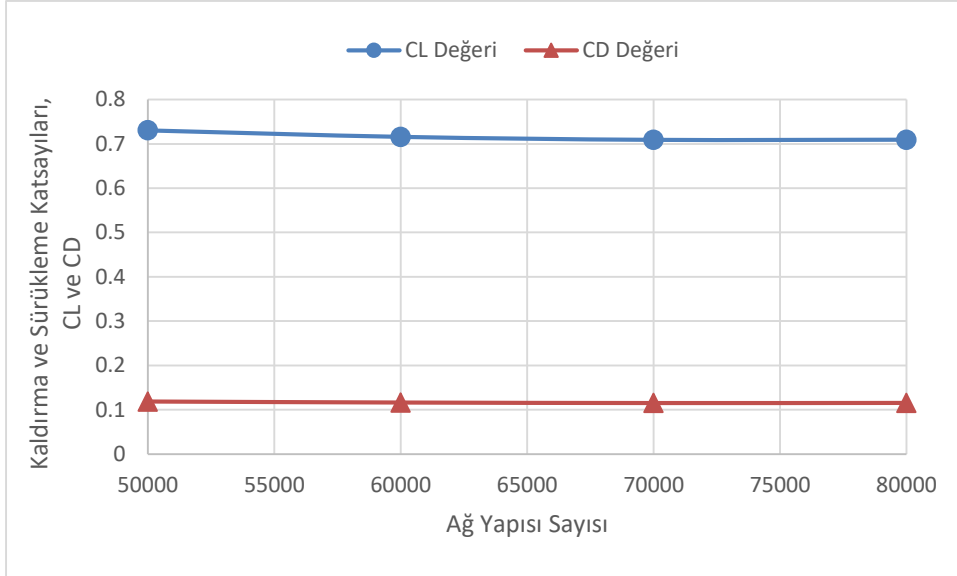
Ağ yapısı ve kalite değerleri kontrol edildikten sonra analizlerde ağ yapısından bağımsızlık sağlamak için farklı ağ yapısı sayılarında C_L ve C_D değerleri elde edilmiştir. Çizelge 3'te, 18 m/s hızda, 15° hücum açısında 5 farklı ağ yapısı değerinde NACA 0015 ve NACA 4412 kanat profili için kaldırma ve sürüklenme değerlerindeki değişim verilmiştir. NACA 4412 kanat profili için 40 000 ağ yapısında sağlanan kaldırma ile sürüklenme değerlerinin 50 000 ağ yapısında elde edilen veriler ile kıyaslandığında, C_L ve C_D değerlerindeki fark çok fazla değildir. Ancak 50 000 ile 60 000 ağ yapısı sayılarındaki kaldırma ve sürüklenme değerleri arasındaki fark çok daha küçüktür ve 50 000 ağ yapısından sonra değerlerin çok fazla değişmediği görülmektedir. Bu sebeple NACA 4412 kanat profili için ağ yapısından bağımsızlık 50 000 ağ yapısı hücresinde sağlandığı varsayılmıştır. NACA 0015 kanat modeli için ise ağ yapısından bağımsızlık elde edilen sayı 70 000 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.3. NACA 0015 ve NACA 4412 Kanat profillerinde farklı ağ sayısı ve katsayılar

		Ağ Sayısı			
Katsayılar		40 000	50 000	60 000	70 000
NACA 4412	C_L	1,09120E+00	1,08060E+00	1,08000E+00	1,0799E+00
	C_D	1,64830E-01	1,62620E-01	1,6215E-01	1,6218E-01
Katsayılar		50 000	60 000	70 000	80 000
NACA 0015	C_L	7,30650E-01	7,15750E-01	7,08850E-01	7,09170E-01
	C_D	1,18570E-01	1,16410E-01	1,15270E-01	1,15510E-01

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de sırasıyla, NACA 4412 ve NACA 0015 kanat modelleri için C_L ve C_D değerlerinin farklı ağ yapısı sayılarına göre değişimleri verilmiştir. Şekil 5.11’de NACA 4412 kanat modelinde 40 000 ağ yapısı sayısında C_L değerinin, 50 000, 60 000 ve 70 000 ağ yapısı sayılarındaki C_L değerlerine göre yüksek olduğu ancak 50 000 ağ yapısı sayısından sonra C_L değerinin sabit bir profil sergilediği görülmektedir. Şekil 5.12’de ise NACA 0015 kanat modeli için 50 000 ağ yapısı sayısında en yüksek C_L değeri gözlenmiştir. 60 000 ağ yapısı sayısından sonra bu değerdeki değerin fazla olmadığı görülmektedir. Her iki kanat modeli için de C_D değerleri, farklı ağ yapısı sayılarında birbirlerine çok yakındır.

Şekil 5.11. NACA 4412 kanat modelinde C_L ve C_D değerlerinin ağ yapısı sayısına göre değişimi



Şekil 5.12. NACA 0015 kanat modelinde C_L ve C_D değerlerinin ağ yapısı sayısına göre değişimi

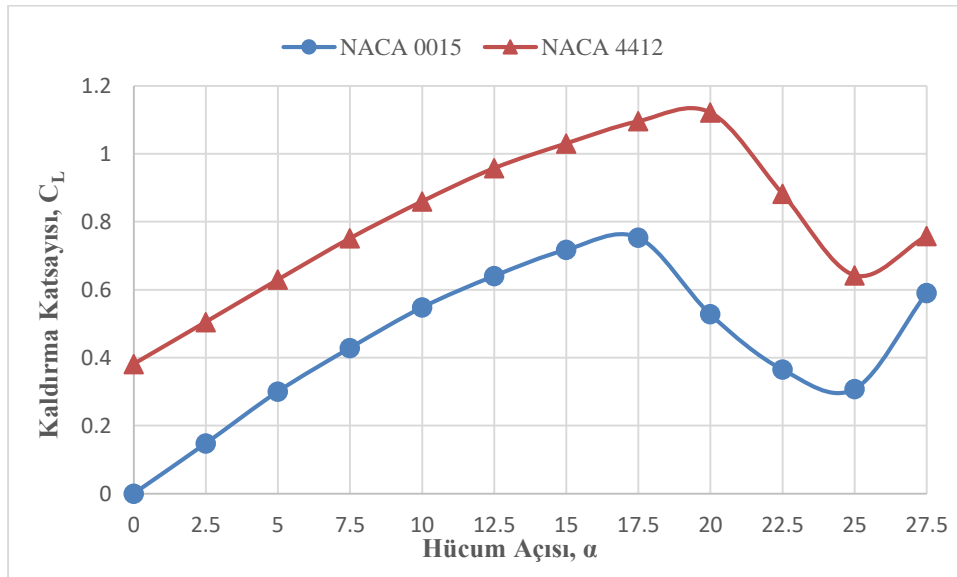
NACA 0015 ve NACA 4412 kanat profilleri için ağ yapısından bağımsızlık sağlanan değerler belirlendikten sonra analizi gerçekleştirmek için gereken parametrelerden biri de türbülans modelidir. Bu çalışmada, aerodinamik performans analizlerinde yaygın olarak kullanılan SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları bir sonraki bölümde verilmiştir.



6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada NACA 0015 ve NACA 4412 kanat modellerinin C_L , C_D , aerodinamik verimleri, akım çizgileri, basınç dağılımları gibi değerleri AR 3 iken incelenmiştir. Bu incelemeler, farklı hızlardaki kanatlar, kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından 0,2c uzaklıkta kare, üçgen ve küre olmak üzere 3 farklı dimple eklenerek ve düz kanat ile dimple yapısına sahip kanatların karşılaştırması yapılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak simetrik bir yapıya sahip olan NACA 0015 kanat profili ile kamburlu bir yapıya sahip olan NACA 4412 kanat modeli incelenmiştir.

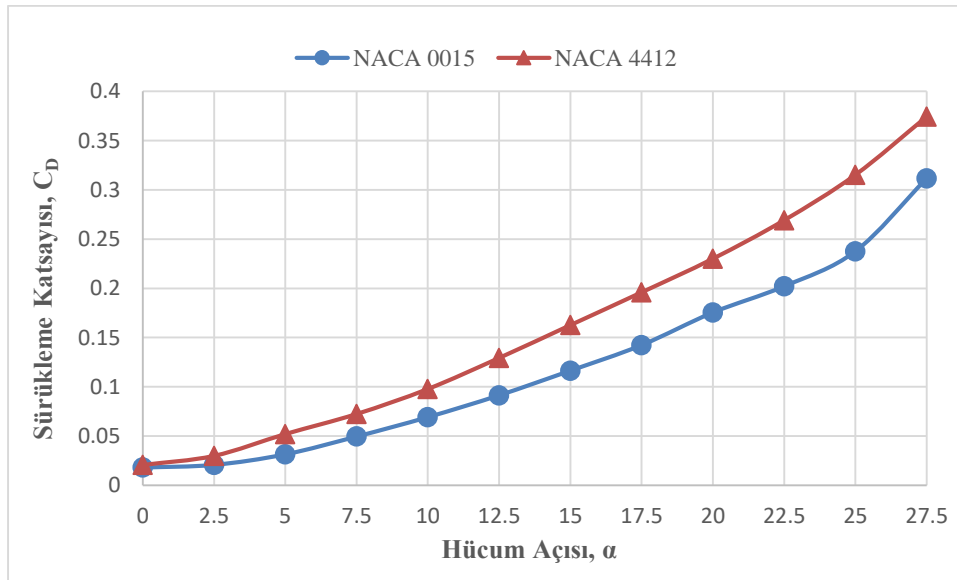
Simetrik yapıya sahip kanatlarda kanadın alt yüzeyinden ve üst yüzeyinden geçen akış hızları eşittir. Dolayısıyla yüzeyler arasında basınç farkı olmadığından 0° hücum açısında kaldırma etkisi görülmemektedir. Kamburlu kanatlarda ise kanadın üst kısmındaki akış daha hızlı; alt kısmındaki ise daha yavaştır. Kamburlu kanat profillerinin doğası gereği olan bu durum kanadın üstünde alçak basınç alt kısmında ise yüksek basınç oluşmasına sebep olacaktır. Bu sebeple 0° hücum açısında yüzeyler arasındaki bu basınç farkı kaldırma etkisi sağlayacaktır. Hücum açısı arttıkça hava, kanadın üst yüzeyinde daha fazla yol alır ve hızı artar. Durgun nokta alanı ve hava sürtünmesinin artması geri sürüklemeyi arttırmaktadır [45]. Bu durum doğrultusunda sürüklemenin hücum açısıyla doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir.



Şekil 6.1. NACA 0015 - 4412 kanatlarının 18 m/s hızda C_L değerleri

Şekil 6.1’de NACA 0015 ve NACA 4412 kanat profillerinin 0° ile $27,5^\circ$ arasındaki hücum açılarında ve 18 m/s hızda kaldırma katsayıları incelenmiştir. NACA 0015 simetrik bir yapıya sahip olduğu için Şekil 6.1’de görüldüğü üzere 0° hücum açısında C_L değeri sıfırdır. Bunun yanı sıra, NACA 4412 kanat profili kamburlu bir yapıya sahip olduğundan 0° hücum açısında 0,4’lük bir C_L değerine sahip olduğu görülmektedir. Bunlara ek olarak, Şekil 6.1’de maksimum C_L değerinin elde edildiği aynı zamanda tutunma kaybının gerçekleştiği açı NACA 4412 kanat profilinde 20° ’de gözlemlenirken bu değer NACA 0015 kanat profilinde 17° ’de elde edilmektedir. Bu bilgilere dayanarak, kanat profil şeklinin kaldırma katsayısı değerine etkili olduğu, simetrik olmayan kanat modelinin daha fazla kaldırma sağladığı görülmektedir.

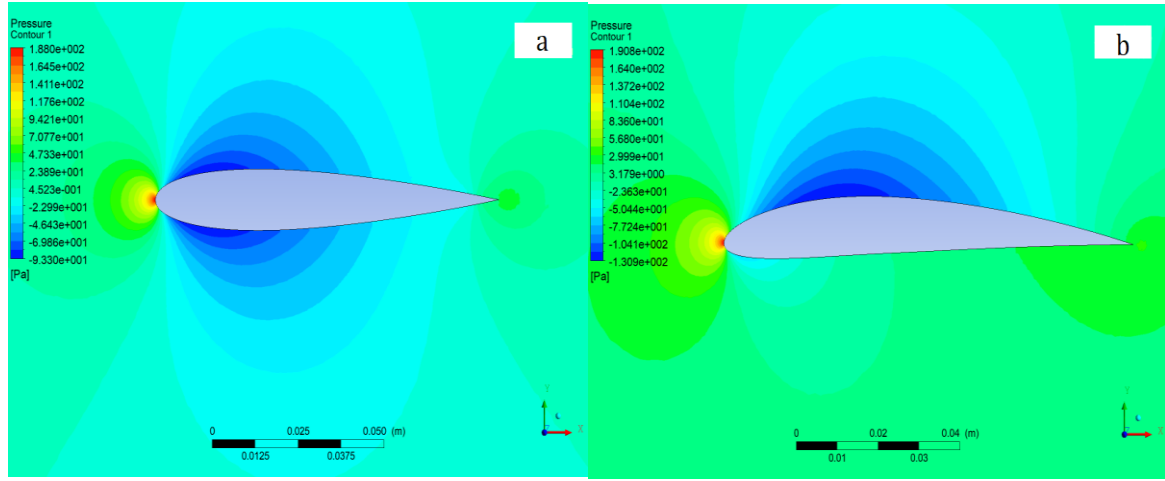
Şekil 6.2’de NACA 0015 ve NACA 4412 kanat profillerinin 0° ile $27,5^\circ$ arasındaki hücum açılarında ve 18 m/s hızda sürüklenme katsayıları incelenmiştir. Şekil 6.2’ye bakıldığında iki farklı kanat modelinde de C_D değerlerinin hücum açısının artmasıyla artış gösterdiği ve birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Ayrıca, NACA 4412’de daha fazla sürüklenme olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, kanat şeklinin C_D değeri üzerindeki etkisinin fazla olduğu tespit edilmiştir.



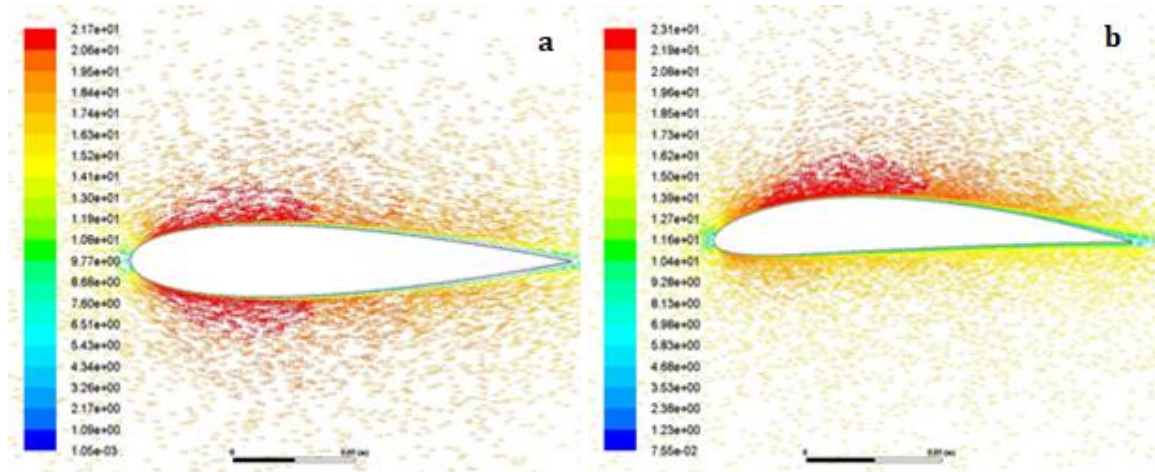
Şekil 6.2. NACA 0015 - 4412 kanatlarının 18 m/s hızda C_D değerleri

Şekil 6.3 ve 6.4’te NACA 0015 ve NACA 4412 kanat profillerinin 0° ’de ve 18 m/s hızda basınç dağılımları (Şekil 6.3) ve hız vektörleri (Şekil 6.4) incelenmiştir. Şekil 6.4.a’da

NACA 0015 simetrik kanat profiline sahip olduğu için hücum kenarından gelen akış kanadın alt ve üst yüzeylerinde aynı hızda hareket etmektedir. Bu yüzden Şekil 6.3.a'da görüldüğü üzere kanadın yüzeyleri arasında basınç farkı oluşmamaktadır. NACA 4412 kanadı simetrik olmayan bir yapıya sahip olduğu için kanadın üst yüzeydeki akışın hücum kenarından firar kenarına hareket ederken daha hızlı hareket ettiği, alt yüzeyinde ise akışın daha yavaş olduğu Şekil 6.4.b'de gözlemlenmiştir. Bu durum yüzeyler arasında basınç farkına sebep olduğundan Şekil 6.3.b'de görüldüğü üzere NACA 4412 kanadında 0° 'de az da olsa bir kaldırma etkisi yaratmaktadır. Bunlara ek olarak, Şekil 6.4'e bakıldığında her iki kanat profilinde de akışın düzgün bir şekilde kanadı terk ettiği görülmektedir.



Şekil 6.3. 18 m/s hızda ve 0° 'de basınç dağılımları a) NACA 0015 b) NACA 4412



Şekil 6.4. 18 m/s hızda ve 0° 'de hız vektörleri a) NACA 0015 b) NACA 4412

6.1. NACA 0015 ve NACA 4412 Kanat Profillerinde Rüzgar Giriş Hızı Etkisi

Bu bölümde NACA 0015 ve NACA 4412 kanat profilleri için 14 m/s, 18 m/s ve 22 m/s

hızlara bağlı olarak, sırasıyla, 91 063, 117 082 ve 143 100 Re sayılarında değerler analiz edilmiştir.

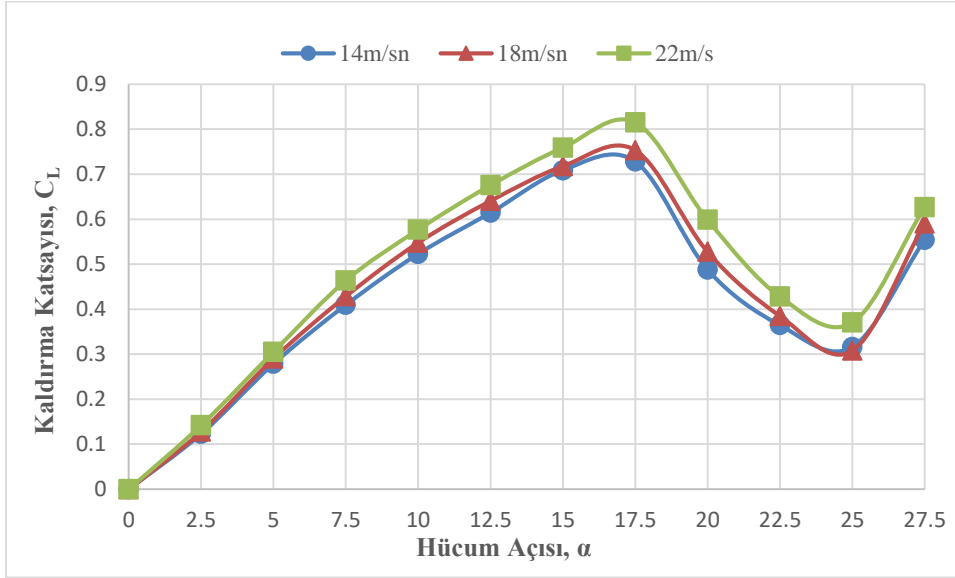
Sabit veter uzunluğunda hız artışına bağlı olarak Re sayısı arttıkça kaldırma katsayısı, hücum açısındaki artışla birlikte artar. Re sayısındaki artış nedeniyle akış, kanat profilinin üst yüzeyinde hızlanır, alt yüzeyinde ise yavaşlar. Böylece üst ve alt yüzey arasında basınç farkı artar. Bu nedenle kaldırma katsayısı artar [46]. Hız artışına bağlı olarak artan basınç farkı ile dikey ekseninde kuvvetin artmasına, yatay ekseninde ise azalmasına sebep olmaktadır. Kanadın üst yüzeyinde firar kenarına yakın noktalarda basınç artmaktadır. Böylece kanat yüzeyine etki eden basınç kuvvetinin yatay eksenindeki bileşeni sürüklenme kuvvetinde azaltıcı etkiye sebep olabilmektedir [47].

Hız değişimine bağlı olarak değişen Re sayısı kaldırma ve sürüklenme katsayılarını etkilemektedir. Artan Re sayısı kaldırma katsayısının artmasına ve sürüklenme katsayısının azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum aerodinamik performansı etkilemiştir [47].

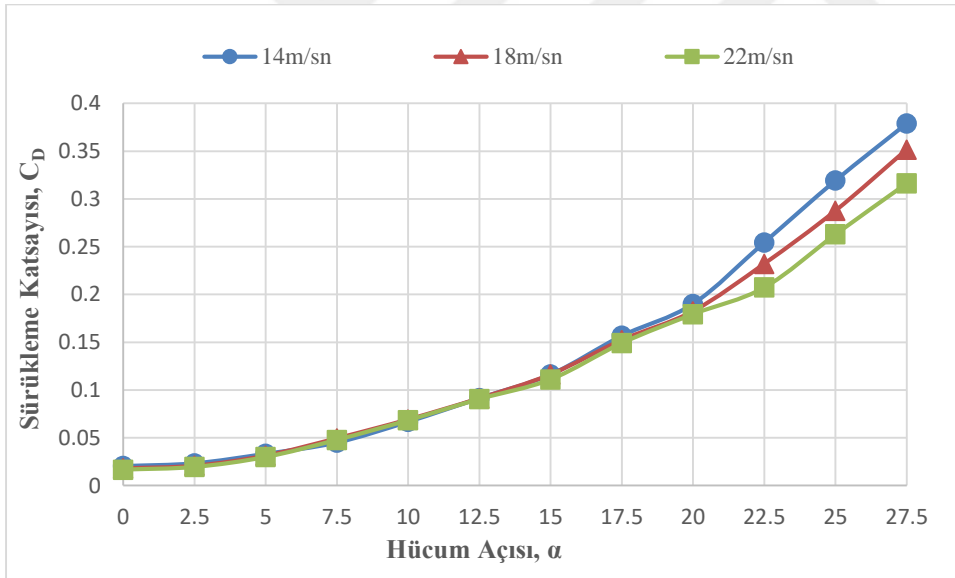
6.1.1. NACA 0015 kanat profilinde rüzgar giriş hızı etkisi

Şekil 6.5 ve 6.6'da NACA 0015 kanat profilinin 0° ile $27,5^\circ$ arasındaki hücum açılarında ve 14 m/s, 18 m/s ve 22 m/s hızlarda kaldırma katsayıları (Şekil 6.5) ve sürüklenme katsayıları (Şekil 6.6) incelenmiştir. Şekil 6.5'te görüldüğü üzere 0° ile 6° arasında her 3 hız için elde edilen C_L değerleri katsayıları birbirine çok yakın değerlere sahiptir. 6° 'den sonraki hücum açılarında ise 22 m/s hızda elde edilen kaldırma katsayısı 14 m/s hız ile 18 m/s hızda elde edilen C_L değerlerinden daha yüksek bir değere sahiptir. Bunun sebebi hız arttıkça kanadın yüzeyleri arasındaki basınç farkının artması ve daha fazla kaldırma kuvveti elde edilmesidir. Bunların yanı sıra tutunma kaybı açılarında değişim gözlemlenmemiştir. Şekil 6.5'te, NACA 0015 kanat modelinde 17° 'de 14 m/s'den 18 m/s'ye ve 18 m/s'den 22 m/s'ye yapılan geçişlerde sırasıyla % 3,36 ve % 7,59'luk artış söz konusudur. Şekil 6.6 incelendiğinde C_D değeri, hücum açısının artmasıyla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. 0° ile 20° arasında 3 farklı hız için C_D değerleri arasındaki fark çok az olmakla birlikte bu hücum açısından sonra 3 hız değeri için elde edilen sürüklenme katsayıları arasında belirgin bir fark vardır. 20° hücum açısı sonrasında sürüklenme katsayısı 14 m/s hızda en yüksek, 22 m/s hız için en düşük değere sahip olduğu görülmektedir. Bu durum literatürdeki sonuçlarla paralellik

göstermektedir. Sonuç olarak, akış hızının artması, maksimum kaldırma katsayısı değerinin artmasını ve sürükleme katsayısındaki artışın daha az olmasını sağlamıştır.



Şekil 6.5. NACA 0015 kanadının farklı hızlarda C_L değerlerinin karşılaştırılması

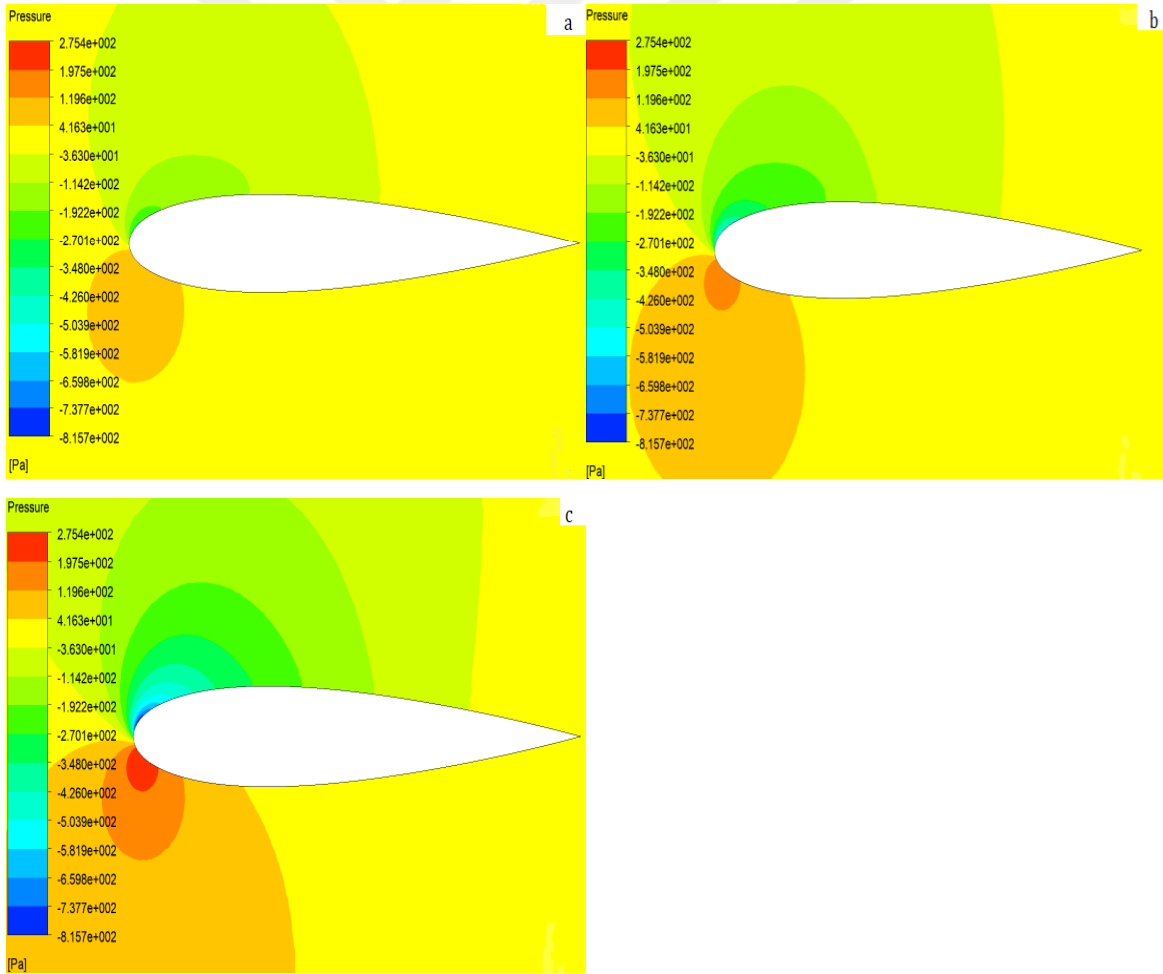


Şekil 6.6. NACA 0015 kanadının farklı hızlarda C_D değerlerinin karşılaştırılması

Kanat modelinin aerodinamik performansını C_L/C_D değeriyle ölçülmesi mümkündür. Şekil 6.7'de NACA 0015 kanat profilinin 0° ile $27,5^\circ$ arasındaki hücum açılarında ve 14 m/s, 18 m/s ve 22 m/s hızlarda aerodinamik performansları incelenmiştir. 14 m/s hız için en yüksek C_L/C_D oranının $7,5^\circ$ 'de 8,7 olarak elde edildiği görülmektedir. 18 m/s hız için bu değer 5° 'de ve 9,3 olarak bulunurken 22 m/s hızda ise 5° 'de ve 10,2 olarak elde edilmiştir. Akış hızı artışının, maksimum aerodinamik verim değerinin artmasını sağladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.7. NACA 0015 kanadının farklı hızlarda C_L/C_D değerlerinin karşılaştırılması

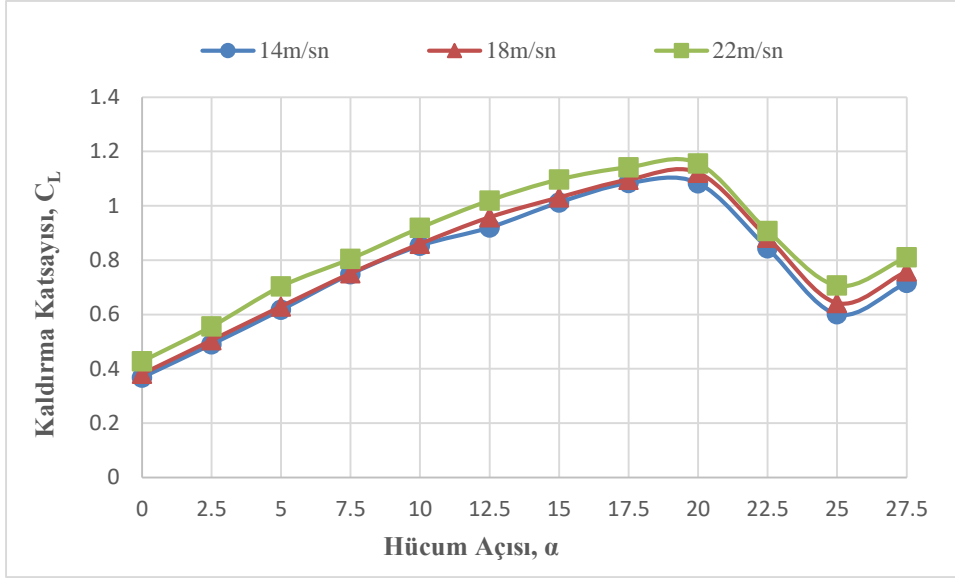


Şekil 6.8. NACA 0015 kanat profilinin 17° 'de basınç dağılımları; a) 14 m/s, b) 18 m/s, c) 22m/s

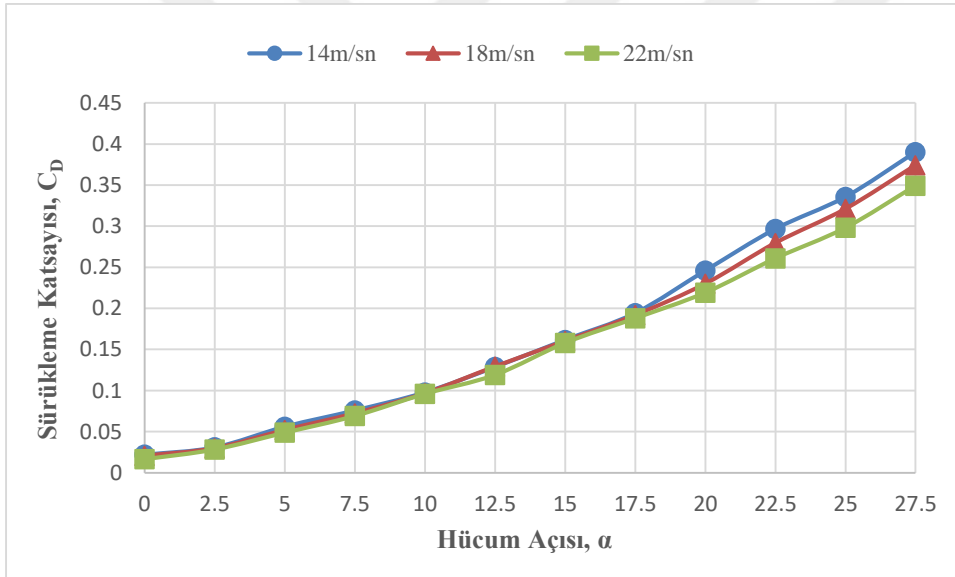
Şekil 6.8’de NACA 0015 kanat profilinin 17° hücum açısında ve 14 m/s, 18 m/s ve 22 m/s hızlarda basınç dağılımları, aynı basınç aralıklarında incelenmiştir. Hızın artışına bağlı olarak kanadın alt yüzeyinde akış yavaşlamakta, üst yüzeyinde ise hızlanmaktadır. Böylece, yüzeyler arasındaki basınç farkı artmaktadır. Şekil 6.8’de görüldüğü üzere kanadın üst yüzeyinde, 14 m/s hızdan, önce 18 m/s hıza daha sonra ise 22 m/s hıza çıkan akışa bağlı olarak basınç azalmıştır. Bu durum kanat üst yüzeyinde basıncın yeşil renkten mavi renge dönüşmesiyle net bir şekilde görülmektedir. Alt yüzeyinde ise basıncın kırmızıya yaklaşması basıncın arttığının bir göstergesidir.

6.1.2. NACA 4412 kanat profilinde rüzgar giriş hızı etkisi

Şekil 6.9 ve 6.10’da NACA 4412 kanat profilinin 0° ile $27,5^\circ$ arasındaki hücum açılarında ve 14 m/s, 18 m/s ve 22 m/s hızlarda C_L (Şekil 6.9) ve C_D (Şekil 6.10) değerleri incelenmiştir. Şekil 6.9’da görüldüğü üzere 0° ile 20° arasında 14 m/s hız ile 18 m/s hızda elde edilen kaldırma katsayıları aynı değerde olup 22 m/s hızda elde edilen değer diğerlerinden fazladır. Ayrıca, tutunma kaybı açılarının değişmediği görülmektedir. Şekil 6.9’a bakıldığında NACA 4412 kanat modelinde C_L değerinin en fazla olduğu 20° ’de akış hızının 14 m/s’den 18 m/s’ye çıkarıldığında C_L değerinde % 3,42’lik, 18 m/s’den 22 m/s’ye çıkarıldığında ise % 2,96 bir artış mevcuttur. Şekil 6.10 incelendiğinde hücum açısının artmasıyla birlikte C_D değerinin arttığı görülmektedir. 3 farklı hızda elde edilen sürükleme katsayısı değerleri, 0° ile $17,5^\circ$ arasındaki hücum açılarında birbirine yakın değerlere sahiptir. Ancak, $17,5^\circ$ hücum açısından sonraki sürükleme katsayıları arasındaki fark belirgindir. En yüksek sürükleme katsayısı 14 m/s hızda yapılan analizde sağlanmıştır. Bununla birlikte 22 m/s hız için C_D değerinin en düşük olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki sonuçlarla uyumludur. Kısaca, artan akış hızı, maksimum kaldırma katsayısının artmasını, sürükleme katsayısı değerindeki artışın daha az olmasını sağlayacak şekilde etki etmiştir.

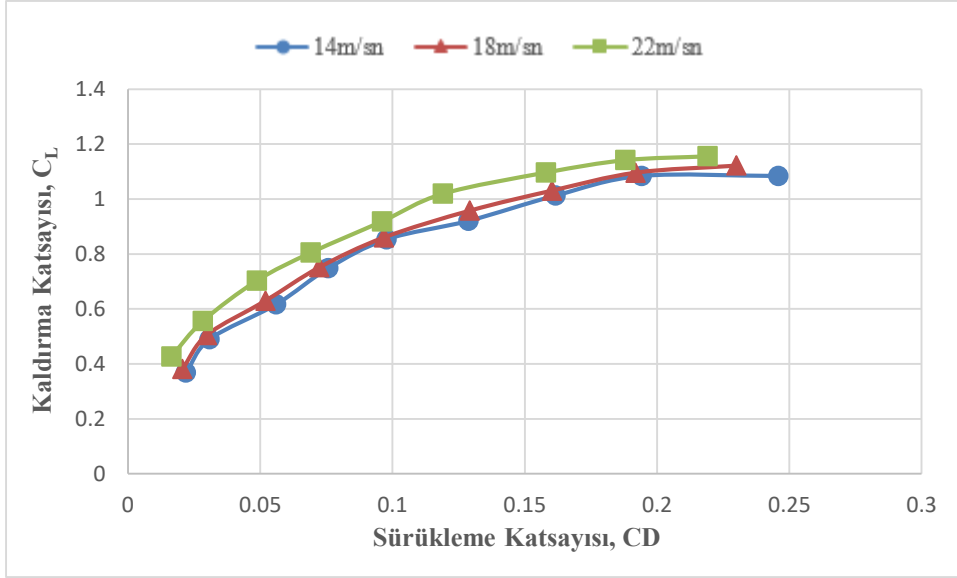


Şekil 6.9. NACA 4412 kanadının farklı hızlarda C_L değerlerinin karşılaştırılması

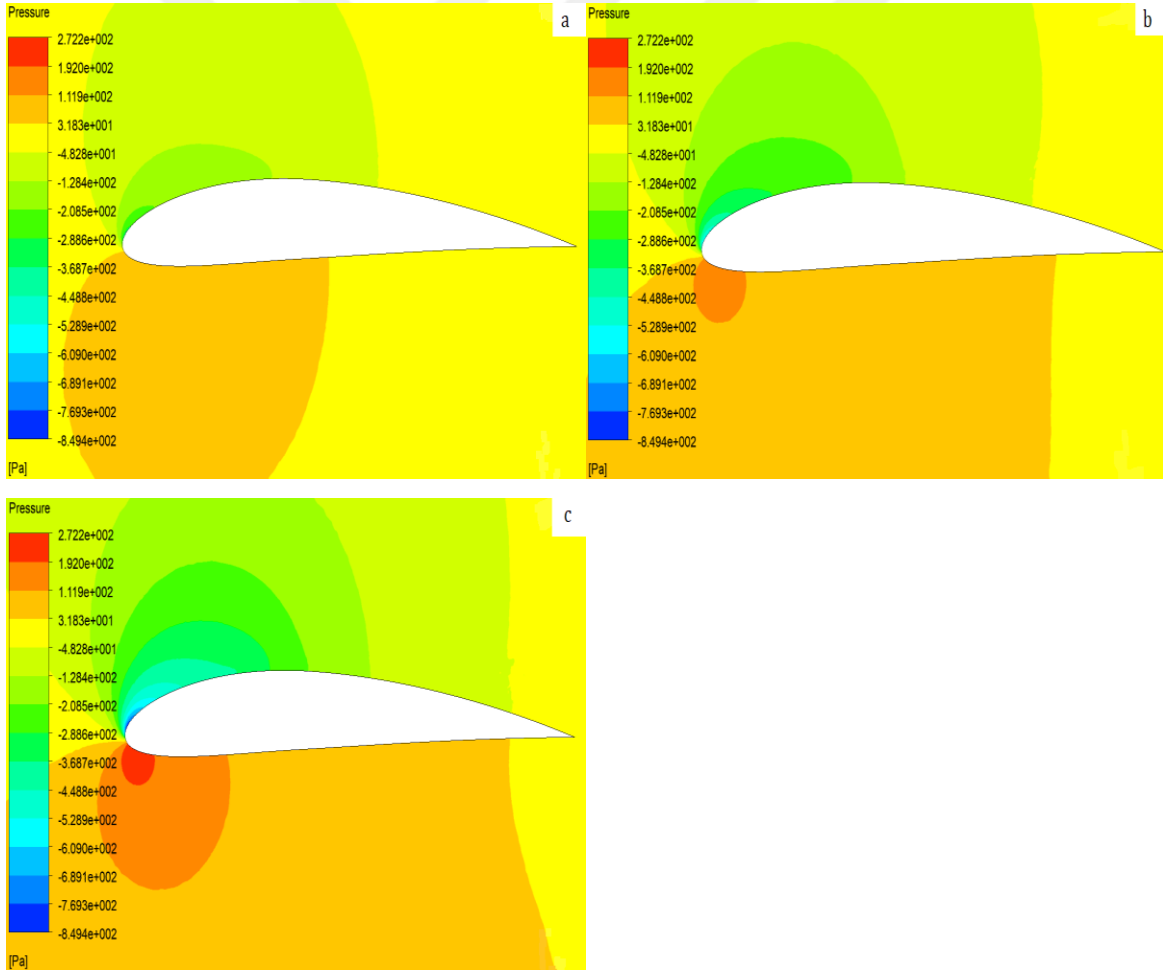


Şekil 6.10. NACA 4412 kanadının farklı hızlarda C_D değerlerinin karşılaştırılması

Sürükleme poları (drag polar), aerodinamik analizlerde kanat performansının incelenmesi açısından önemli bir başka parametredir. Şekil 6.11’de NACA 4412 kanat profilinin 0° ile 20° arasındaki hücum açıları ve 14 m/s, 18 m/s ve 22 m/s hızlarda aerodinamik performansları incelenmiştir. Şekil 6.11’de seçilen herhangi bir sürükleme kuvveti değeri için en yüksek kaldırma kuvvetinin 22 m/s hız için elde edildiği görülmektedir. En düşük değer ise 14 m/s hız için sağlanmıştır. Bu sonuçlar, literatürde yapılmış çalışmalardan elde edilmiş sonuçlarla aynıdır. Hıza bağlı olarak Re değerindeki artış sürükleme polalarının daha yüksek değere sahip olması, hız arttıkça performansın arttığını göstermektedir.



Şekil 6.11. NACA 4412 kanadının farklı hızlarda sürükleme polarının karşılaştırılması



Şekil 6.12. NACA 4412 kanat profilinin 20° 'de basınç dağılımları; a) 14 m/s, b) 18 m/s, c) 22m/s

Şekil 6.12'de NACA 4412 kanat profilinin ile 20° hücum açısında ve 14 m/s, 18 m/s ve 22

m/s hızlarda basınç dağılımları, aynı basınç aralıklarında incelenmiştir. Hız artışına bağlı olarak kanadın yüzeyleri arasındaki basınç farklı değişmektedir. Akış hızının artması kanadın üst yüzeyinde akışın hızlanmasıyla basıncın azalmasına, alt yüzeyde ise akış hızının yavaşlamasıyla basıncın artmasına sebep olduğu görülmektedir. Şekil 6.12 incelendiğinde, kanadın üst yüzeyinde rengin yeşilden maviye doğru değişmesi, basıncın azaldığının göstergesidir. Kanat alt yüzeyinde ise rengin sarıdan kırmızıya değişmesi, artan basıncı ifade etmektedir. Bu durumda, yüzeyler arası basınç farkı artmıştır.

6.2. NACA 0015 ve NACA 4412 Kanat Profillerinde Dimple Yapısının Etkisi

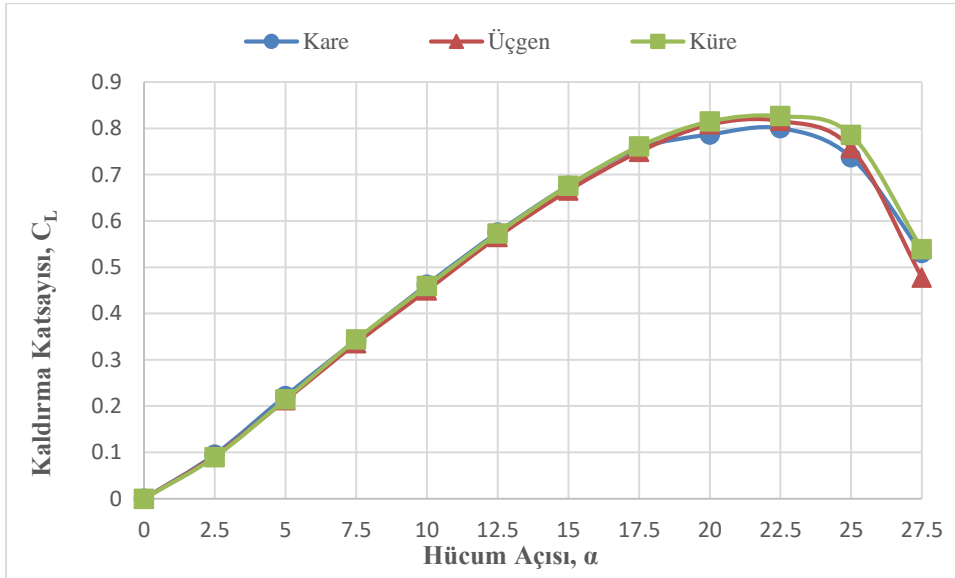
Bu bölüm öncesinde simetrik (NACA 0015) ve asimetric (NACA 4412) kanat modellerinde aerodinamik performans incelenmiştir. Daha sonra, rüzgar giriş hızının bu performansa etkisi analiz edilmiştir. Akış hızı artışının, aerodinamik performansa olumlu yönde etki ettiği gözlemlenmiştir. Aerodinamik verimi arttırmak için literatürde birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalardan biri kanat modeline dimple yapısı eklenmesidir. Kanat yüzeyine dimple, vorteks jeneratörü vb. eklemek türbülanslı sınır tabakanın daha erken oluşmasını sağlayarak akış ayrılma noktasını geciktirmektedir. Bu durum, tutunma kaybının başladığı açının artmasını ve sürükleme değerinin azalmasını sağlamaktadır. Bu sayede aerodinamik verim geliştirilebilmektedir [14, 21].

Bu bölümde ise NACA 0015 ve NACA 4412 kanat profilleri için 18 m/s hız için kanadın üst yüzeyinde, hücum kenarından 0,2c uzaklıkta kare, üçgen ve küre olmak üzere 3 farklı dimple eklenerek değerler analiz edilmiştir.

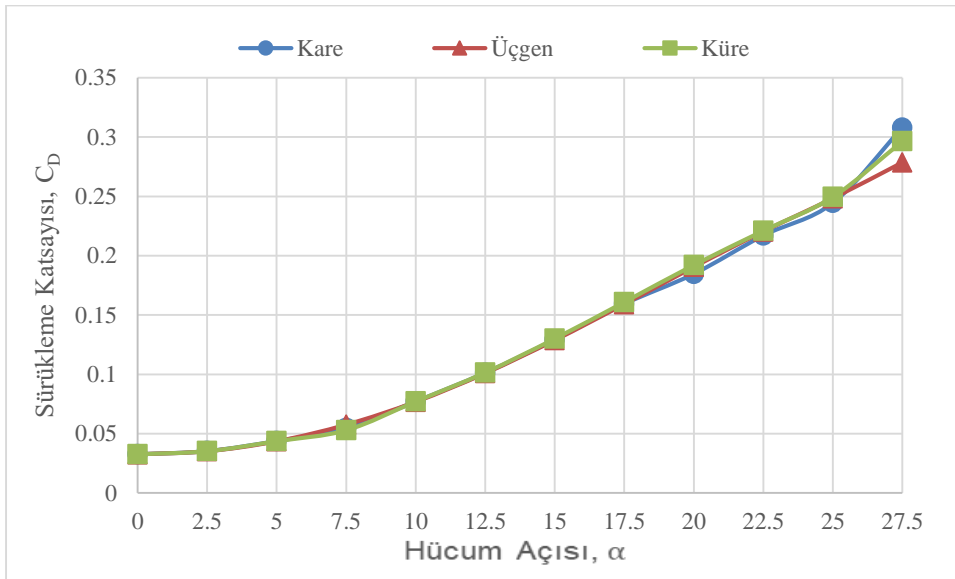
6.2.1. NACA 0015 kanat profilinde dimple yapısının etkisi

Şekil 6.13 ve 6.14'te NACA 0015 kanat profilinin 0° ile $27,5^\circ$ arasındaki hücum açılarında, 18 m/s hızda ve kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından 0,2c uzaklıkta kare, üçgen ve küre olmak üzere 3 farklı dimple eklenerek kaldırma katsayıları (Şekil 6.13) ve sürükleme katsayıları (Şekil 6.14) incelenmiştir. Şekil 6.13'te, dimple yapısına sahip kanat profilleri karşılaştırıldığında 18° hücum açısına kadar C_L değerleri arasında dikkate değer bir fark görülmemektedir. 18° ile $22,5^\circ$ arasındaki açılarda ise üçgen ve küre dimple yapısına sahip kanatların kaldırma katsayıları değerlerinin çok yakın olduğu, kare dimple yapısına sahip kanat profilinde ise C_L değerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Tutunma kaybının

gerçekleştiği $22,5^\circ$ hücum açısında sonra ise küre dimple yapısına sahip kanat profilinin diğer dimple yapılarına sahip kanat profillerine göre daha fazla kaldırma sağladığı tespit edilmiştir. 3 kanat profili için en yüksek kaldırma katsayısının $22,5^\circ$ hücum açısında elde edildiği görülmektedir. Şekil 6.14'te ise yapılan analizlerde 25° hücum açısına kadar sağlanan sürüklenme katsayısının aynı değerlere sahip olduğu, ancak bu hücum açısından sonra küçük farklılıkların meydana geldiği gözlemlenmiştir.

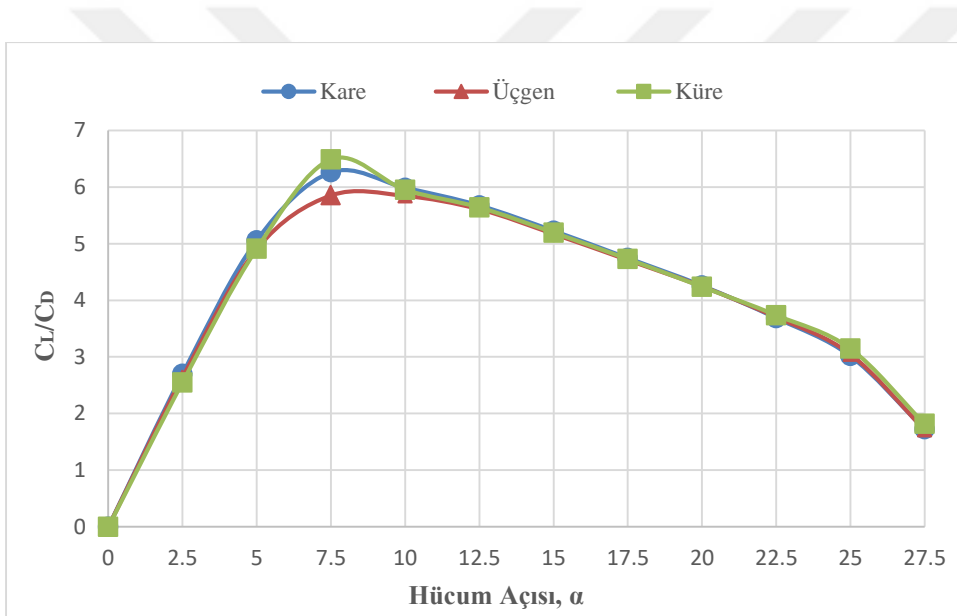


Şekil 6.13. NACA 0015 kanadının farklı dimple yapılarında C_L değerlerinin karşılaştırılması

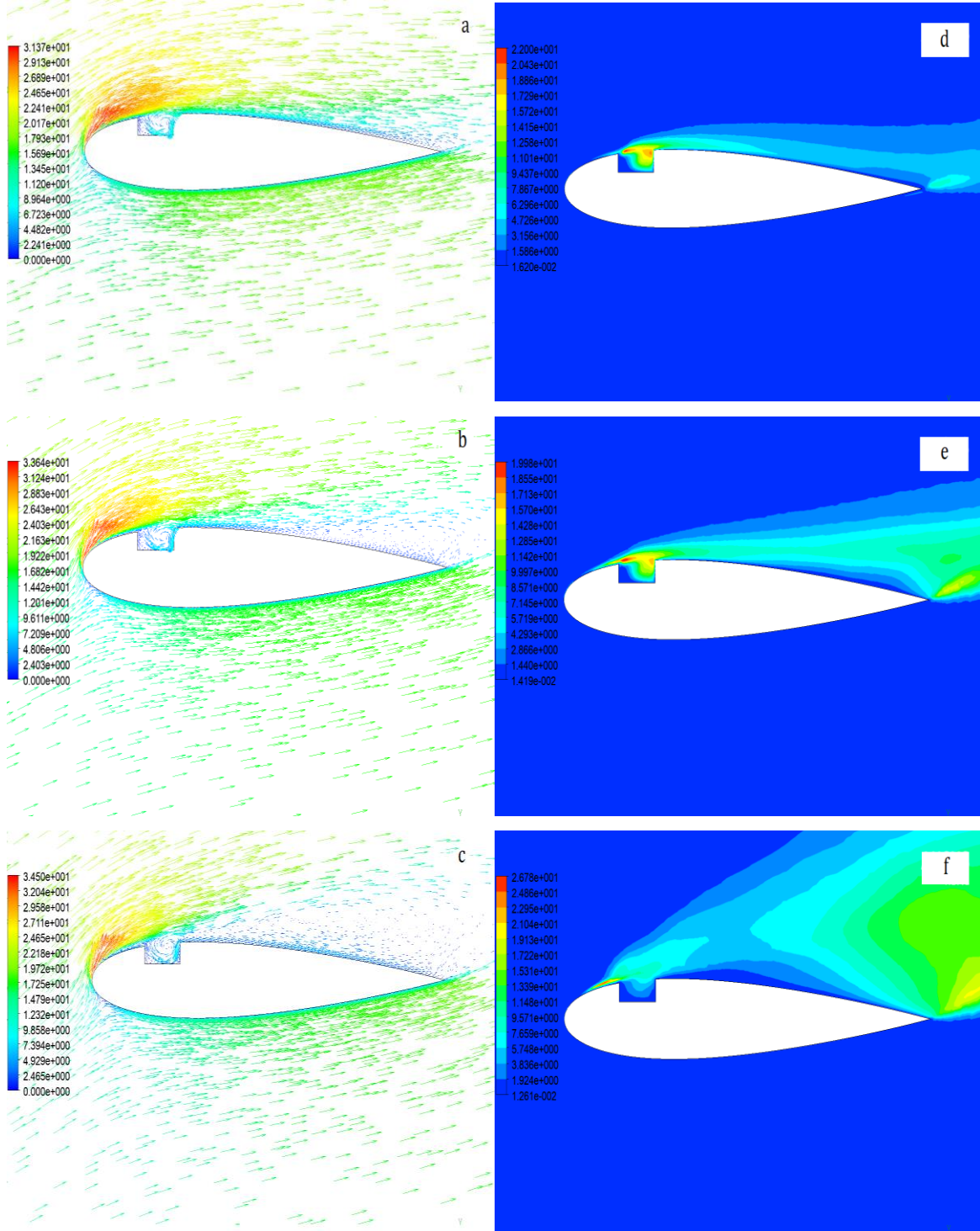


Şekil 6.14. NACA 0015 kanadının farklı dimple yapılarında C_D değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.15'te NACA 0015 kanat profilinin 0° ile $27,5^\circ$ arasındaki hücum açılarında 18 m/s hızda ve kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından $0,2c$ uzaklıkta kare, üçgen ve küre olmak üzere 3 farklı dimple eklenerek aerodinamik performansları incelenmiştir. Şekil 6.15'te görüldüğü üzere 3 dimple yapısı için de $7,5^\circ$ 'de en yüksek C_L/C_D oranı elde edilmiştir. Kare dimple yapısı için en yüksek aerodinamik verim 5,85 iken bu değerler üçgen ve küre dimple yapıları için sırasıyla 6,25 ve 6,50'dir. Bu bilgiler doğrultusunda, aerodinamik verimin en yüksek değerinin elde edildiği hücum açısı aynı olurken küre dimple yapısına sahip kanadın diğerlerine göre daha yüksek değer sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sebeple, Bölüm 6.3'te gerçekleştirilen çalışmalarda küre dimple yapısına sahip kanat modeli tercih edilmiştir.



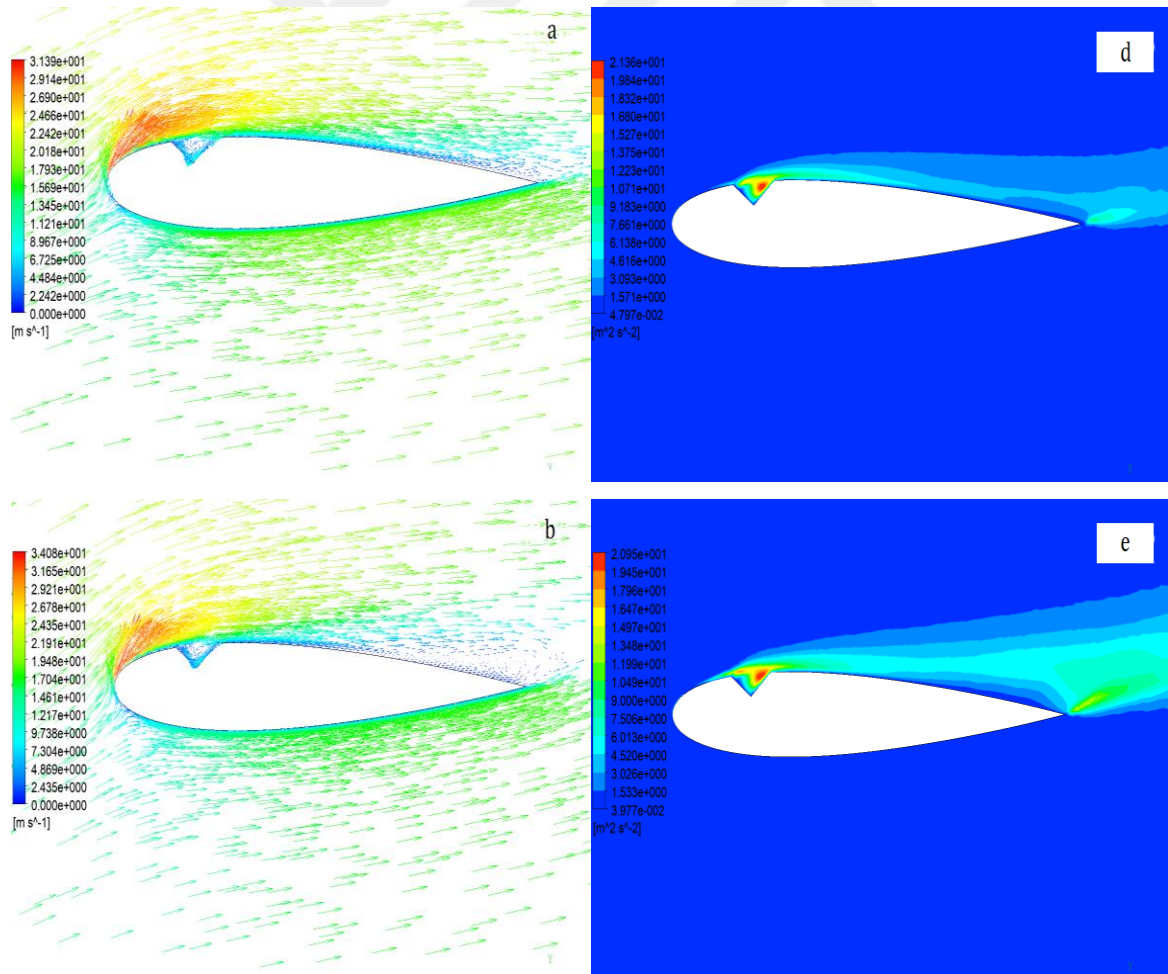
Şekil 6.15. NACA 0015 kanadının farklı dimple yapılarında C_L/C_D oranlarının karşılaştırılması



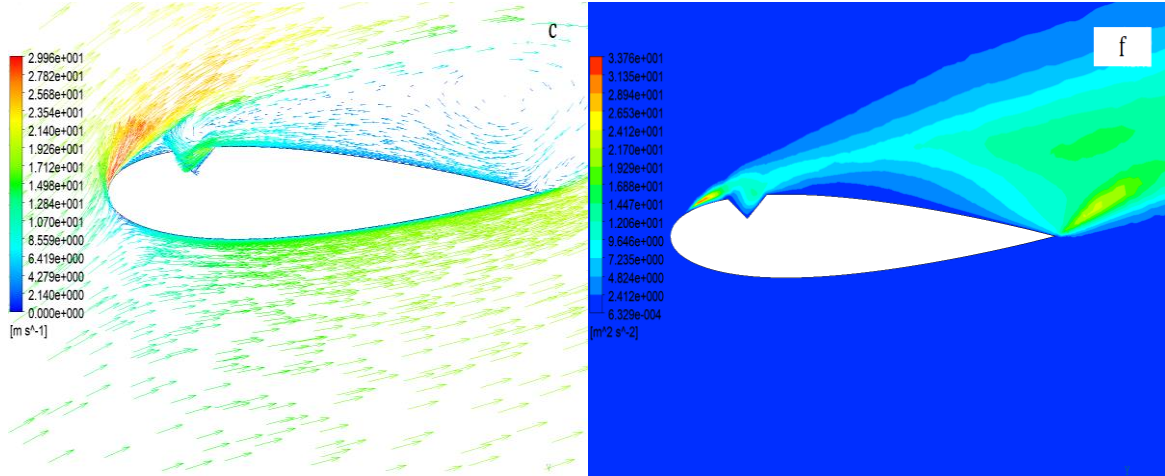
Şekil 6.16. NACA 0015 kanadının kare dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) 17,5°, b ve e) 22,5°, c ve f) 27,5°

Şekil 6.16'da NACA 0015 kanat profilinin 17,5°, 22,5° ve 27,5° hücum açılarında 18 m/s hız için kanadın üst yüzeyinde, hücum kenarından 0,2c uzaklıkta kare dimple eklenerek hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri incelenmiştir. Kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından 0,2c uzunluğa kadar akış hızı yüksektir. Bu noktaya kare dimple yapısı

eklendiğinde, dimple içinde türbülanslı akış oluşmaktadır. Böylece dimple kısmında akış hızı yavaşlamaktadır. Ayrıca, bu kısımda türbülanslı akış oluşmasıyla birlikte bu noktada türbülans kinetik enerji artmaktadır. Şekil 6.16.a ve d’de görüldüğü üzere $17,5^\circ$ hücum açısında, dimple yapısından sonra akış, kanat üzerinde tutunmaya devam etmektedir. Firar kenarından $0,1c$ uzaklıktaki noktada hücum açısından kaynaklı küçük bir girdap oluşmaktadır. Şekil 6.16.b ve e’de değerler incelendiğinde kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından $0,5c$ uzunluğa kadar akış tutunduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda kanadın kaldırma etkisi hala devam etmektedir. Kanadın firar kenarı bölgesinde oluşan girdap, türbülans kinetik enerjide artışa sebep olmaktadır. Şekil 6.16.c ve f’de ise akış, hücum kenarında dimple eklenen kısma kadar yüzeye tutunmaya devam etse de dimple yapısından itibaren artık kanadın üst yüzeyinde tutunamamakta ve kaldırma kuvveti sağlayamamaktadır. Oluşan girdabın büyüklüğüne paralel olarak firar kenarında türbülans kinetik enerji şiddetinde artış gözlemlenmiştir.

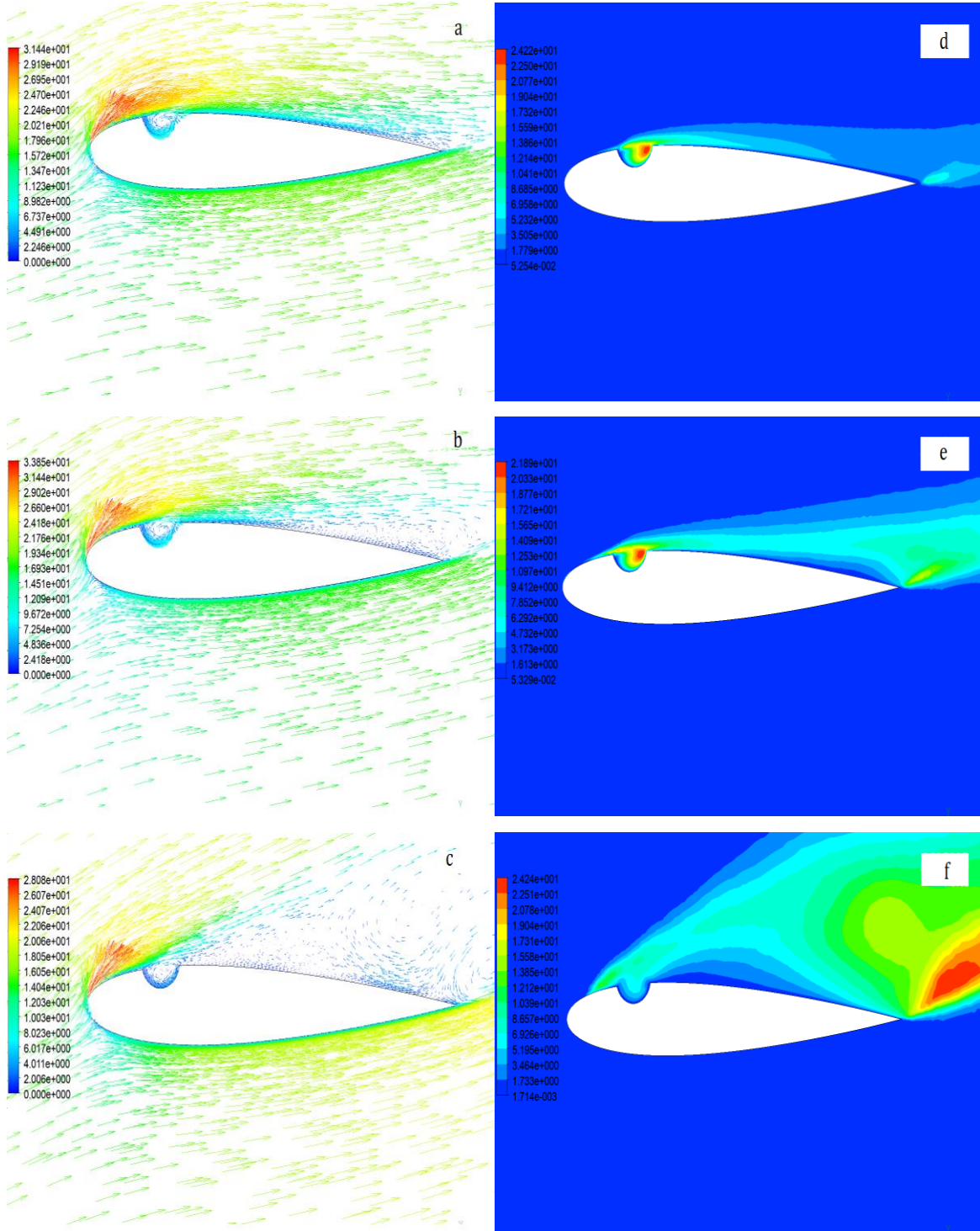


Şekil 6.17. NACA 0015 kanadının üçgen dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) $17,5^\circ$, b ve e) $22,5^\circ$, c ve f) $27,5^\circ$



Şekil 6.17. (devam) NACA 0015 kanadının üçgen dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) 17,5°, b ve e) 22,5°, c ve f) 27,5°

Şekil 6.17’de NACA 0015 kanat profilinin 17,5°, 22,5° ve 27,5° hücum açılarında 18 m/s hız için kanadın üst yüzeyinde, hücum kenarından 0.2c uzaklıkta üçgen dimple eklenerek hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri incelenmiştir. Şekil 6.17.a, b ve c’de, hücum kenarından dimple yapısına kadar olan kısımda akış hızının yüksek olduğu görülmektedir. Ancak dimple yapısı içinde akış hızı azalmıştır ve türbülanslı bir akış oluşmuştur. Bu duruma paralel olarak Şekil 6.17.d ve e’de görüldüğü üzere, dimple yapısında türbülans kinetik enerji değeri artmaktadır. Şekil 6.17.f’de ise dimple yapısının olduğu kısımda akış tutunmadığı için ölçülen türbülans kinetik enerji değeri daha düşüktür. Bunlara ek olarak, Şekil 6.17.a ve d incelendiğinde, akışın hücum kenarından 0,9c uzunluğa kadar kanatta tutunmaya devam ettiği görülmektedir. Bu noktada oluşan girdap, hücum açısından kaynaklanmaktadır. Oluşan bu girdap, türbülans kinetik enerjide artışa sebep olmaktadır. Şekil 6.17.b ve e’ye bakıldığında, kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından 0,6c uzunluğa kadar akışın tutunmaktadır. Bu durumda kanat, kaldırma kuvveti sağlamaya devam etmektedir. Kanadın firar kenarında 0,4c’lik kısımda meydana gelen girdap, türbülans kinetik enerjide artışa sebep olmaktadır. Şekil 6.17.c ve f’de ise akış, hücum kenarından itibaren yüzeyden ayrılmaktadır ve kaldırma kuvveti sağlayamamaktadır. Kanat yüzeyinde meydana gelen girdap büyüklüğünün artması, türbülans kinetik enerji şiddetinde artışa neden olmuştur.



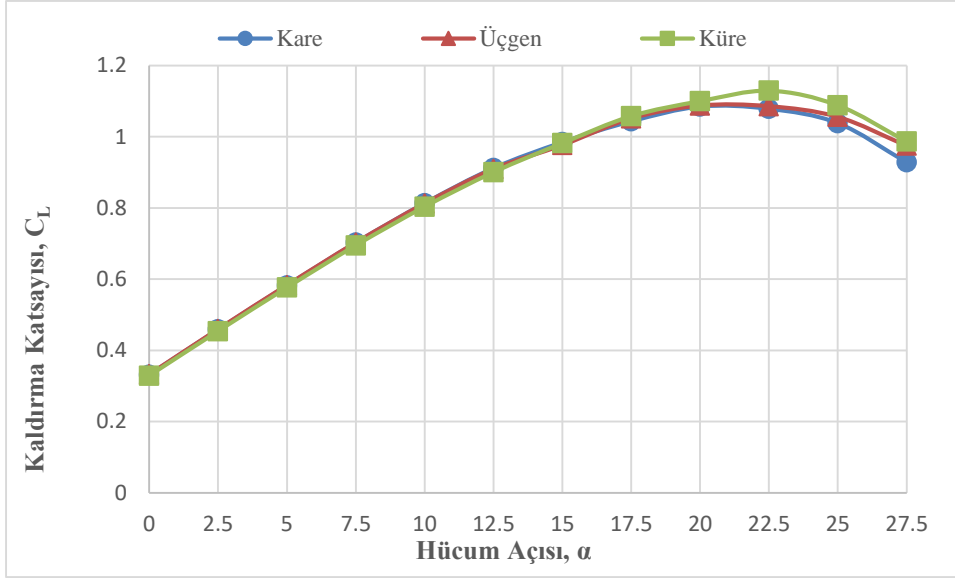
Şekil 6.18. NACA 0015 kanadının küre dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) $17,5^\circ$, b ve e) $22,5^\circ$, c ve f) $27,5^\circ$

Şekil 6.18’de NACA 0015 kanat profilinin $17,5^\circ$, $22,5^\circ$ ve $27,5^\circ$ hücum açılarında 18 m/s hız için kanadın üst yüzeyinde, hücum kenarından $0,2c$ uzaklıkta küre dimple eklenerek hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri incelenmiştir. Şekil 6.18’e bakıldığında her 3 açı değerinde de eklenen dimple yapısı içerisindeki akış hızı, hücum kenarından dimple yapısının eklendiği kısma kadar gözlenen akış hızından daha azdır. Bunun yanı sıra, dimple

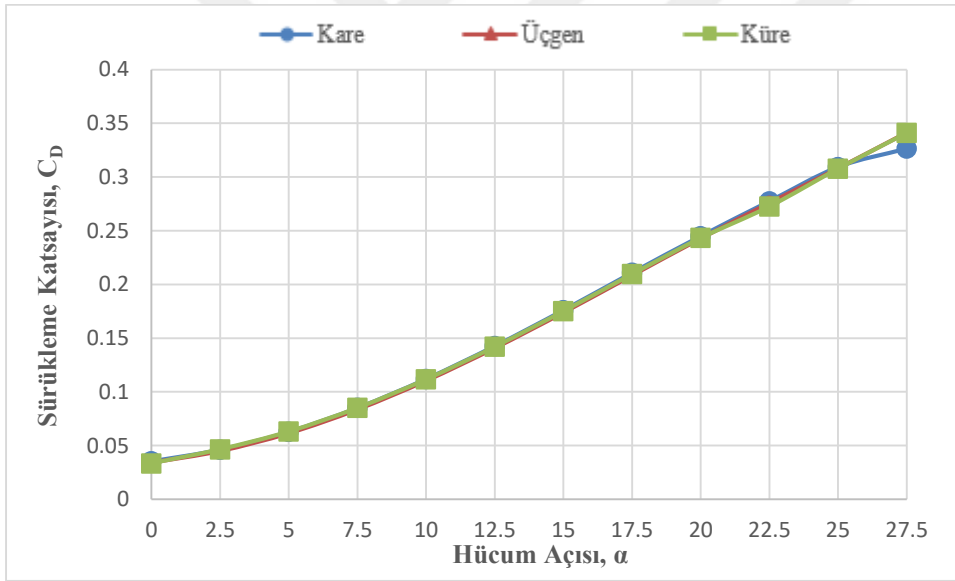
yapısı içinde akış türbülanslı bir hal almaktadır. Bu durum, buradaki türbülans kinetik enerjinin artışı sağlamaktadır. Şekil 6.18.a ve d'ye bakıldığında akış, hücum kenarından 0,9c'lik uzunluğa kadar kanat üzerinden ayrılmamaktadır. Firar kenarına yakın bölgede meydana gelen akış ayrılması hücum açısından kaynaklanmaktadır. Şekil 6.18.b ve e incelendiğinde akış, kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından 0,6c uzunluğa tutunmaya devam etmektedir. Bu durum, 22,5° hücum açısında kanadın kaldırma kuvveti sağlamaya devam ettiğinin göstergesidir. Kanadın firar kenarında 0,4c'lik kısımda görülen türbülans kinetik enerjinin, 17,5° hücum açısında firar kenarında ölçülen türbülans kinetik enerjiye kıyasla daha yüksek olmasının sebebi hücum açısının artmasına bağlı olarak bu bölgede oluşan girdabın büyümesidir. Şekil 6.18.c ve f'de ise akış, dimple yapısından firar kenarına kadar kanat üzerinde tutunamamaktadır. Bu durum, kaldırma kuvvetinin sağlanamaması ile sonuçlanmaktadır. Akışın tutunamadığı kısımda oluşan türbülansın artması türbülans kinetik enerjide yükselişe sebep olmuştur.

6.2.2. NACA 4412 kanat profilinde dimple yapısının etkisi

Şekil 6.19 ve 6.20'de NACA 4412 kanat profilinin 0° ile 27,5° arasındaki hücum açılarında, 18 m/s hızda ve kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından 0,2c uzaklıkta kare, üçgen ve küre olmak üzere 3 farklı dimple eklenerek kaldırma katsayıları (Şekil 6.19) ve sürüklenme katsayıları (Şekil 6.20) incelenmiştir. Şekil 6.19'a bakıldığında, kanat profillerinin 20° hücum açısına kadar aynı kaldırma katsayılarına sahip olduğu görülmektedir. Ancak, bu hücum açısından sonra küre dimple yapısına sahip kanat profilinin diğer iki kanat profiline göre daha yüksek kaldırma sağladığı, diğer iki kanat profilinin ise birbirlerine yakın değerlerde kaldırma kuvveti ürettiği gözlemlenmiştir. En yüksek C_L değerinin elde edildiği hücum açısı, 3 farklı dimple yapısına sahip kanat profilleri için aynı olup 22,5°'dir. Şekil 6.20'de ise 0-25° arasındaki hücum açılarında sürüklenme katsayısı profillerinin birbirleri ile örtüştüğü tespit edilmiştir.

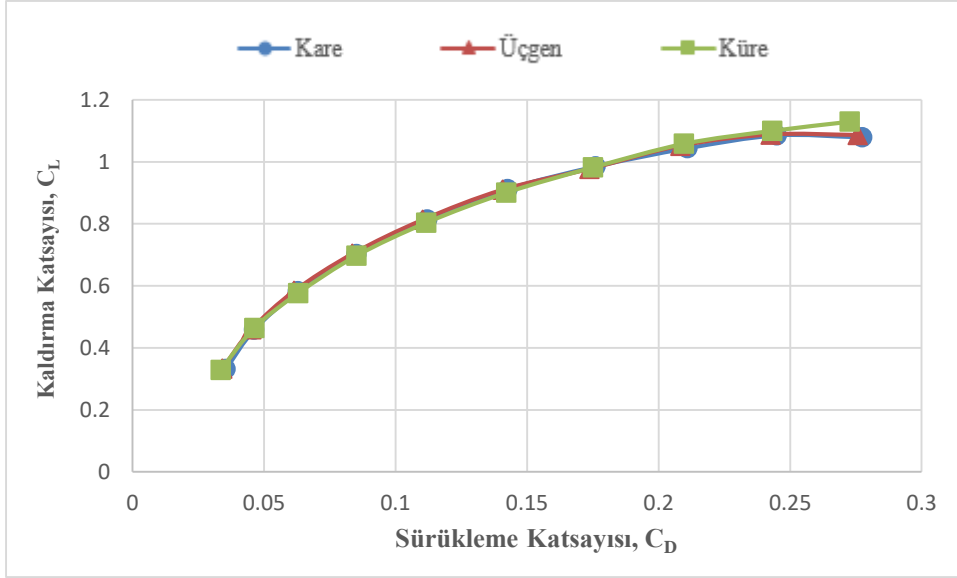


Şekil 6.19. NACA 4412 kanadının farklı dimple yapılarında C_L değerlerinin karşılaştırılması

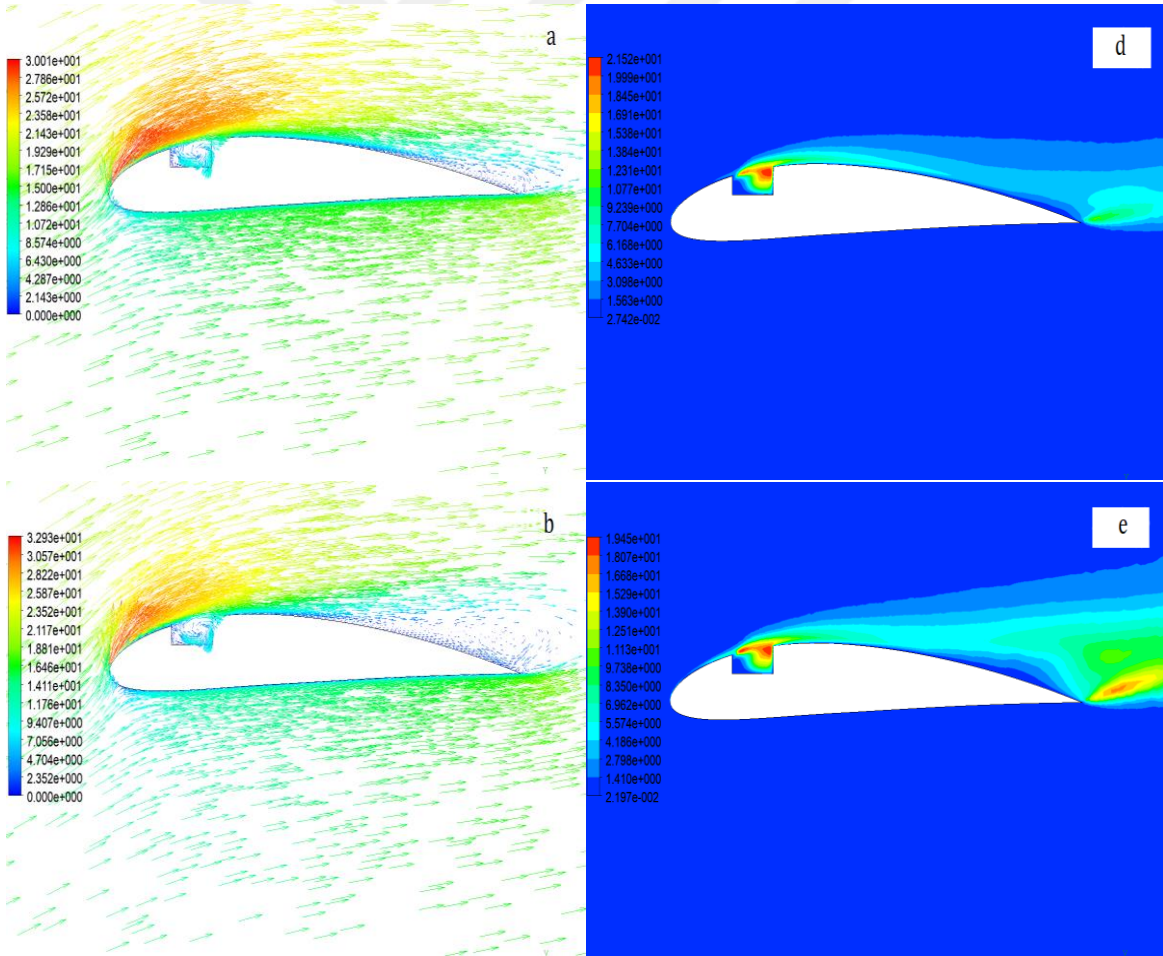


Şekil 6.20. NACA 4412 kanadının farklı dimple yapılarında C_D değerlerinin karşılaştırılması

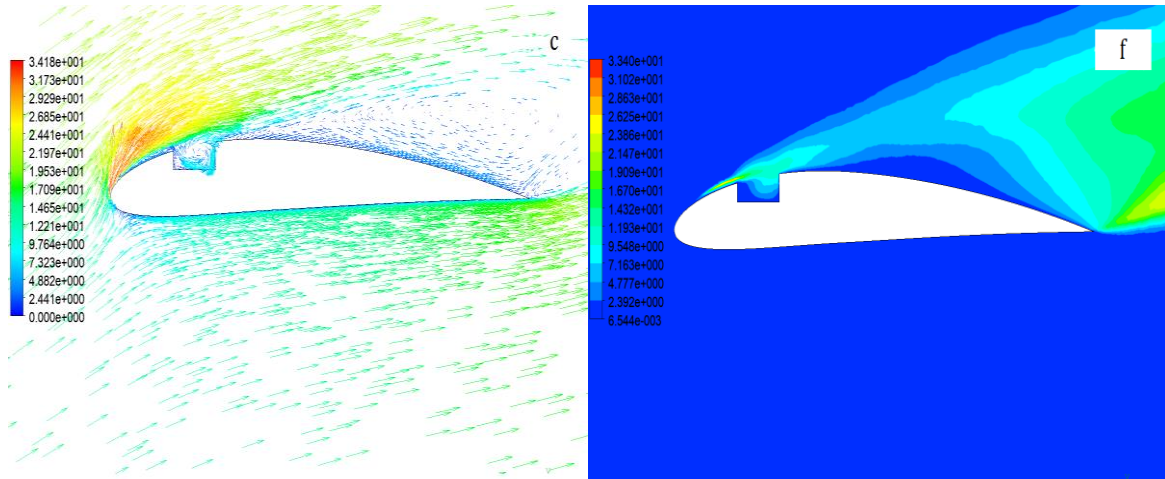
Şekil 6.21’de NACA 4412 kanat profilinin 0° ile $22,5^\circ$ arasındaki hücum açılarında 18 m/s hızda ve kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından $0,2c$ uzaklıkta kare, üçgen ve küre olmak üzere 3 farklı dimple eklenerek aerodinamik performansları incelenmiştir. 3 dimple yapısına sahip kanat profilleri, aynı sürükleme poları profiline sahiptir. Ancak sürükleme katsayısı 0,25 değeri ile 0,3 değeri aralığına bakıldığında seçilen herhangi bir C_D değeri için en yüksek kaldırma katsayısının küre dimple yapısına sahip kanat modelinde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu bilgiler baz alınarak Bölüm 6.3’te yapılan çalışmalarda küre dimple yapısına sahip kanat modeli kullanılmıştır.



Şekil 6.21. NACA 4412 kanadının farklı dimple yapılarında sürüklenme polarlarının karşılaştırılması

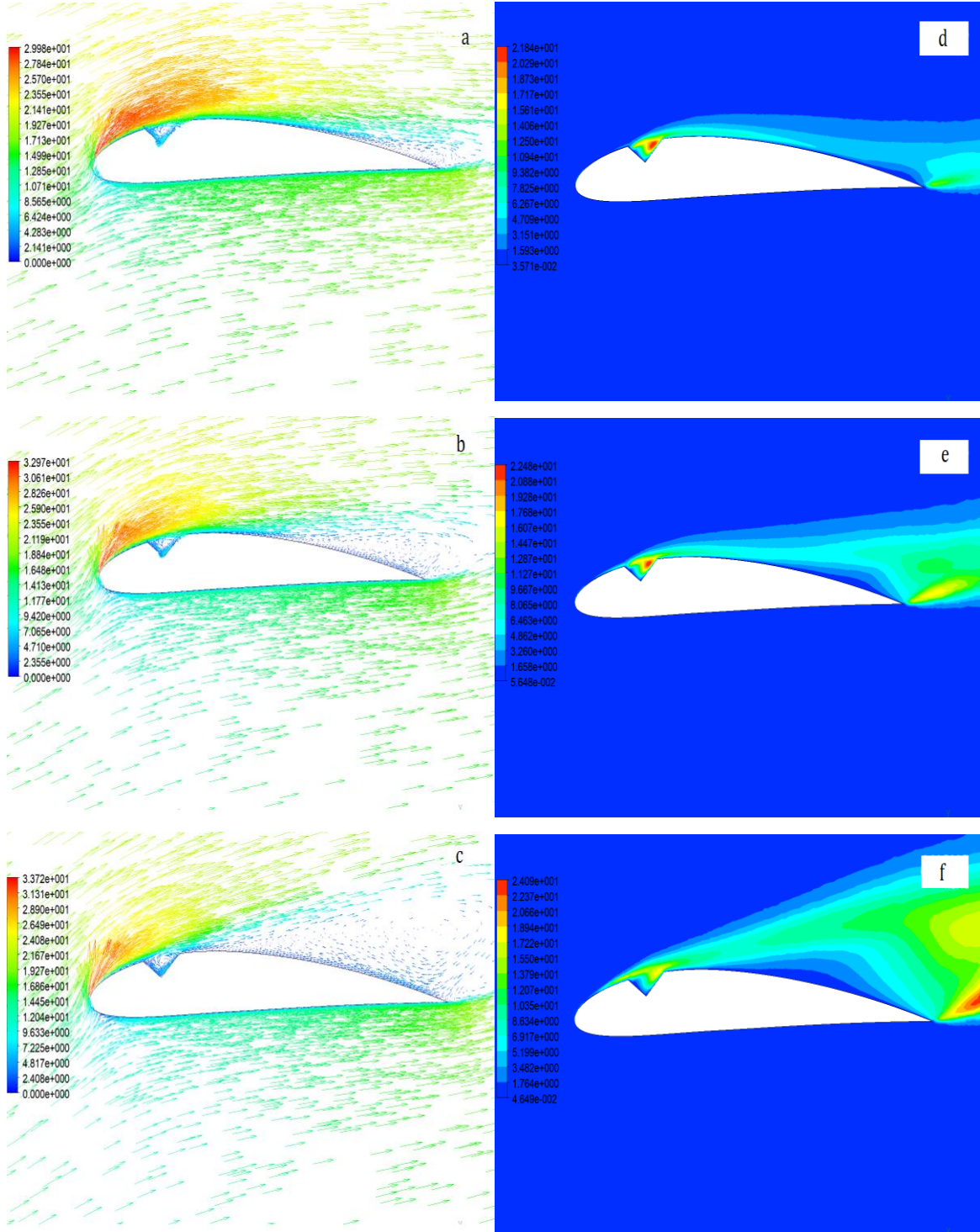


Şekil 6.22. NACA 4412 kanadının kare dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) 17,5°, b ve e) 22,5°, c ve f) 27,5°



Şekil 6.22. (devam) NACA 4412 kanadının kare dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) $17,5^\circ$, b ve e) $22,5^\circ$, c ve f) $27,5^\circ$

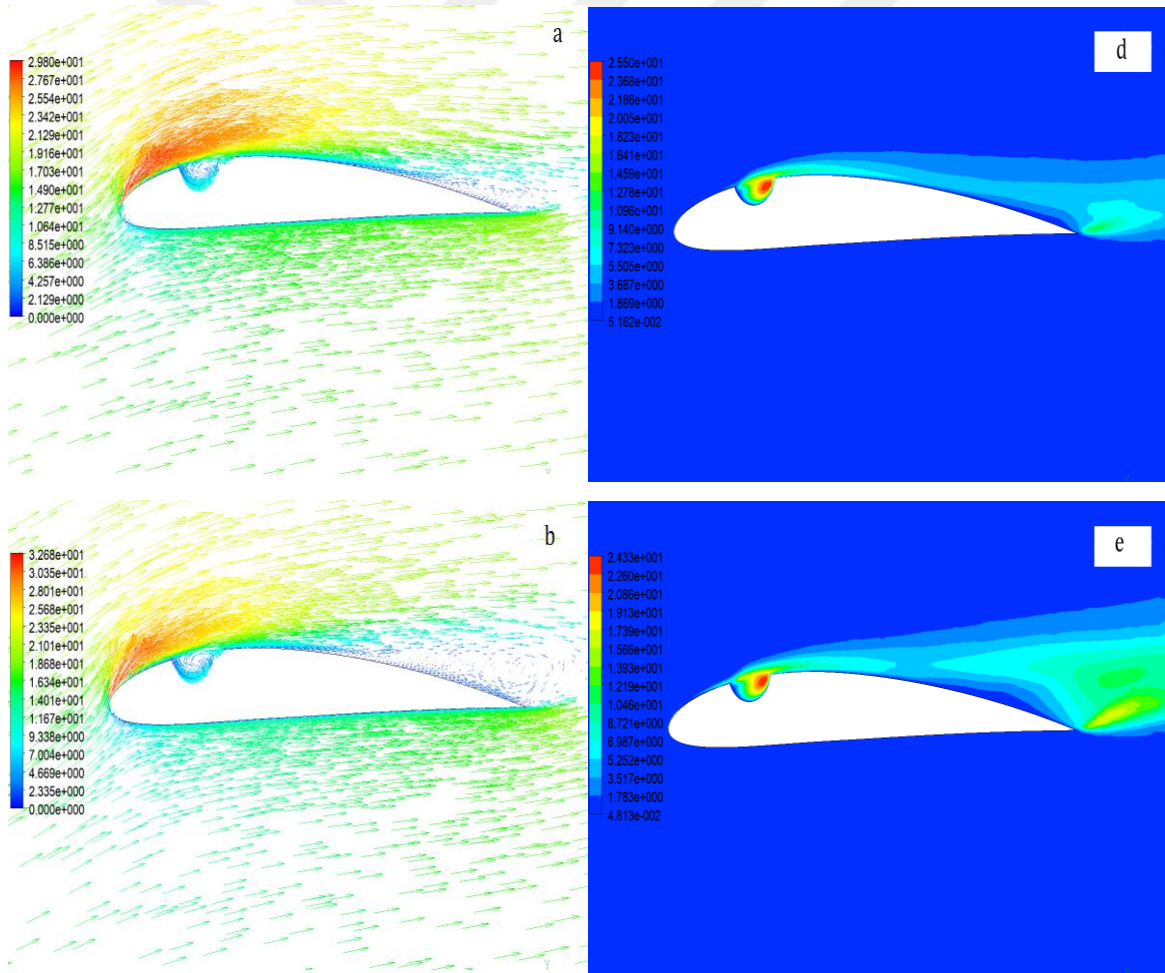
Şekil 6.22'de NACA 4412 kanat profilinin $17,5^\circ$, $22,5^\circ$ ve $27,5^\circ$ hücum açılarındaki 18 m/s hız için kanadın üst yüzeyinde, hücum kenarından $0,2c$ uzaklıkta kare dimple eklenerek hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri incelenmiştir. Şekil 6.22.a, b ve c'de görüldüğü üzere kanat profiline dimple yapısının eklenmesi, burada türbülanslı akış oluşmasını sağlamaktadır ve buna paralel olarak Şekil 6.22.d, e ve f'de görüldüğü üzere dimple yapısı içerisinde türbülans kinetik enerjisi artmıştır. Şekil 6.22.a ve d'de, kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından $0,3c$ 'lık uzunluğa kadar akış hızının yüksek olduğu görülmektedir. Buna rağmen $0,2c$ 'lik kısma eklenen dimple yapısı içerisinde akış hızı daha yavaştır. Ayrıca, akış ayrılması sadece hücum kenarından $0,9c$ 'lik mesafede gerçekleşmektedir. Firar kenarına yakın noktada gerçekleşen bu akış ayrılması hücum açısından kaynaklı olup burada türbülanslı akıştan dolayı küçük bir girdap oluşturmaktadır. Bu girdap, bu noktadaki kinetik enerji değerini arttırmıştır. Şekil 6.22.b ve e'ye bakıldığında, kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından $0,6c$ uzunluğa kadar akışın tutunduğu görülmektedir. Kanadın firar kenarı bölgesinde oluşan girdap, türbülans kinetik enerjide artışa sebep olmaktadır. Şekil 6.22.c ve f'de ise akış, hücum kenarından $0,3c$ 'lik kısma kadar kanat üzerinde tutunmaya devam etmesine rağmen dimple yapısından itibaren artık kanadın üst yüzeyinde tutunmamaktadır. Bu durum, kaldırma kuvvetinin elde edilememesine sebep olmaktadır. Yüze tutunamayan akış burada girdap oluşturmaktadır ve oluşan girdabın büyüklüğüne paralel olarak firar kenarında türbülans kinetik enerji şiddetinde artış gözlemlenmiştir.



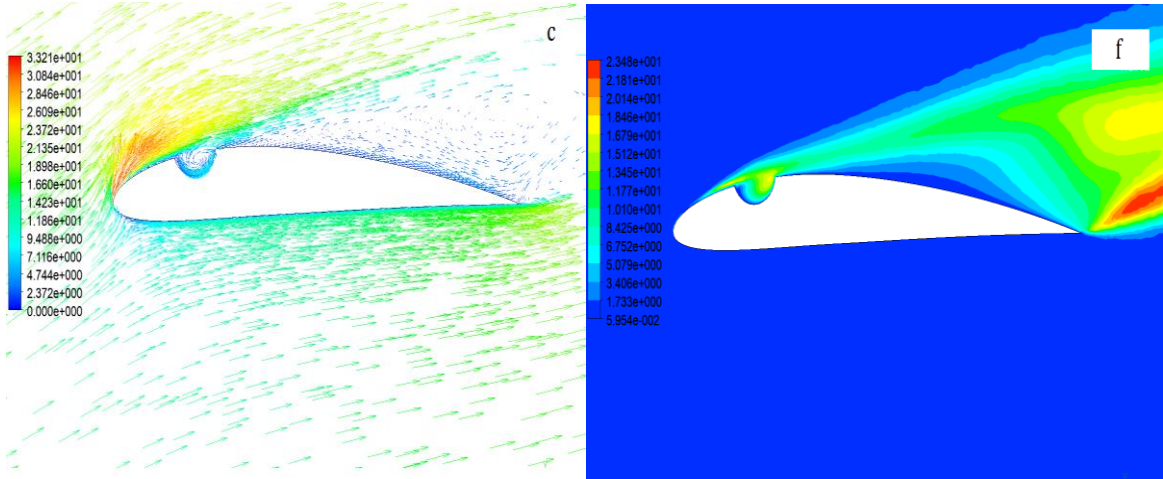
Şekil 6.23. NACA 4412 kanadının üçgen dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) $17,5^\circ$, b ve e) $22,5^\circ$, c ve f) $27,5^\circ$

Şekil 6.23'te NACA 4412 kanat profilinin $17,5^\circ$, $22,5^\circ$ ve $27,5^\circ$ hücum açılarında 18 m/s hız için kanadın üst yüzeyinde, hücum kenarından $0,2c$ uzaklıkta üçgen dimple eklenerek hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri incelenmiştir. Şekil 6.23.a ve d'de görüldüğü üzere akışın, hücum kenarından $0,9c$ uzunluğa kadar kanatta tutunmaya devam ettiği görülmektedir. Firar kenarından $0,1c$ 'lik uzaklıkta hücum açısından kaynaklı küçük bir

girdap oluşmaktadır. Girdap oluşması ile bu noktadaki türbülans kinetik enerjinin artmaktadır. Şekil 6.23.b ve e’de incelendiğinde kanadın üst yüzeyinde firar kenarından 0,4c uzunluğa kadar akışın tutunduğu ve buradan itibaren kanat yüzeyinde tutunamayarak türbülanslı bir yapı oluşturdu gözlenmiştir. Akış, kanadın büyük bir yüzeyine tutunmaya devam ettiği için kanadın kaldırma etkisi hala devam etmektedir. Kanadın firar kenarı bölgesinde oluşan girdabın büyük olması, türbülans kinetik enerjide artışa sebep olmaktadır. Şekil 6.23.c ve f’de akış, hücum kenarında 0,3c uzunluğa kadar yüzeye tutunmaya devam etmektedir. Ancak, dimple yapısından itibaren artık kanadın üst yüzeyinde tutunamamaktadır. Bu durum, kaldırma kuvvetinin sağlanamaması ile sonuçlanmaktadır. Kanat yüzeyinde meydana gelen girdap büyüklüğünün artması, türbülans kinetik enerji şiddetinde artışa neden olmuştur.



Şekil 6.24. NACA 4412 kanadının küre dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) 17,5°, b ve e) 22,5°, c ve f) 27,5°



Şekil 6.24. (devam) NACA 4412 kanadının küre dimple yapısında hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri a ve d) $17,5^\circ$, b ve e) $22,5^\circ$, c ve f) $27,5^\circ$

Şekil 6.24'te NACA 4412 kanat profilinin $17,5^\circ$, $22,5^\circ$ ve $27,5^\circ$ hücum açılarında 18 m/s hız için kanadın üst yüzeyinde, hücum kenarından $0,2c$ uzaklıkta küre dimple eklenerek hız vektörleri ve türbülans kinetik enerjileri incelenmiştir. Şekil 6.24'e bakıldığında, her 3 hücum açısı için de eklenen dimple yapısı içindeki akış hızı, kanadın üst yüzeyindeki akış hızından daha yavaştır. Ayrıca, dimple yapısı içerisindeki akış türbülanslı bir hal almaktadır ve bu sayede buradaki türbülans kinetik enerjide artış gözlenmektedir. Şekil 6.24.a ve d'de görüldüğü üzere hücum kenarından $0,9c$ 'lik uzunluğa kadar kanat üzerinde akış ayrılması görülmemektedir. Firar kenarından $0,1c$ uzaklıkta hücum açısından kaynaklı küçük bir girdap oluşmaktadır. Şekil 6.24.b ve e incelendiğinde akış, kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından $0,6c$ uzunluktan sonra kanat yüzeyinden ayrılmaya başlamıştır. Bu durumda kanat, kaldırma kuvveti sağlamaya devam etmektedir. Kanadın firar kenarı bölgesinde oluşan girdap, akışın türbülanslı olmasına paralel olarak artmıştır ve bu artış türbülans kinetik enerjinin yükselmesine neden olmaktadır. Şekil 6.24.c ve f'de ise akış, hücum kenarından $0,3c$ uzunluktan firar kenarına kadar kanat üzerinde tutunmamaktadır. Bu sebeple, kaldırma kuvvetini sağlamamaktadır. Akışın tutunamadığı kısımda oluşan türbülansın artması türbülans kinetik enerjide yükselişe sebep olmuştur.

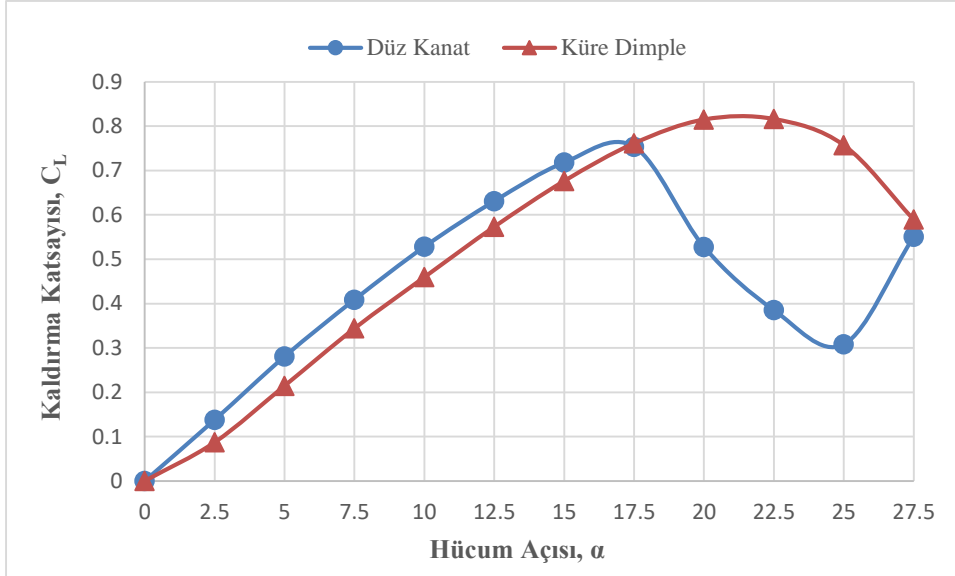
6.3. NACA 0015 ve NACA 4412 Kanat Profilleri ve Küre Dimple Etkisi

Bölüm 6.2'den elde edilen sonuçlara göre, NACA 0015 ve NACA 4412 kanat profillerinin üst yüzeylerine, hücum kenarlarından $0,2c$ uzaklıkta farklı dimple yapıları eklenmesiyle tutunma kaybının gerçekleştiği tutunma kaybı açısında en fazla kaldırma katsayısı ve en

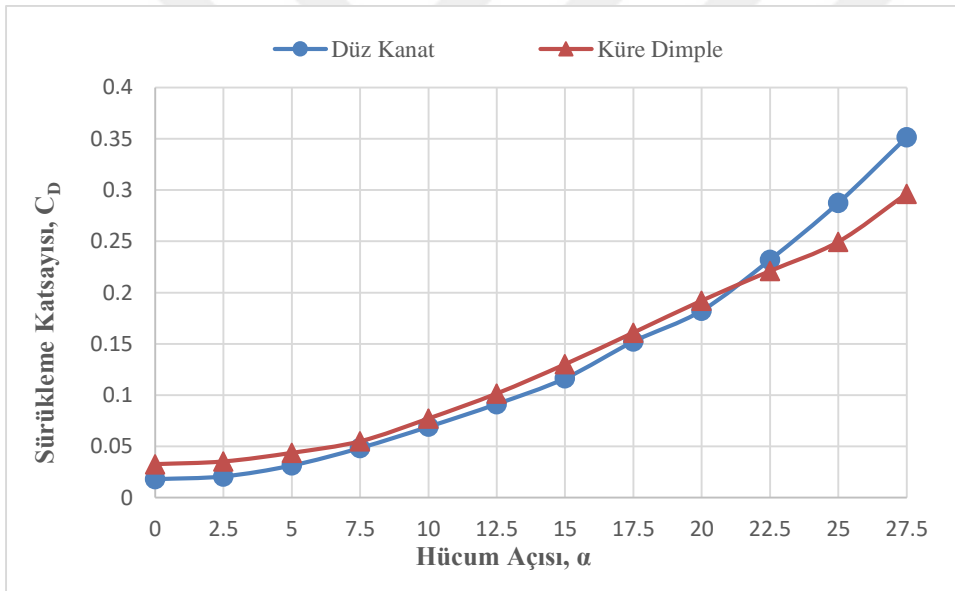
yüksek verim küre dimple yapılarında gözlemlenmiştir. Bu sebepten dolayı, bu bölümde yapılacak analizlerde küre dimple yapısına sahip kanat profilleri kullanılmıştır. Bu bölümde NACA 0015 ve NACA 4412 kanat profilleri için 18 m/s hızda, düz ve kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından 0.2c uzaklıkta küre dimple eklenerek değerler analiz edilmiştir.

6.3.1. NACA 0015 kanat profili ve küre dimple etkisi

Şekil 6.25 ve 6.26'da NACA 0015 kanat profilinin 0° ile $27,5^\circ$ arasındaki hücum açılarında, 18 m/s hızda ve düz kanat ve kanatların üst yüzeyinde hücum kenarlarından 0,2c uzaklıkta küre dimple eklenerek elde edilen kanatlar için C_L (Şekil 6.25) ve C_D (Şekil 6.26) değerleri incelenmiştir. Şekil 6.25'te NACA 0015 düz yapıdayken en yüksek kaldırma değeri 17° hücum açısında elde edilmiştir ve tutunma kaybı sonrasında kaldırma kuvvetinde oluşan kaybın ani bir şekilde arttığı görülmektedir. NACA 0015 kanat profiline küre dimple yapısı eklenmesi ile maksimum kaldırma katsayısı elde edilen kritik hücum açısı değerinin 17° 'den $22,5^\circ$ 'ye çıktığı ve tutunma kaybı sonrasında kaldırma kuvvetinde meydana gelen azalma hızının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, tutunma kaybı öncesinde düz kanat yapısı daha fazla kaldırma katsayısı sağlamasına rağmen düz kanatta tutunma kaybı gerçekleştiği açıda dimple yapısına sahip kanat kaldırma sağlamaya devam etmektedir. $17,5^\circ$ 'den sonra dimple yapısına sahip kanadın daha fazla kaldırma sağladığı görülmektedir. Şekil 6.26'da hücum açısının artmasıyla her iki kanat için sürükleme katsayısında artış olduğu görülmektedir. 0° ile 21° arasında düz kanatta elde edilen sürükleme, dimple yapısı eklenen kanadın sürükleme değerinden daha yüksektir. 21° 'den sonra ise dimple yapısına sahip kanadın sürükleme katsayısının daha az olduğu görülmektedir.

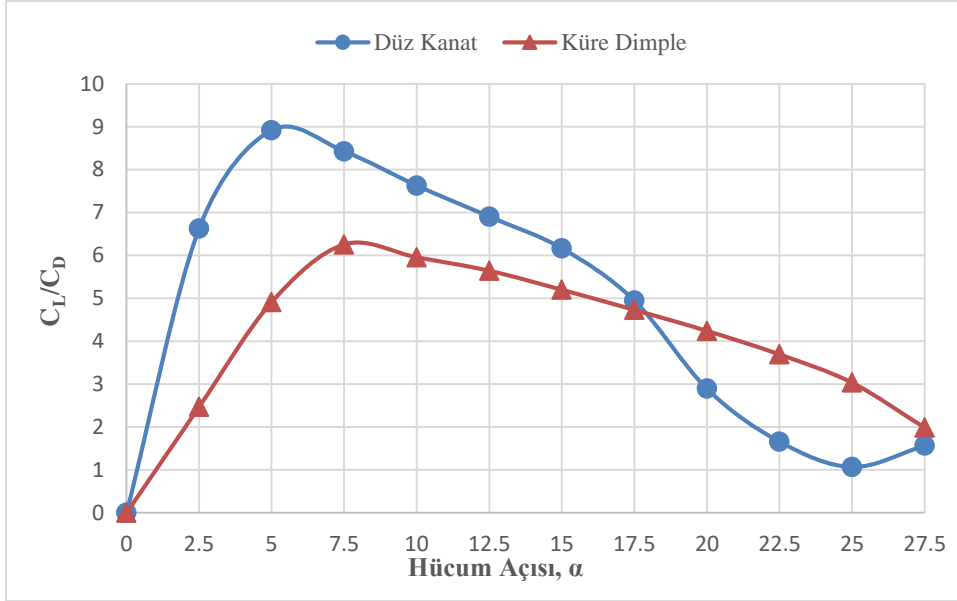


Şekil 6.25. NACA 0015 kanadının düz ve dimple yapısında C_L değerlerinin karşılaştırılması

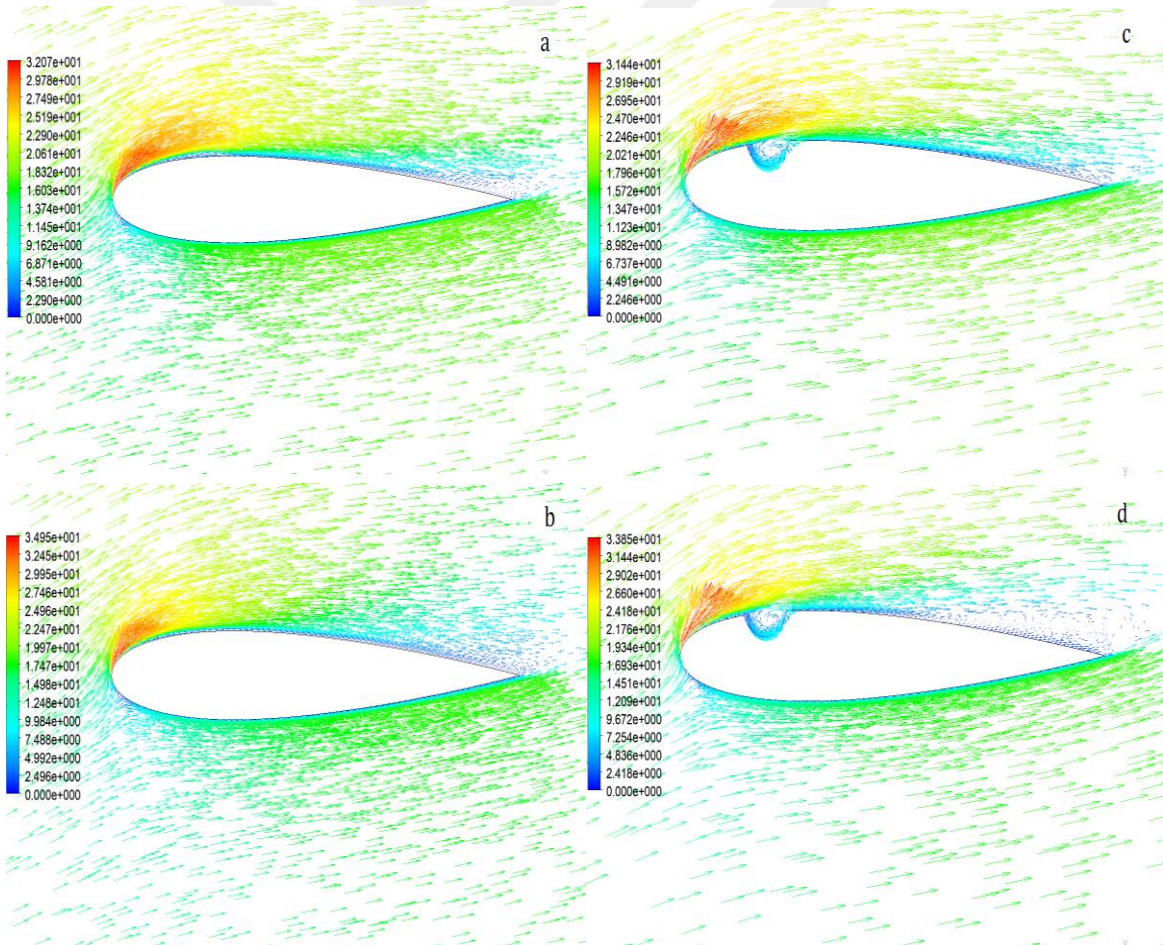


Şekil 6.26. NACA 0015 kanadının düz ve dimple yapısında C_D değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.27’de NACA 0015 kanat profilinin 0° ile $27,5^\circ$ arasındaki hücum açılarında 18 m/s hızda ve düz kanat ve kanatların üst yüzeyinde hücum kenarlarından $0,2c$ uzaklıkta küre dimple eklenerek aerodinamik performansları incelenmiştir. Şekil 6.27’de görüldüğü üzere düz kanatta en yüksek C_L/C_D oranı 5° hücum açısında 9,0 olarak elde edilmiştir. Dimple yapısına sahip kanatta ise en yüksek C_L/C_D oranı $7,5^\circ$ hücum açısında, 6,2 değerindedir. Dimple yapısının en önemli etkisi olarak, düz kanatta tutunma kaybı gerçekleştiğinden sonra aerodinamik performansta düşüşün ani olduğu, dimple yapısına sahip kanatta ise kademeli bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir.



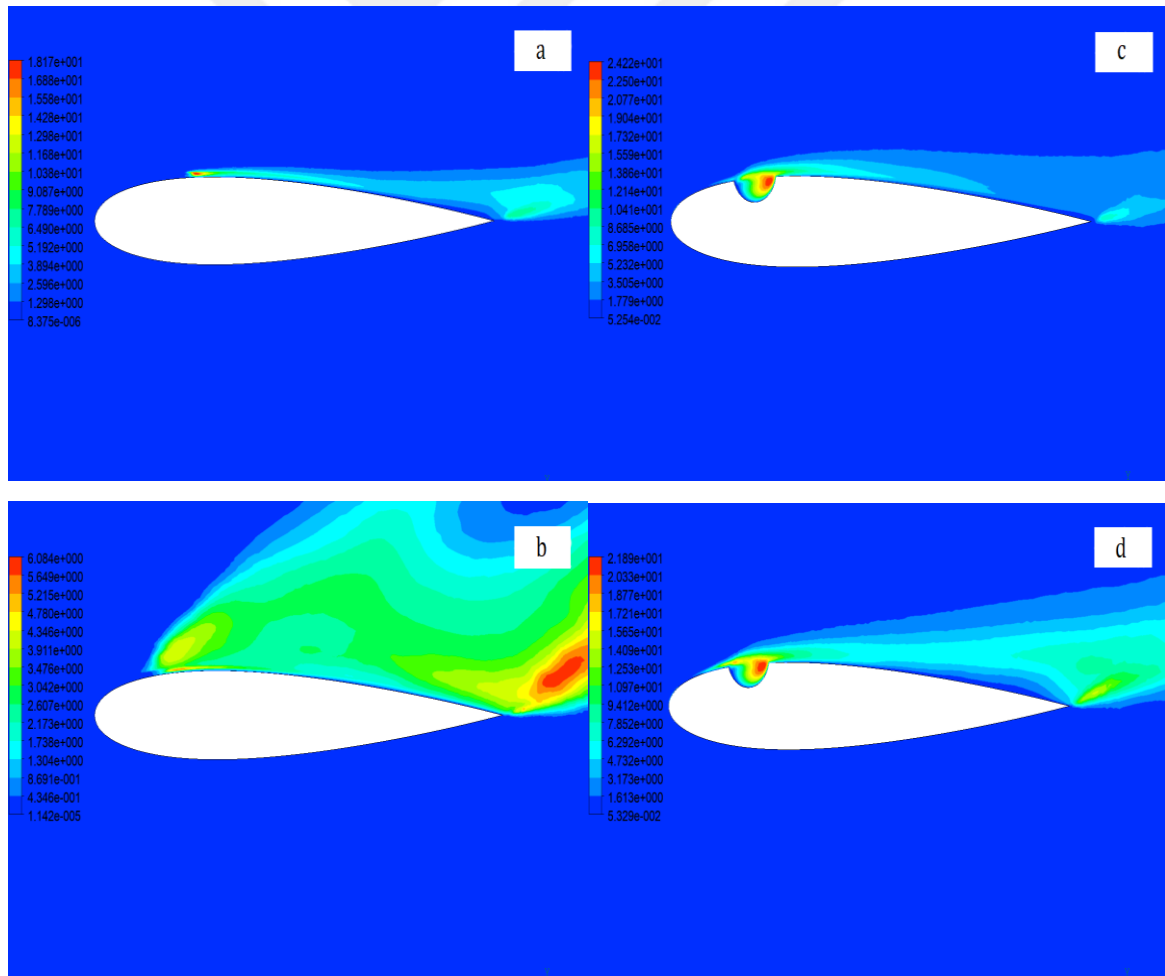
Şekil 6.27. NACA 0015 kanadının düz ve dimple yapısında C_L/C_D oranlarının karşılaştırılması



Şekil 6.28. NACA 0015 kanadının düz ve küre dimple yapısında hız vektörleri a ve c) $17,5^\circ$, b ve d) $22,5^\circ$

Şekil 6.28'de NACA 0015 kanat profilinin $17,5^\circ$ ve $22,5^\circ$ hücum açılarında 18 m/s hız için

düz kanat ve kanatların üst yüzeyinde hücum kenarlarından 0,2c uzaklıkta küre dimple eklenerek hız vektörleri incelenmiştir. Şekil 6.28. a ve c'de $17,5^\circ$ hücum açısında düz ve dimple yapısına sahip kanat modellerinde akışın üst yüzeylerinde aynı oranda ayrıldığı görülmektedir. $22,5^\circ$ hücum açısında düz kanatta akışın kanadın üst yüzeyinde tutunamadığı ve tutunma kaybı sonrasında kaldırma kuvveti etkisinin azaldığı, dimple yapısına sahip kanatta ise aynı hücum açısında akışın kanadın üst yüzeyinde tutunmaya devam ettiği gözlemlenmiştir. Dimple yapısı akış ayrılmasını geciktirerek tutunma kaybının gerçekleştiği açı değerinin artmasını sağlamaktadır. Ayrıca, tutunma kaybı sonrasında meydana gelen kaldırma etkisindeki azalma daha kademeli gerçekleşmektedir. Sonuç olarak, tutunma kaybı öncesindeki hücum açılarında eklenen dimple yapısının, kanat aerodinamik performansına dikkate değer bir etkisi olmamaktadır. Tutunma kaybı gerçekleştiğinden sonraki hücum açılarında dimple yapısı etkisinin olumlu yönde olduğu görülmüştür.

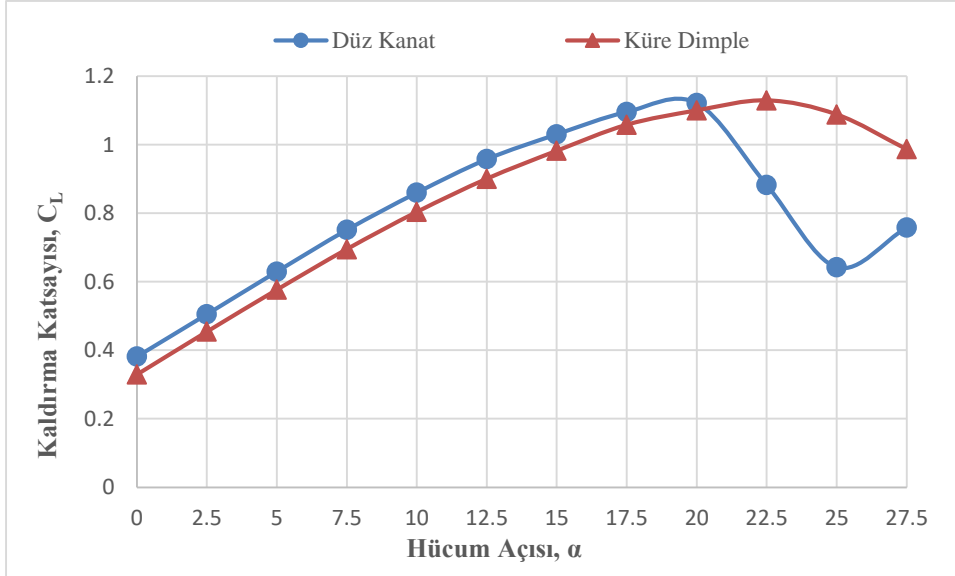


Şekil 6.29. NACA 0015 kanadının düz ve küre dimple yapısında türbülans kinetik enerjileri a ve c) $17,5^\circ$, b ve d) $22,5^\circ$

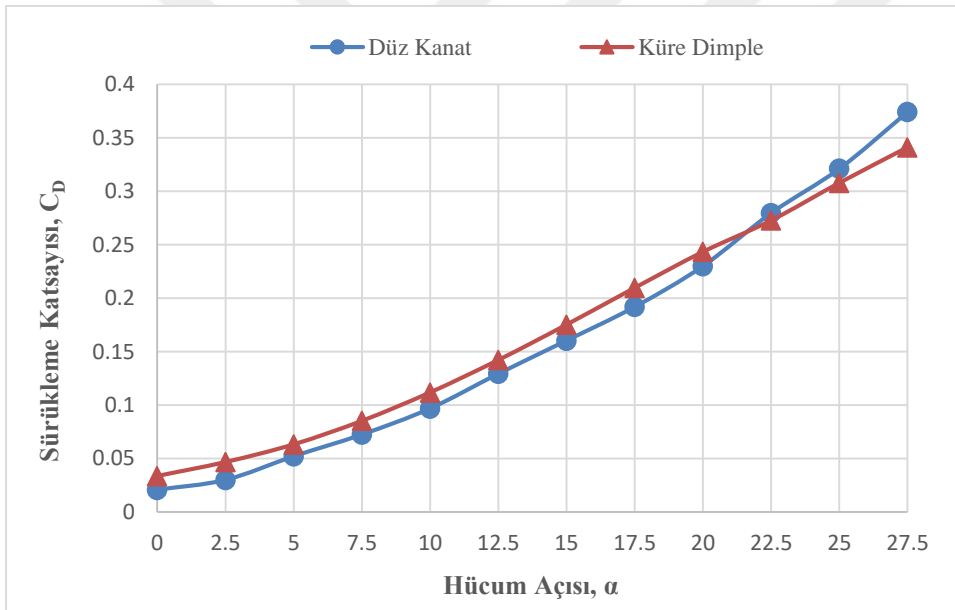
Şekil 6.29'da NACA 0015 kanat profilinin $17,5^\circ$ ve $22,5^\circ$ hücum açılarındaki 18 m/s hız için düz kanat ve kanatların üst yüzeyinde hücum kenarlarından $0,2c$ uzaklıkta küre dimple eklenerek türbülans kinetik enerjileri incelenmiştir. Şekil 6.29.a ve b'ye bakıldığında, düz kanat için türbülans kinetik enerjide artışın görülmeye başladığı nokta aynı değildir. Bunun sebebi, kanadın hücum açısından kaynaklıdır. Hücum açısı $17,5^\circ$ 'den $22,5^\circ$ 'ye çıktığında akış, kanat yüzeyinde tutunamadığı için burada girdap oluşmuştur. Bu durum, türbülans kinetik enerjide artışa sebep olmuştur. $17,5^\circ$ hücum açısında düz ve dimple yapısına sahip kanat profilleri karşılaştırıldığında, dimple yapısı içinde türbülans kinetik enerjinin arttığı görülmektedir. Ayrıca, düz kanatta hücum kenarından $0,3c$ uzaklıkta türbülans kinetik enerjinin artmaya başladığı gözlemlenmiştir. $22,5^\circ$ hücum açısında ise düz kanadın üst yüzeyindeki türbülans kinetik enerji, dimple yapısına sahip kanattakine kıyasla gözle görülür derecede büyüktür. Bunun sebebi, düz kanatta akışın kanadın üst yüzeyine tutunamamasıdır. Firar kenarındaki türbülans kinetik enerji, oluşan girdaplar sebebiyle kanadın üst yüzeyine göre yüksektir.

6.3.2. NACA 4412 kanat profili ve küre dimple etkisi

Şekil 6.30 ve 6.31'de NACA 4412 kanat profilinin 0° ile $27,5^\circ$ arasındaki hücum açılarındaki, 18 m/s hızda ve düz kanat ve kanatların üst yüzeyinde hücum kenarlarından $0,2c$ uzaklıkta küre dimple eklenerek elde edilen kanatlar için C_L (Şekil 6.30) ve C_D (Şekil 6.31) değerleri incelenmiştir. Şekil 6.30'da düz NACA 4412 kanat profilinde 20° hücum açısında en yüksek C_L değeri sağlanmıştır. Bu hücum açısından sonra, açı değeri arttıkça kaldırma kuvvetindeki azalmanın ani bir şekilde olduğu görülmektedir. NACA 4412 kanat profiline küre dimple yapısı eklenmesi, maksimum C_L 'nin elde edildiği kritik hücum açısının 20° 'den $22,5^\circ$ 'ye çıkmasını sağladığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, tutunma kaybı sonrasında gerçekleşen kaldırma katsayısındaki azalmanın daha yumuşak olduğu tespit edilmiştir. Düz kanatta 20° hücum açısında sonra C_L değeri azalmaya başlarken, bu açıda dimple yapısına sahip kanat profilinin kaldırma sağlamaya devam ettiği belirlenmiştir. Şekil 6.31'de hücum açısının artmasıyla her iki kanat için sürükleme katsayısında artış görülmektedir. 0° ile 21° arasında düz kanatta elde edilen sürükleme, dimple yapısı eklenen kanadın sürükleme değerinden daha yüksektir. 21° 'den sonra ise dimple yapısına sahip kanadın sürükleme katsayısının daha az olduğu görülmektedir.

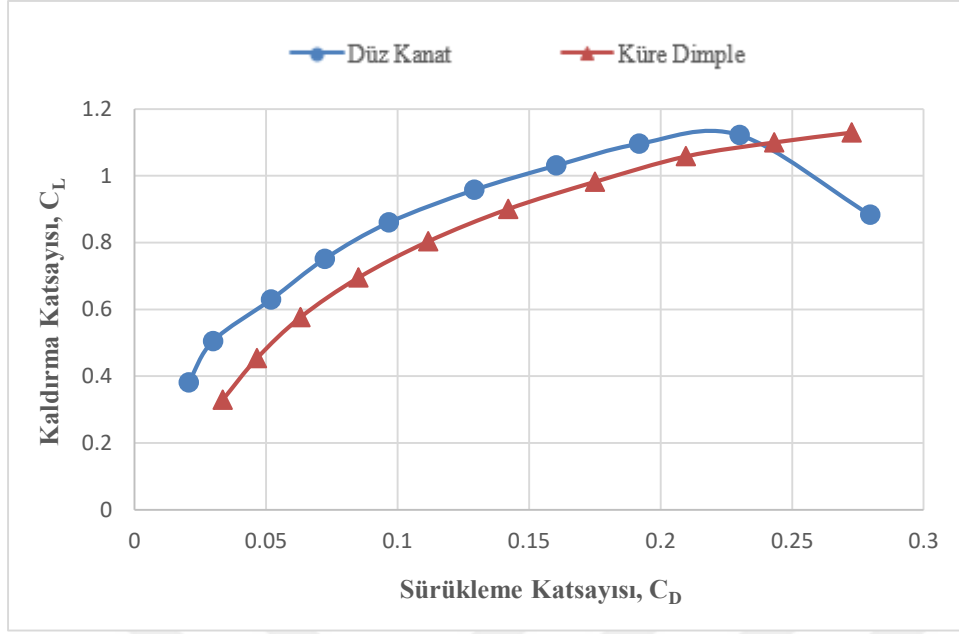


Şekil 6.30. NACA 4412 kanadının düz ve dimple yapısında C_L değerlerinin karşılaştırılması

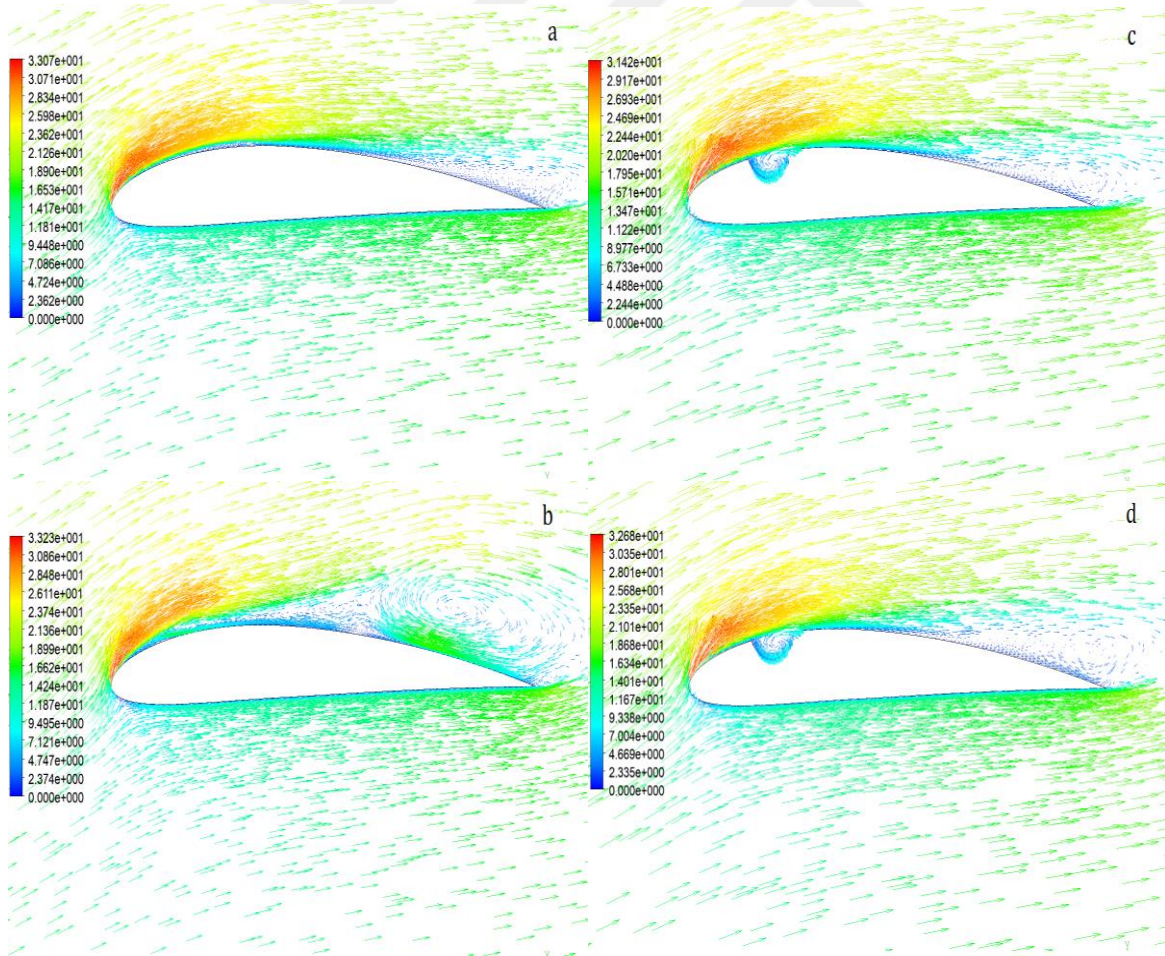


Şekil 6.31. NACA 4412 kanadının düz ve dimple yapısında C_D değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.32’de NACA 4412 kanat profilinin 0° ile $27,5^\circ$ arasındaki hücum açılarında 18 m/s hız içine düz kanat ve kanatların üst yüzeyinde hücum kenarlarından $0,2c$ uzaklıkta küre dimple eklenerek aerodinamik performansları incelenmiştir. Sürüklenme değeri 0,23 olduğunda düz kanatta tutunma kaybının gerçekleşmesinden sonra kaldırma katsayısı değerinin azalması ile sürüklenme poları eğrisi azalmaya başlamıştır. Küre dimple yapısına sahip kanatta ise bu noktada eğrinin artmaya devam ettiği görülmektedir.

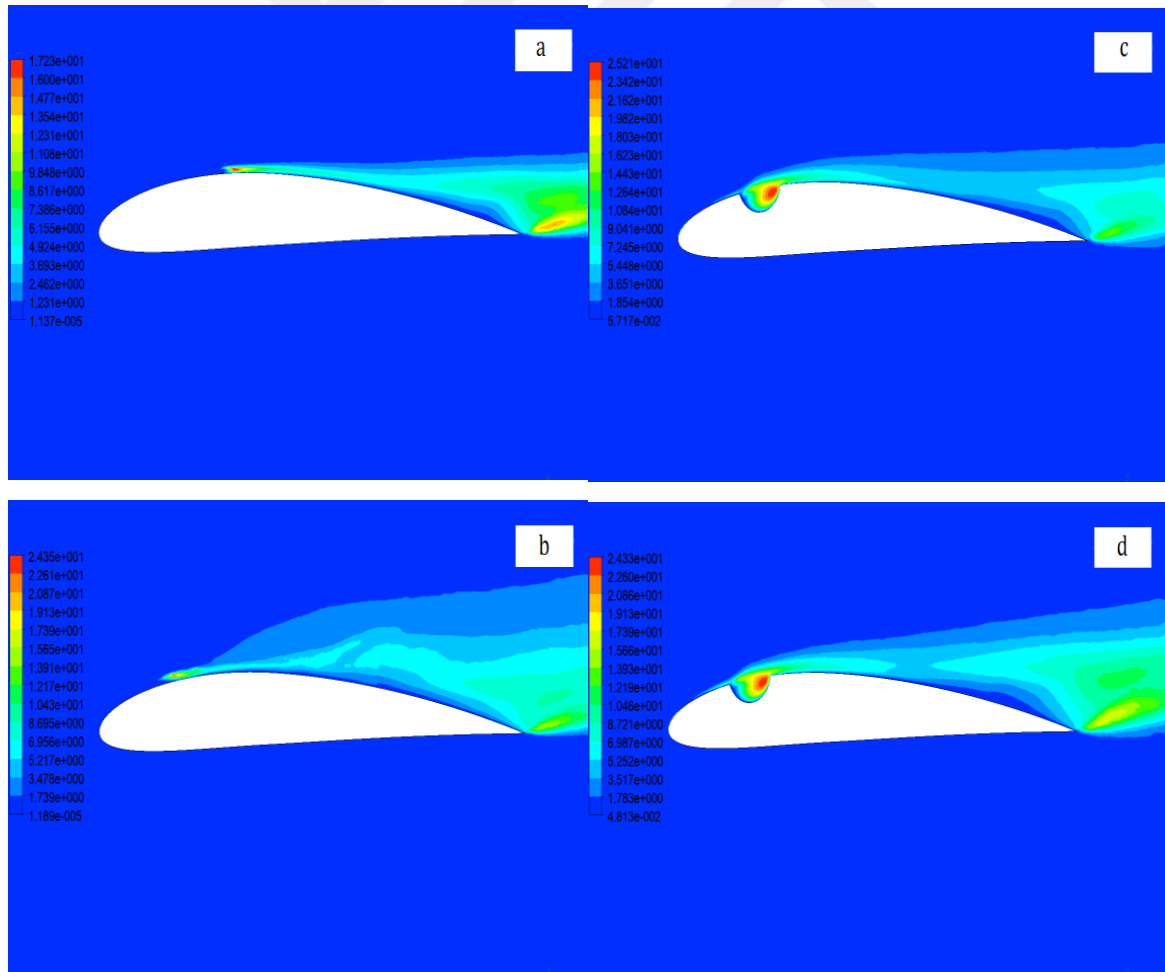


Şekil 6.32. NACA 4412 kanadının düz ve dimple yapısında sürüklenme poları karşılaştırılması



Şekil 6.33. NACA 4412 kanadının düz ve küre dimple yapısında hız vektörleri a ve c) 20°, b ve d) 22,5°

Şekil 6.33'te NACA 4412 kanat profilinin 20° ve $22,5^\circ$ hücum açılarında 18 m/s hızda ve düz kanat ve kanatların üst yüzeyinde hücum kenarlarından $0,2c$ uzaklıkta küre dimple eklenerek hız vektörleri incelenmiştir. Şekil 6.33.a ve c'de 20° hücum açısında düz ve dimple yapısına sahip kanatlarda akış, üst yüzeyde hücum kenarından $0,6c$ 'lik bir bölümde kanatta tutunmaya devam etmektedir. Dimple yapısının en belirgin etkisi, $22,5^\circ$ 'de görülmektedir. Dimple yapısının en belirgin etkisinin gözlemlendiği Şekil 6.33. b ve d'de, aynı hücum açısında düz kanadın üst yüzeyinde akış daha az oranda tutunurken dimple yapısına sahip kanatta dimple etkisi sebebiyle akış daha yüksek oranda tutunmaya devam etmektedir. Dimple yapısı akış ayrılmasını geciktirdiği için tutunma kaybının gerçekleştiği açı artmakta ve tutunma kaybının daha kademeli olmasına olanak sağlamaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda, dimple yapısının tutunma kaybı sonrasında kanat performansını etkilediği, tutunma kaybı gerçekleşmeden önceki hücum açılarında ise performans üzerinde etkisinin az olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

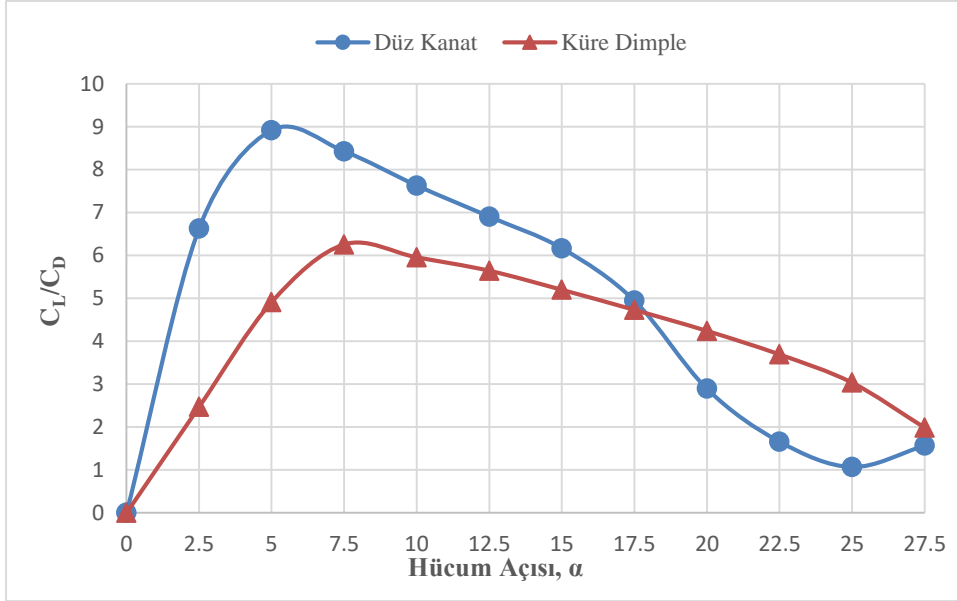


Şekil 6.34. NACA 4412 kanadının düz ve küre dimple yapısında türbülans kinetik enerjileri
a ve c) 20° , b ve d) $22,5^\circ$

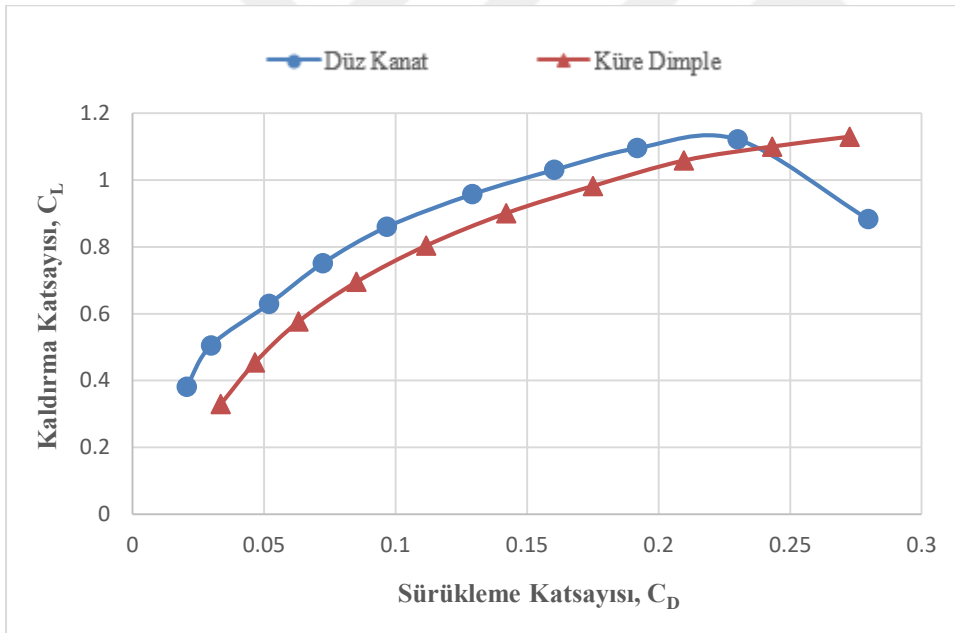
Şekil 6.34'te NACA 4412 kanat profilinin 20° ve $22,5^\circ$ hücum açılarında 18 m/s hız için düz kanat ve kanatların üst yüzeyinde hücum kenarlarından 0,2c uzaklıkta küre dimple eklenerek türbülans kinetik enerjileri incelenmiştir. 20° hücum açısında düz kanatta hücum kenarından 0,3c uzaklıkta kanadın üst yüzeyinde türbülans kinetik enerji değeri, dimple yapısına sahip kanatta dimple içerisinde ölçülen türbülans kinetik enerjiye göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Dimple yapısının eklenmesiyle oluşan çukur bölgede girdap meydana geldiği için burada elde edilen türbülans kinetik enerji değeri fazladır. $22,5^\circ$ hücum açısında ise aynı noktadaki türbülans kinetik enerjileri karşılaştırıldığında, dimple yapısına sahip kanatta daha fazla olduğu görülmektedir. Düz kanatta, 20° hücum açısında hücum kenarından 0,3c uzaklıkta türbülans kinetik enerjinin artmaya başladığı görülürken $22,5^\circ$ hücum açısında ise 0,15c uzaklıkta artmaya başlamıştır. Bu durumun sebebi, $22,5^\circ$ 'de akışın, 20° 'ye kıyasla kanat yüzeyinden hücum kenarına daha yakın noktadan ayrılmaya başlamasıdır. Firar kenarına yakın kısımlarda, türbülans kinetik enerji değerlerinin aynı olduğu görülmektedir.

6.4. Tartışma

Bu tez çalışmasının öncelikli amacı simetrik ve asimetric kanatların yüzeylerine dimple yapısı eklenerek bu yapının aerodinamik performansa etkilerini incelemektir. Çalışmada, simetrik bir kanat olan NACA 0015 kanat modeli ile asimetric bir yapıya sahip olan NACA 4412 kanat modeline dimple yapısı eklenmesi ile analizler gerçekleştirilmiştir. Düz kanat ve dimple yapısına sahip kanatların aerodinamik performansları incelenerek dimple yapısının etkileri değerlendirilmiştir. Bölüm 6.3.1'de Şekil 6.27'de NACA 0015 kanat modeli için sonuçlara bakıldığında düz kanatta en yüksek aerodinamik verim 5° hücum açısında 9,0 olarak elde edilmiştir. Dimple yapısına sahip kanat modelinde ise en yüksek aerodinamik verim $7,5^\circ$ hücum açısında 6,2 olarak bulunmuştur. Simetrik bir kanat olan NACA 0015 kanat modeline dimple yapısı eklenmesiyle maksimum aerodinamik verim değeri düşmüş, ancak bu değer elde edildiği hücum açısı artmıştır. Bu sonuca bakılarak, dimple yapısının kanadın manevra yeteneğini geliştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Kanadın manevra yeteneğinin iyileştirilmesi, insansız hava araçlarının performansını olumlu yönde etkilemektedir. Sonuç olarak, simetrik yapıya sahip NACA 0015 kanat modeli için dimple etkisi, kanadın hareket kabiliyetini geliştirici yönde olmuştur.



Şekil 6.27. NACA 0015 kanadının düz ve dimple yapısında C_L/C_D oranlarının karşılaştırılması



Şekil 6.32. NACA 4412 kanadının düz ve dimple yapısında sürüklenme poları karşılaştırılması

Bölüm 6.3.2’de Şekil 6.32’de NACA 4412 kanat modeli için aerodinamik performans analizi sürüklenme poları kullanarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.32 incelendiğinde düz kanadın aerodinamik veriminin tutunma kaybı başladığı açıya kadar dimple yapısına sahip olan kanada göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, kanada dimple yapısının eklenmesi, sadece düz kanatta tutunma kaybı gerçekleştikten sonra daha yüksek verim sağlamıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda, ticari hava araçlarında kullanılan asimetrik

kanat modellerine dimple yapısının eklenmesi, aerodinamik performansta istenilen etkiyi sağlamadığı sonucuna ulaşılmıştır.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, NACA 0015 ve NACA 4412 olmak üzere 2 kanat modeli için farklı çalışma şartlarında sayısal analizler gerçekleştirilerek kanatların aerodinamik performansları incelenmiştir. Bu incelemeler, farklı şekillere sahip iki kanat modelinin kıyaslanması, aerodinamik performansa hızın etkisi, kanadın üst yüzeyinde hücum kenarından 0,2c uzaklıkta kare, üçgen ve küre olmak üzere 3 farklı dimple yapısının etkisi ve düz kanat ile dimple yapısına sahip kanat profillerinin karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Hız etkisi incelenirken 14 m/s, 18 m/s ve 22 m/s hızlara bağlı olarak, sırasıyla, 91 063, 117 082 ve 143 100 Re sayılarında sonuçlar elde edilmiştir. Bu bölüm dışındaki tüm analizler 18 m/s hızda gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- ✓ NACA 0015 kanat modelinde 0° 'de kaldırma katsayısı değeri 0 iken NACA 4412 kanat modeli için aynı açıda kaldırma katsayısı 0.4 olarak belirlenmiştir.
- ✓ NACA0015 kanadında NACA 4412 kanadına kıyasla daha düşük kaldırma ve sürükleme katsayısı elde edilmiştir.
- ✓ NACA 0015 ve NACA 4412 kanat modellerinde sırasıyla 17° ve 20° 'de tutunma kaybı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara bakılarak, kanat şeklinin aerodinamik performansa etki ettiği sonucuna ulaşılmıştır.
- ✓ NACA 0015 kanadı için hız arttıkça en yüksek aerodinamik verimin elde edildiği açı değerinin azalmasına rağmen C_L/C_D oranının arttığı tespit edilmiştir.
- ✓ NACA 4412 kanat modelinde hız arttıkça C_L değerinde artış gözlemlenmiştir.
- ✓ Her iki kanat profili için de hız artışı, tutunma kaybının gerçekleştiği açıda bir değişime sebep olmamıştır.
- ✓ Hız artışının, kanatların aerodinamik performanslarını olumlu yönde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.
- ✓ NACA 0015 kanat modeline kare, üçgen ve küre olmak üzere eklenen dimple yapıları ile maksimum aerodinamik elde edilen açı değişmemiş olup C_L/C_D oranı değişmiştir. Diğer dimple yapıları ile kıyaslandığında, küre dimple yapısına sahip kanadın en yüksek aerodinamik verim sağladığı görülmüştür.
- ✓ NACA 4412 kanadında, tutunma kaybının gerçekleştiği açıda en yüksek kaldırma katsayısı küre dimple için elde edilmiştir.

- ✓ Kanat profillerine dimple yapısının eklenmesi ile türbülanslı sınır tabakası oluştuğu için akış ayrılması geçikmiştir ve tutunma kaybının gerçekleştiği açı artmıştır.
- ✓ NACA 0015 kanadı için düz kanatta tutunma kaybı 17° 'de gözlenirken küre dimple yapısına sahip kanatta 22.5° 'de görülmüştür.
- ✓ NACA 4412 kanadı için düz kanatta tutunma kaybı 20° 'de elde edilmiştir. Düz kanada küre dimple eklenmesi ile bu açı değeri 22.5° 'ye çıkmıştır.
- ✓ Her iki kanat modelinde de kanada dimple eklenmesi ile C_L değerinde tutunma kaybı sonrasında gerçekleşen azalmanın daha kademeli olduğu tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, kanat profilinin şekli, hızın aerodinamik performansa etkisi, eklenen dimple yapısının şekli ve dimple yapısının aerodinamik değerlerde yarattığı değişim analiz edilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda kanat yüzeyine küre dimple yapısının eklendiği bölge değiştirilerek bu analizler tekrarlanabilir. Bu bağlamda kanadın alt yüzeyine ve hem alt hem alt yüzeyine dimple eklenerek en iyi sonuç elde edilen model analiz edilebilir. Ayrıca, eklenen dimple yapısının hücum kenarından firar kenarına doğru farklı yerlerde sağlayacağı etkiler de incelenebilir. Buna ek olarak, eklenen dimple yapısının genişliği ve yüksekliği değiştirilerek aerodinamik performansa etkisini gözlemlemek yapılacak çalışmalar arasında yer alabilir.

KAYNAKLAR

1. Seydioğulları, H. S. (2013). Sürdürülebilir kalkınma için yenilenebilir enerji. *Planma*, 23(1), 19-25.
2. Kumbur, H., Özer, Z., Özsoy, H. D. ve Avcı, E. D. (2005, 19-21 Ekim). *Türkiye’de geleneksel ve yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli ve çevresel etkilerinin karşılaştırılması*. III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisinde sunuldu, Mersin.
3. Hansen, M. O. L. (2008). *Aerodynamics of Wind Turbines*. (Second edition). London: Earthscan, 1-2.
4. Cengiz, Ç. (2010). *Slatlı Kanat Profiline Etrafındaki Düşük Reynolds Sayılı Hava ve Su Akışlarının İncelenmesi ve Aerodinamik Performans Analizleri*, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-2.
5. Şahin, İ. (2015). *Bir Savonius Rüzgar Türbininin Performansının Sayısal İncelenmesi ve İyileştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2.
6. Karaoğlu, İ. (2015). *CN-235 CASA Uçağı Kıvrık Kanat Tasarımının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, İstanbul, 1.
7. Soğukpınar, H., Bozkurt, I., Pala, M. and Türkmenler, H. (2015). Aerodynamic numerical testing of megawatt wind turbine blade to find optimum angle of attack. *International Journal of Engineering&Applied Science*, 7(4), 1-9.
8. Kevadiya, M. and Vaidya, H. A. (2013). 2D analysis of NACA 4412 airfoil, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(5), 1686-1691.
9. Şahin, İ. and Acır, 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.
10. Mizoguchi, M., Kajikawa, Y. and Itoh, H. (2016). Aerodynamic characteristics of low-aspect-ratio wings with various aspect ratios in low Reynolds number flows, *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, 59(2), 56–63.
11. Rubel, R. I., Uddin, K., Islam, 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.
12. Petinrin, M. O., and Onoja, V. A. (2017). Computational study of aerodynamic flow over NACA 4412 airfoil, *British Journal of Applied Science & Technology*, 21(3), 1-11.

13. Tanürün, H. E. (2018). *Farklı Kanat Açıklık Oranlarında NACA 0024 Kanadı Üzerinde Tüberkül ve Dimple Yapısının Sayısal Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7, 21.
14. Livya, E., Anitha, G. and Valli, P. (2015). Aerodynamic analysis of dimple effect on aircraft wing, *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 9(2), 350-353.
15. Kapoor, A. and Jaykrishnan, R. (2018, February). *Study and design of golf ball like dimpled aircraft 2-D wing and effects on aerodynamic efficiency*, Paper presented at Proceedings of the International Conference on Modern Research in Aerospace Engineering. Springer, Singapore.
16. Srivastav, D. (2012). Flow control over airfoils using different shaped dimples, *International Conference on Fluid Dynamics and Thermodynamics Technologies*, 33, 92-97.
17. Wang, X. Y., Lee, S., Kim, P. and Seok, J. (2015). Aerodynamic effect of 3D pattern on airfoil, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 39(3), 537-545.
18. Rajasai, B., Tej, R. and Srinath, S. (2015). Aerodynamic effects of dimples on aircraft wings, *International Journal of Advancements in Mechanical and Aeronautical Engineering*, 2(2), 25-28.
19. Mustak, R., Khan, Md. H. U., and Molla, Md. H. O. R. (2017). Design and construction of NACA-4415 airfoil with various shaped surface modifications, *Asia Pacific Journal of Engineering Science and Technology*, APJEST, 3 (1), 28 – 38.
20. Devi, P. B. and Shah, D. A. (2017). Numerical simulation of dimples in airfoil using MATLAB, *Materials Science and Engineering*, 197(1), 1-10.
21. Soh, Z. P., Al-Obaidi, A. S. M. (2016, July). *Numerical analysis of the shape of dimple on the aerodynamic efficiency of NACA 0012 airfoil*, Paper presented at 6th Eureka International Grand Challenges Engineering Research Conference, Kuala Lumpur, Malaysia.
22. Saraf, A. K., Singh, M. and Chouhan, T. S. (2017). Effect of dimple on aerodynamic behavior of airfoil, *International Journal of Engineering and Technology*, 9(3), 2268-2277.
23. Maheswaran, R. and Manikandan, R. (2016). CFD analysis of aerofil using dimples and prevent radar signals using stealth technology, *Archives of Materials Science and Engineering*, 77(2), 72-77.
24. Ghil, M., Lui, J., Wang, C. and Wang, S. (2004). Boundary-layer separation and adverse pressure gradient for 2-D viscous incompressible flow, *Physica D*, 197(1), 149-173.

25. Reynolds, O. (1883). An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and the law of resistance in parallel channels, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 174, 935-982.
26. Sadraey, M. H. (2013). *Aircraft design*. USA: John Wiley & Sons, Ltd., 171, 183.
27. Anderson, J. D. (1989). *Introduction to flight*. (Third Edition). New York: McGraw-Hill, 179.
28. Yükselen, M. A. (2019). Kanat profillerinin aerodinamiği [PDF belgesi]. Erişim adresi <https://web.itu.edu.tr/yukselen/Uck351/05-%20Kanat%20profillerinin%20aerodinami%20F0i.pdf>
29. Çengel, Y. and Cimbala, J. M. (2006). *Fluid mechanics*. New York: McGraw-Hill.
30. Nair, S. R. and Nair, S. R. (2014). Study and comparison of aerodynamic forces on an aircraft and suspension bridge, *IOSR Journal of Engineering*, 4(4), 43-46.
31. Sullivan, A. (2010). *Aerodynamic forces acting on an airfoil*.
32. Sarlak, H., Frère, A., Mikkelsen, R. F. and Sørensen, J. N. (2018). Experimental investigation of static stall hysteresis and 3-Dimensional flow structures for an NREL S826 wing section of finite span. *Energies*, 11(6).
33. 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.
34. Anderson, J. D. (2001). *Fundamentals of aerodynamics*. (Third Edition). New York: McGraw-Hill, 282.
35. Karaman, U. (2018). *IX3 Düzenindeki Ayıraçlı Bir Yakıt Demetinde Akışın Türbülans Karakteristiklerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Metoduyla İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 22.
36. Aydoğan, Z. A. (2018). *Transonik Bir Airfoil Etrafındaki Akışın Farklı Türbülans Modelleriyle İncelenip Karşılaştırılması*, Bitirme Çalışması, İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği, İstanbul, 6-7.
37. Malipeddi, A. K., Mahmoudnejad, N. and Hoffman, K. A. (2012). Numerical analysis of effects of leading-edge protuberances on aircraft wing performance, *Journal of Aircraft*, 49 (5), 1336-1344.
38. 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.

39. Maani, R. E., Elouardi, S., Radi, B. and Hami, A. E. (2018). Study of the turbulence models over an aircraft wing, *ISTE OpenScience*, 2(2).
40. Versteed, H. K. and Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics* (Second edition). England: Pearson Education Limited.
41. *Fluent 6.1 User's Guide*. (2003). New Hampshire: Fluent Inc.
42. Lanzafame, R., Mauro, S. and Messina, M. (2014). 2D CFD Modeling of H-darrieus wind turbines using a transition turbulence model, *Energy Procedia*, 45, 131-140.
43. Tanürün, H. E. ve Acır, A. (2019). Modifiye edilmiş NACA-0015 kanat yapısında tüberkül etkisinin sayısal analizi, *Politeknik Dergisi*, 22(1), 185-195.
44. Khare, A., Singh, A. And Nokam, K. (2009, November). *Best particles in grid generation for CFD applications using hypermesh*, Paper presented at ATC: HyperWorks Technology Conference, Ludwigsburg, Germany.
45. Erdoğan, T. ve Terzioğlu, D. (2018). *Uçak Kanat Profilinin Had Yazilimi Ile Analizi*, Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makina Mühendisliği, Eskişehir, 14.
46. Parashar, S. S. and Bhambre, V. G. (2016). Numerical investigation for wind turbine blade for higher reynolds number for darrieus rotor. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3(6), 2298-2305.
47. Düz, H. (2016). Rüzgar türbinleri için kanat profillerinin sayısal olarak test edilmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 4(2), 41-51.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SALMAN, Meltem
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 21.09.1992, Adana
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (531) 815 12 49
 e-mail : meltem.salman@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Hacettepe Üniversitesi/Nükleer Enerji Mühendisliği	2015
Lise	Adana Ticaret Odası Anadolu Lisesi	2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-2019	Efe TMGDK	TMGD

Yabancı Dil

İngilizce
 İtalyanca

Yayınlar

Salman, M., Tanürün, H. E., Acır, A. ve Kaya, A. F. (2019, 11-13 Nisan). *NACA 4412 Kanat modeli yapısında çukur etkisinin sayısal analizi*. 2nd International Conference on Energy Research – ENRES, Muğla.

Hobiler

Voleybol, Film izlemek, Yürüyüş yapmak



GAZİ GELECEKTİR..