

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
HAVACILIK VE UZAY BİLİMLERİ  
UÇAK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**NACA 4421 KANAT PROFİLİ ÜZERİNDE ÇUKUR  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Hazırlayanlar**

**Buse KANAT  
Semanur TUFAN  
Esmâ EZEROĞLU  
Aleyna GÜZELCE**

**Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi İsmail ATA**

**Bitirme Tezi**

**Haziran 2024  
KAYSERİ**

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
HAVACILIK VE UZAY BİLİMLERİ  
UÇAK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**NACA 4421 KANAT PROFİLİ ÜZERİNDE ÇUKUR  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ  
Bitirme Tezi**

**Hazırlayan**

**Buse KANAT  
Semanur TUFAN  
Esmâ EZEROĞLU  
Aleyna GÜZELCE**

**Danışman**

**Dr. Öğr. Üyesi İsmail ATA**

**Bu çalışma, Buse Kanat, Semanur Tufan, Esmâ Ezeroğlu,  
Aleyna Güzelce tarafından TÜBİTAK 2209-A projesi kapsamında  
tamamlanmıştır.**

**Haziran 2024  
KAYSERİ**

## **BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK**

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederiz. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımızı ve referans gösterdiğimizi belirtiriz.

Buse KANAT

Semanur TUFAN

Esmâ EZEROĞLU

Aleyna GÜZELCE

**“NACA 4421 Kanat Profili Üzerinde Çukur Etkisinin İncelenmesi”** adlı Bitirme Tezi,  
Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Mühendisliği Bölümü  
Lisans Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

**Hazırlayanlar**

Buse KANAT

Semanur TUFAN

Esma EZEROĞLU

Aleyna GÜZELCE

**Danışman**

Dr. Öğr. Üyesi İsmail ATA

**Uçak Mühendisliği Bölüm Başkanı**

Doç. Dr. Murat AYDIN

**Dr. Öğr. Üyesi İsmail ATA** danışmanlığında **Buse KANAT, Semanur TUFAN, Esmâ EZEROĞLU, Aleyna GÜZELCE** tarafından hazırlanan “**NACA 4421 Kanat Profili Üzerinde Çukur Etkisinin İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü Lisans bitirme tezi olarak kabul edilmiştir.

Gün / Ay / Yıl

**JÜRİ:**

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi İsmail ATA

**ONAY:**

Bu tezin kabulü Uçak Mühendisliği Bölüm Başkanlığınca ..... tarihi ile onaylanmıştır.

..... / ..... / .....

Doç. Dr. Murat AYDIN

Uçak Mühendisliği Bölüm Başkanı

## TEŞEKKÜR

Bize çalışmalarımız süresince her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan başta danışman hocamız Dr. Öğr. Üyesi İsmail ATA' ya olmak üzere Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesinde bulunan değerli eğitimcilerimize teşekkürlerimizi sunarız.

Buse KANAT

Semanur TUFAN

Esmâ EZEROĞLU

Aleyna GÜZELCE

Haziran 2024, KAYSERİ

## NACA 4421 KANAT PROFİLİ ÜZERİNDE ÇUKUR ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**Buse KANAT  
Semanur TUFAN  
Esmâ EZEROĞLU  
Aleyna GÜZELCE**

**Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği  
Bölümü, Bitirme Tezi, Haziran 2024  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail ATA**

### ÖZET

Günümüzde havacılık endüstrisi hızla büyüyen ve önemi artan bir alan haline gelmesiyle birlikte uçakta performansı artırmak için birçok uygulama yapılmaktadır. Kanat üzerinde performans artırmak için birçok uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalardan bir tanesi de kanat yüzeyinde golf topundan esinlenerek sürtünmeyi azaltma, kaldırmayı artırma, yakıt tasarrufu gibi birçok açıdan iyileştirme yapılmasını amaçlayan çukurların yerleştirilmesidir. Bu çalışmada kanat üzerindeki çukur uygulamasının elips seçilmesinin nedeni elips çukurun diğer şekillere göre verimlilik açısından daha iyi sonuç vermesidir. Elips çukurların konfigürasyonu ise üst yüzeyde kanat veterinin  $60^\circ$ 'ından başlanarak firar kenarına gidildikçe kademeli olarak azalan ve her kademede çukurların arasındaki boşluk hizasına bir sonraki kademenin çukurları gelecek şekildedir. Böylelikle boşluklardan ilerleyen havanın kanat yüzeyine tutunması sağlanarak olası akış ayrılımlarının önüne geçilmiştir. Üzerinde elips şekilli ve belirlenen konumda yerleştirilmiş çukurlar bulunan NACA 4421 kanat profili, üç boyutlu olarak CATIA uygulamasında modellenmiştir. ANSYS FLUENT uygulamasına aktarılan modellemenin  $0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ, 16^\circ$ 'lik hücum açılarında ve 30 m/s giriş hızında değişen değerlerde akış analizleri gerçekleştirilmiş ve baz alınan kanat profili ile karşılaştırılmıştır.  $16^\circ$  hücum açısında çukurlu konfigürasyonla  $C_L$  değerinin  $36,73\%$  arttığı,  $C_D$  değerinin  $36,70\%$  azaldığı görülmüştür.  $16^\circ$  hücum açısında çukurlu konfigürasyonun düz kanada göre akış tutunmasının maksimum şekilde tespiti yapılmıştır. Düz kanatta  $12^\circ$  stall oluşurken çukurlu kanatta stall gözlemlenmemiştir.

**Anahtar Kelimeler:** NACA 4421, Sürtünme etkisi, Çukurluk etkisi, Aerodinamik verimlilik

## INVESTIGATION OF THE PITCH EFFECT ON NACA 4421 WING PROFILE

**Buse KANAT  
Semanur TUFAN  
Esmâ EZEROĞLU  
Aleyna GÜZELCE**

**Erciyes University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of  
Aeronautical Engineering Graduation Thesis, June 2024  
Supervisor: Assist. Prof. İsmail ATA**

### ABSTRACT

Today, as the aviation industry has become a rapidly growing and increasingly important field, many applications are being made to increase aircraft performance. Many applications have been carried out to increase performance on the wing. One of these applications is the placement of dimples on the wing surface, inspired by golf balls, aiming to improve many aspects such as reducing friction, increasing lift, and fuel saving. The reason why ellipse was chosen as the dimple application on the wing in this study is that the ellipse dimple gives better results in terms of efficiency than other shapes. The configuration of the ellipse pits is such that it starts from 60% of the wing chord on the upper surface and gradually decreases as it moves to the trailing edge, and at each level, the pits of the next stage come to the level of the gap between the pits. In this way, possible flow separations are prevented by ensuring that the air moving through the gaps clings to the wing surface. The NACA 4421 airfoil, which has an ellipse shape and pits placed in a determined position, was modeled in three dimensions in the CATIA application. Flow analyzes of the modeling transferred to ANSYS FLUENT application were performed at varying values at angles of attack of 0°, 4°, 8°, 12°, 16° and 30 m/s entry speed and compared with the base airfoil. It was observed that the  $C_L$  value increased by 36.73% and the  $C_D$  value decreased by 36.70% with the dimpled configuration at an angle of attack of 16°. Maximum flow retention of the dimpled configuration compared to the straight wing was determined at an angle of attack of 16°. While a 12° stall occurred on the straight wing, no stall was observed on the dimpled wing.

**Keywords:** NACA 4421, Drag effect, Dimple effect, Aerodynamic efficiency



## İÇİNDEKİLER

### NACA 4421 KANAT PROFİLİ ÜZERİNDE ÇUKUR ETKİSİNİN İNCELENMESİ

TEŞEKKÜR .....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
GİRİŞ .....	1
1. GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	2
1.1. Problem Durumu .....	2
1.2. Araştırmanın Amacı .....	3
1.3. Araştırmanın Önemi.....	9
2. YÖNTEM VE MATERYAL.....	12
3. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	19
4. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	26
4.1 Sonuçlar .....	26
4.2. Öneriler .....	27
KAYNAKÇA .....	28

## KISALTMALAR

LE: Leading Edge

TE: Trailing Edge

PIV: Particle Image Velocity

TSP: Temperature Sensitive Techniques

TKE: Türbülans Kinetik Enerji

## TABLÖLAR LİSTESİ

**Tablo 1.** Kaldırma Katsayısının Hücüm Açısına Göre Değişimi

**Tablo 2.** NACA 4421 Ağ Yapısı Kalite Değerleri

**Tablo 3.** Düz ve Çukurlu Kanatta  $C_L$  ve  $C_D$  Değerleri

## ŞEKİLLER LİSTESİ

**Şekil 1.** a) Kaldırma, b) Sürüklenme katsayılarının karşılaştırılması

**Şekil 2.** Golf Topunda Akış Ayrılması

**Şekil 3.**Çukur Yapısı

**Şekil 4.** (A)Düzgün Kanat Profili, (B) Veterin %10'unda Çukurlu, (C) Veterin %25'inde Çukurlu, (D) Veterin %50'sinde Çukurlu, (E) Veterin %75'inde Çukurlu

**Şekil 5.** İçeride Doğru Yerleştirilmiş Dizilim

**Şekil 6.** NACA 4421 kanat profili ve üzerinde çukur uygulamasının gösterimi

**Şekil 7. a)** NACA 4421 Üzerinde eliptik çukur gösterimi ve **b)** boyutlandırılması

**Şekil 8.**Çukur Konfigürasyonunun Gösterimi

**Şekil 9.**Çukur Konfigürasyonunun Kanat Boyunca Gösterimi

**Şekil 10.** 7075 T651 Alüminyum Alaşımı Mekanik Özellikleri

**Şekil 11.**Kutu Tipi Akış Alanı(Box Domain)

**Şekil 12.a.** Düz Kanat Ağ Yapısı **12.b.** Çukurlu Kanat Ağ Yapısı

**Şekil 13.** Düz ve Çukurlu Kanatta  $C_L - \alpha$  Grafiği

**Şekil 14.** Düz ve Çukurlu Kanatta  $C_D - \alpha$  Grafiği

**Şekil 15.** Düz ve Çukurlu Kanat Basınç Dağılımı

**Şekil 16.** Düz ve Çukurlu Kanat Akış Dağılımı

**Şekil 17.a.**16° hücum açısı düz kanat akış tutunması **b.**16° çukurlu kanat akış tutunması

## GİRİŞ

Havacılıkta kanatların uçaklar için yüksek taşıma sağlaması beklenir. Kanat profiline manevra kabiliyeti, yüksek taşıma, düşük sürüklenme kuvveti ise aerodinamik verimliliğe bağlıdır. Aerodinamik verimliliği artırmak için uçak üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmakta olup çoğu kanat üzerine yürütülmüştür. Bu çalışmada golf topunun çukurlu yapısından esinlenerek kanat yüzeyinde çukur konfigürasyonu yapılmıştır. Golf toplarının yapısı incelenecek olursa; yüzeyi çukurlu olan golf topları, yüzeyi pürüzsüz olanlara göre iki kat daha uzak mesafeye ulaşabilir. Yüzeyi pürüzsüz olan topta hava akışı düzensiz olup top etrafında türbülans alanı oluşumu daha fazladır. Top üzerine çukur eklenmesiyle türbülans alanı azaltılır böylece sürtünme en aza indirgenmiş olur. Bu durum çukurlu topun iki kat daha uzak mesafeye gitmesini sağlar. Ayrıca çukur, top üzerindeki akış ayrılmasını geciktirerek daha düzgün bir akış sağlar. Araştırmada golf topunun yüzeyindeki çukur etkisinin avantajlarından yola çıkarak çukuru kanat yüzeyine entegre ederek aerodinamik verimlilik iyileştirilmiştir.

Bu çalışmada çukur etkisinin incelenmesinde, çukurun kanat üzerindeki akış ayrılmasını geciktirerek aerodinamik verimliliği iyileştirmesi esas alınır. Kanattaki çukurlu yapı türbülanslı bir sınır tabakası oluşturarak aynı kuvvete maruz kaldığında pürüzsüz yüzeye göre sürüklenme kuvvetinin daha az olmasını sağlar. Çukurun bahsedilen olumlu etkileri sayesinde kanattaki aerodinamik verimlilik artırılmış olunur.

## 1. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

### 1.1. Problem Durumu

Uçak performansı, uçağın tasarlanırken belirlenen hız, kalkış mesafesi, menzil, yakıt tüketimi gibi gereksinimleri ne kadar gerçekleştirebildiğini ifade etmektedir. Uçuş esnasında uçağın performansını azaltan birçok olumsuz etken mevcuttur. Kanat üzerindeki sürüklenme kuvveti de bu etkenlerden biridir. Sürüklenme kuvvetinin fazla olması kanadın aerodinamik verimliliğini düşürerek akış ayrılmalarının artmasına, kaldırma kuvvetinin azalmasına sebep olur. Yakıt tüketimini artırarak uçuş maliyetinin istenilen değerden daha fazla olmasına yol açar. Ayrıca kalkış mesafesini artırması da bir diğer olumsuz etkisidir. Kanat profilinin geometrik yüzey modifikasyonu bu sorunları çözmenin etkili bir yöntemidir. Bu modifikasyonlardan birisi de kanattaki çukur etkisidir. Kanat üzerindeki çukurlu yapı akış ayrılmasını geciktirerek ve türbülanslı bir sınır tabakası oluşturarak aynı kuvvete maruz kaldığında pürüzsüz kanat yüzeyine göre uçağın havada daha fazla mesafe katetmesini sağlar. Bunun temel nedeni çukur etkisinin sürüklenme kuvvetini azaltmasıdır.

Düşük hızlarda kanat yüzeyinde tutunma daha düşüktür. Çukur etkisinin düşük hızlarda daha fazla taşıma oluşturması ve aerodinamik verimliliğe olan pozitif etkisi sebebiyle bu çalışmada düşük hızlarda kullanılan pozitif kamburluklu NACA 4421 kanat profili seçilmiştir. Ele alınan problem, seçilen kanat profili üzerinde çukur etkisinin kullanımıyla iyileştirilir.

## 1.2. Araştırmanın Amacı

Uçak üzerindeki momentler, hareketler ve basınçlar aerodinamik olarak adlandırılır. Bir uçağın aerodinamik verimliliği uçağın etkinliğini belirleyen ana parametrelerden biridir. Aerodinamik performansın iyileştirilmesi hem askeri hem de ticari çıkarlar açısından çok önemlidir. Aerodinamik verimliliği iyileştirerek maliyet düşürülür ve askeri alanda uçağın manevra kabiliyeti artırılır. Uçakta aerodinamik verimliliği artırmanın birçok farklı yöntemi bulunmaktadır. Bu konuyla ilgili gerçekleştirilen çalışmaların çoğunluğu kanat üzerine yürütülmüştür. Kanat profili tasarımı ve seçimi, uçak performansında önemli bir karar verici faktördür. Seçilen NACA 4421, ön kanattan %30 (0,3 giriş) uzaklıkta yer alan maksimum %4 (veter uzunluğunun 0,04'ü) kambere sahip ve veter maksimum %21 kalınlığında olan bir kanat profilidir. Kanat ile ilgili önemli parametreler aşağıda verilmiştir:

Kamber, bir kanat profilinin ön kenardan arka kenara doğru olan eğrisinin dışbükeyliği.

Veter, kanat profilinin hücum kenarını ve arka kenarını birleştiren hayali düz çizgi.

Hücum kenarı, kanat profili üzerinde havayla ilk buluşan nokta, yani kanat profili üzerinde en öndeki noktadır.

Firar kenarı, kanat profilinin üst yüzeyinden gelen hava akışının, kanat profilinin arkasından gelen hava akışıyla buluştuğu noktadır.

Akış ayrılması; bir gövdenin yüzeyi üzerinde hareket eden akışkan, viskoz kuvvet nedeniyle gövdenin yüzeyinden ayrılmaya başlaması ve bir iz yaratarak sapması şeklinde tanımlanır.

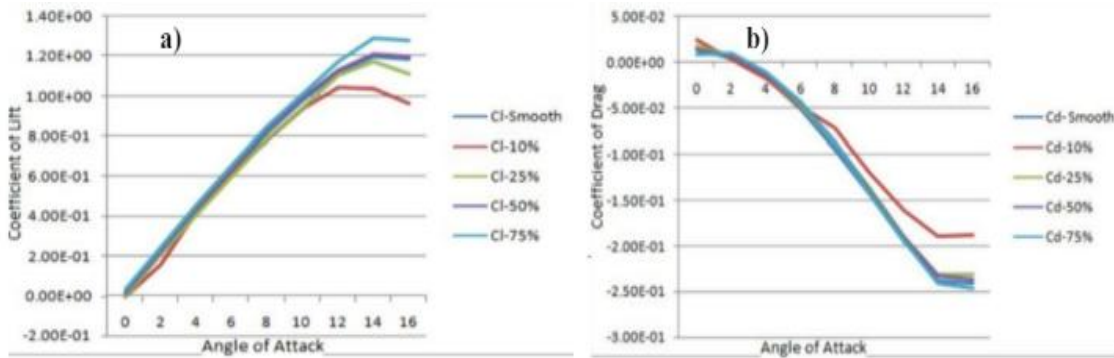
Stalling; kanat profili yeterli havayı alamadığında, kaldırma kuvveti oluşturamadığında stall meydana gelir.

Geçmişten günümüze havacılık sektörünün gelişmesi birçok kolaylığı beraberinde getirmiştir. Ancak bazı hususlarda giderilmesi ya da iyileştirilmesi gereken sorunları da bünyesinde barındırmaktadır. Bu sorunlardan biri ise düşük hızlarda kanat yüzeyinde tutunmanın daha az olmasıdır. Bunu artırmak amacıyla kanat yüzeyinde çukur kullanılmıştır. Üzerine çalışma yapılacak projenin amacı, düşük hızlarda seyreden uçakların kanatlarında çukur etkisini kullanarak aerodinamik verimliliği artırmaktır.

Çukur sayesinde akış ayrılmasını en aza indirerek kaldırma kuvvetini artırıp sürüklenme kuvvetini azaltmak hedeflenmektedir. Çukurun bu avantajını kanat yüzeyinde kullanarak belirlenen NACA 4421 pozitif kamburluklu profilini şu anki tasarımına göre aerodinamik açıdan daha elverişli hale getirmektir. Aerodinamikte uçağın sürüklenmesinin ana kaynağı kanatlardır. Kanatlarda oluşan bu sürüklemeyi çukur etkisiyle en aza indirerek yakıt tasarrufu sağlamak ve kalkış mesafesini azaltmak hedeflerimiz arasındadır.

Mustak ve ark., kanat profili yüzeyine yakın hava akışında çukur etkisinin türbülans yarattığını kanıtlamışlardır. Bu türbülans, havanın akıştan ayrılmasını önlemiş ve hava akışının kanat yüzeyinde daha uzun süre bağlı kalmasını sağlamıştır. Dolayısıyla kanat profilinin üst yüzeyindeki basıncın azalması nedeniyle kaldırma kuvveti artar ve basınç direnci azalır [1].

Saraf ve ark., NACA0012 kanat profilinde çukurların konumun aerodinamik verime etkisini incelemiştir. Bu çalışmada biri pürüzsüz ve geri kalanların her biri sırasıyla giriş uzunluğunun %10, %25, %50 ve %75'inde çukurlara sahip kanat profillerini karşılaştırılmıştır. Girişin %10'undaki çukurun, pürüzsüz kanat profiline göre en kötü sonucu gösterdiği görülmüştür. Veterin %75'indeki çukurlu kanat profilinde kaldırma katsayısı artmış ve sürüklenme katsayısı azalmıştır. Veter uzunluğunun %25'indeki ve %50'sindeki çukurların da iyi performans göstermediği gözlemlenmiştir. Yapılan bu araştırmada çukur konumunu girişin %75'ine yerleştirmenin daha avantajlı olduğu anlaşılmıştır [2]. Çukurun veterdeki yerleşimine göre farklı hücum açılarında kaldırma ve sürüklenme katsayılarının değişimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. a) Kaldırma, b) Sürüklenme katsayılarının karşılaştırılması [2].



Srivaastav, NACA 0018 kanat modelinin aerodinamik karakteristiğini içbükey ve dışbükey çukur kullanarak, 2 boyutlu olarak sayısal çalışmalar gerçekleştirmiştir. Sayısal analizler incelendiğinde, kanat yüzeyine yerleştirilen çukur yapısının yüzeylerde daha çok türbülans oluşturup sınır tabakası ayrılmasını geciktirdiği ve böylece girdap oluşumunu azalttığı tespit edilmiştir [3].

Rubel ve ark., NACA 0015 kanat modelini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Düşük hızlı rüzgâr tüneline deneysel çalışmalar, ANSYS FLUENT ile sayısal analiz gerçekleştirmişlerdir. Farklı hızlarda 0 ile 20° hücum açılarında 5°'lik aralıklarla gerçekleştirilen analizler doğrultusunda Reynolds sayısı arttıkça  $C_L$  değerinin arttığı,  $C_D$  değerinin ise azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Araştırma sonucunda çukurun kanat yüzeyinde aerodinamik verimliliğe pozitif etkisi olduğu görülmüştür [4].

Şahin ve Acır, düşük Reynolds sayılarında 0 ile 20° arasında, 2° hücum açısı aralıklarında NACA 0015 kanat profilinin sayısal ve deneysel olarak aerodinamik performanslarını incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, rüzgâr tüneline yapılmış çalışmalardan elde edilmiş, ANSYS FLUENT kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Kanadın hücum açısı arttıkça, kaldırma ve sürüklenme katsayılarının arttığı ve irtifa kaybının gerçekleştiği 16° hücum açısından sonra ise kaldırma katsayısının dikkate değer şekilde azalış gösterdiği gözlemlenmiştir. Kanat profilinde en yüksek aerodinamik performans 8° hücum açısında tespit edilmiştir [5].

Soh ve Al-Obaidi, NACA 0012 kanat profilinde farklı çukur şekillerinin ANSYS FLUENT üzerinden aerodinamik verimliliğe olan etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada çukur şekilleri 5 ve 10 derecelik hücum açılarında incelenmiş olup 5 derecelik hücum açısında çukur etkisinin aerodinamik açıdan daha avantajlı olduğu gözlemlenmiştir. İncelenen şekiller arasında elips, kare üçgen, yuvarlak çukurlardan elips çukurun aerodinamik verimlilik açısından en önemli gelişmeye sahip olduğu görülmüştür [6].

Mustak ve ark., NACA4415 kanat profilinde dışa ve içe çukurlu modellerde akış ayrılmasını incelemişlerdir. Bu deneysel incelemede pürüzsüz, dışa ve içe çukurlu üç adet ahşap kanat profili modellemesi yapmışlardır. Hücum açısı 0°'den 12°'ye çıktıkça pürüzsüz yüzey modelinde akış ayrımı meydana gelmiştir. Hücum açısı 12°'den 14°'ye arttıkça üst yüzeyde net bir akış ayrımı ortaya çıkmıştır. Çukurlu yüzey durumunda 16°

hücum açısında akış üst yüzeyden ayrılır. Akış ayrılması normal yüzeyde  $12^\circ$  hücum açısında meydana gelirken çukurlu yüzeylerde bu durum  $16^\circ$  hücum açısında meydana gelerek akış ayrımını geciktirdiği görülmüştür. Bu, çukurlara sahip yüzeyin akış ayrımını başarıyla kontrol ettiğini ve kanat profilinin kaldırma kuvvetini artırdığını göstermiştir [1].

Sowmyashree ve ark., yarım daire şeklindeki çukurun NACA 2412 kanat profilinin özellikleri üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Yaptığı çalışmada çukur alt yüzeye yerleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, modifiye edilmiş kanat profilinin, özellikle de içe doğru çukurlu kanat profilinin, düz kanat profiline göre daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmışlardır [7].

Tanürün ve ark., 2 boyutlu NACA 4412 kanat modeli üzerinde düz ve çukur yapıyı ANSYS FLUENT üzerinden incelemişlerdir.  $0$  ile  $20^\circ$  hücum açısı aralığında düz kanat,  $20^\circ$  ve daha büyük hücum açılarında ise çukur yapısına sahip kanat modelinin daha yüksek aerodinamik performans gösterdiği tespit etmişlerdir.  $0$  ile  $22,5^\circ$  hücum açısı aralığında, düz ve çukur yapıya sahip kanat modelleri için sürüklenme katsayıları arasında dikkate değer bir fark gözlemlenmemiştir. Kanat üst yüzeyine eklenen çukur yapısının, stall açısından daha büyük hücum açısı değerlerinde sürüklenme katsayısını azaltma eğiliminde olduğu görülmektedir [8].

Singh ve ark., çeşitli çukur geometrileri ve boyutlarına sahip bir NACA 0011 kanat profilini kullanarak deneysel bir çukur çalışması gerçekleştirmişlerdir. Test ettikleri üç modifikasyon şunlardı: (1) 8 mm, 10 mm ve 12 mm'lik dışa doğru altıgen çukurlar; (2) 25 x 22 x 10 mm (küçük), 25 x 14,5 x 7 mm (orta) ve 25 x 11 x 5 mm (büyük) boyutlarında yarı silindirik çukurlar; ve (3) 305 x 22 x 10 mm, 305 x 14,5 x 7 mm ve 305 x 11 x 5 mm boyutlarında sürekli şeritler. %66 kiriş uzunluğuna yerleştirilen orta büyüklükteki yarı silindirik dışa doğru çukurun en iyi performansı gösterdiği sonucuna varmışlardır [9].

Tej ve ark., çeşitli 3 boyutlu NACA kanat profilleri, özellikle 0012, 1412, 2412, 3412 ve 4412 kanat profilleri üzerindeki çukur etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. %70 kiriş uzunluğuna yerleştirilen gözyaşı damlası şeklindeki içe doğru çukurun, daha yoğun kavisli bir kanat profili üzerinde daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır; ancak çalışma yalnızca  $0$  derecelik hücum açısında tamamlanmıştır [10].

Saraf ve ark., çalışmalarında kaldırma ve sürüklenme katsayılarını pozitif hücum açısında analiz etmiş ve karşılaştırmışlardır. Kanat profili yüzeyinde farklı yerlerde çukurlar oluşturulmuştur. Çukurların konumu sonuçları etkilemektedir. Bu çalışmada beş kanat profili kullanılmış olup biri pürüzsüz ve geri kalanların her biri kiriş uzunluğunun %10, %25, %50 ve %75'ine yerleştirilmiş çukurlara sahiptir. Düz kanat profiliyle karşılaştırıldığında kiriş uzunluğunun %75'inde çukur bulunan kanat profili için kaldırma katsayısının %7 arttığını, sürüklenme katsayısının da %3 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada, kiriş uzunluğunun %75'indeki çukurun, çukurlar için en iyi yer olduğu fark edilmiştir [2]. Çalışmalarında elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Kaldırma Katsayısının Hücum Açısına Göre Değişimi [2]

A ▼	CI-Pürüzsüz	CI-10%	CI-25%	CI-50%	CI-75%
0	2.84E-05	-1.46E-03	-5.98E-03	1.50E-02	3.50E-02
2	2.13E-01	1.61E-01	2.02E-01	2.28E-01	2.48E-01
4	4.21E-01	4.17E-01	4.05E-01	4.36E-01	4.56E-01
6	6.21E-01	6.19E-01	5.97E-01	6.36E-01	6.56E-01
8	8.12E-01	7.78E-01	7.79E-01	8.27E-01	8.47E-01
10	9.79E-01	9.36E-01	9.44E-01	9.94E-01	1.01E+00
12	1.12E+00	1.04E+00	1.10E+00	1.13E+00	1.17E+00
14	1.20E+00	1.04E+00	1.17E+00	1.21E+00	1.29E+00
16	1.19E+00	9.62E-01	1.11E+00	1.20E+00	1.29E+00

Gopinath ve ark., araştırmalarında, kanat profili aralığı boyunca tekdüze kesite sahip NACA 0018 kanat profilini kullanarak uçak kanadı üzerindeki çukur etkisinin sayısal analizini yapmışlardır. Birkaç çukur şekilli yüzey modifikasyonu ekleyerek kanat profilinin aerodinamik özelliklerini iyileştirme girişiminde bulunmuşlardır. Seçilen çukur formu üçgen şeklindedir. Her iki yüzeye de üst yüzeye 12, alt yüzeye 12 olmak üzere 12 adet çukur numarası koyulmuştur. Çukurlar, sınır katmanının oluşturulmasının ertelenebileceği şekilde uygun bir konuma yerleştirilmiştir. Tipik olarak çukur, girdaplar oluşturarak kararsızlık yaratır ve bu da sınır katmanının oluşumunu yavaşlatır. Uygulamayla birlikte çukur basınç direnci azaltılır ve ses efektleri de en aza indirilir [11].

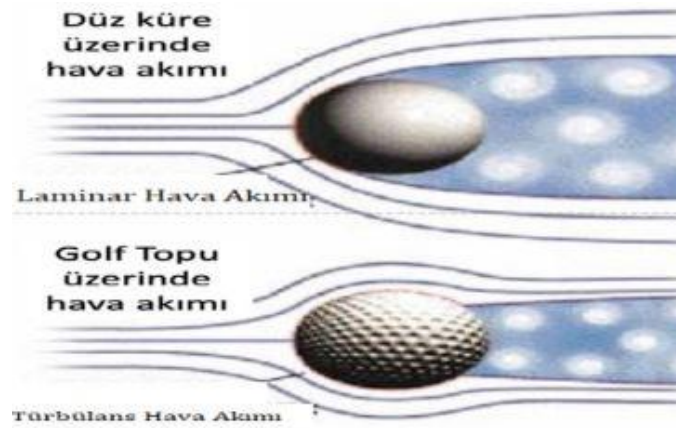
Yapılan araştırmalar sonucunda çoklu çukur kullanımının tek çukura göre aerodinamik açıdan daha verimli olduğu görülmüştür.

J. Stolt ve ark., NACA 0015 kanat profilinde ön kenardan (LE) uzanan dağıtılmış yarım küre şeklindeki çukur konfigürasyonu araştırmışlardır. Kavisli ön kenar yüzeyinin yakınında akış ve yüzey bilgilerini toplamak ve akış ayrımını incelemek için iki ve dört kameralı tomografik parçacık görüntülü hız ölçümü (PIV) ve sıcaklığa duyarlı boya (TSP) teknikleri kullanılmıştır. Bu araştırmada dağıtılmış çukur konfigürasyonu pürüzsüz modelle karşılaştırıldığında benzer bir durmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Ön kenardan (LE) dağılan yarım küre çukurların ani bir ayrılma yaratmasının yerleşim konumu açısından dezavantajlı olduğu anlaşılmıştır [12].

Bu çalışmalarda ele alınanlardan farklı olarak yapılacak araştırmada, veterin %60'ından firar kenarına kadar olan bölüme çoklu çukur konfigürasyonunun uygulanması amaçlanmıştır. Tasarımda çukurların ön kısımdan firar kenarına gidildikçe kademeli olarak azalan şekilde yerleştirilmesi planlanmıştır. Her kademedede bir önceki kademedeki çukurların arasında oluşan boşluk hizasına bir sonraki kademenin çukurları yerleştirilmiştir. Bu sayede boşluklardan ilerleyen havanın kanat yüzeyine tutunmasını sağlayarak olası akış ayrılmalarının önüne geçilmesi ve stall'un geciktirilmesi hedeflenmiştir.

### 1.3. Araştırmanın Önemi

Geçmişten günümüze kadar uçaklarda kanatların aerodinamik verimini artırabilmek için farklı türde yüzey modifikasyonları üzerine birçok çalışma yürütülmektedir. Bu modifikasyonlardan birisi ise golf topundaki çukur modelinin kanat yüzeyine entegre edilmesidir. Çukurlu bir golf topu, akış ayrılmasını geciktirerek ve türbülanslı bir sınır tabakası oluşturarak aynı kuvvete maruz kaldığında pürüzsüz yüzeyli bir topa göre havada daha fazla mesafe kateder. Bunun temel nedeni çukur etkisinin sürüklenme kuvvetini azaltmasıdır. Pürüzsüz ve çukurlu golf topundaki türbülans alanının gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.



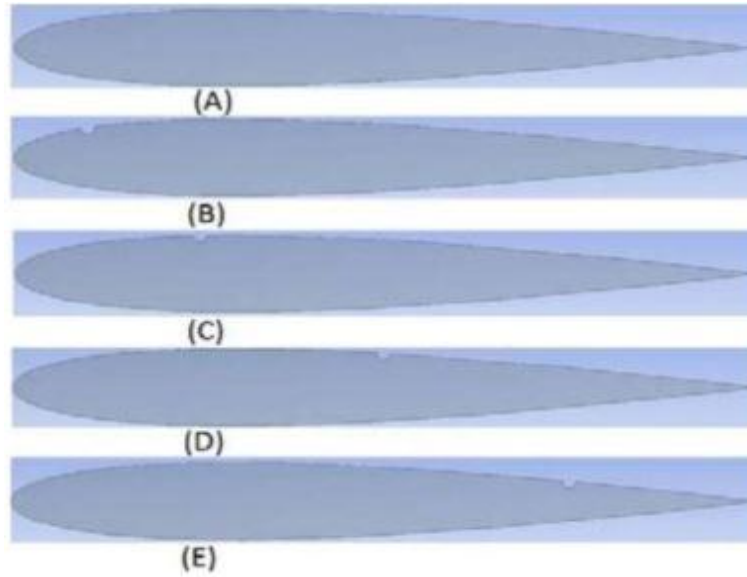
Şekil 2. Golf Topunda Akış Ayrılması [8]

Hücum açısının belirli bir noktaya kadar artmasıyla hem sürüklenme hem de kaldırma kuvveti katsayıları artar. Dolayısıyla yüksek L/D oranına ulaşmak güçtür. Kanat profilinin geometrik yüzey modifikasyonu bu sorunu çözmenin etkili bir yöntemidir. Bu modifikasyonlardan birisi de kanattaki çukur etkisidir. Kanatlarda kullanılan çukur yapısı Şekil 3’te verilmiştir.

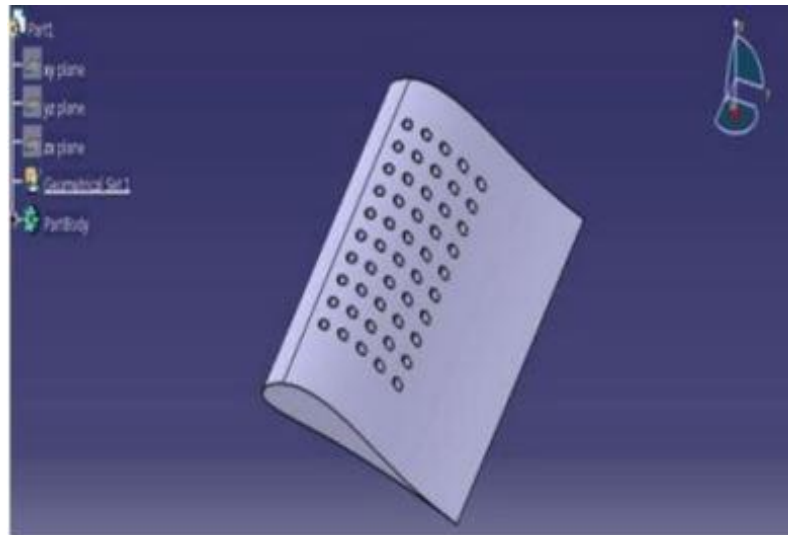


Şekil 3. Çukur Yapısı [8]

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda çukurların üç boyutlu uygulamalarında tek sıra halinde iki boyutlu uygulamalarında ise hücum kenarı ve firar kenarı arasında farklı konumlara yerleştirildiği görülmüştür. İki boyutlu ve üç boyutlu uygulamalara örnek Şekil 4 ve Şekil 5’te verilmiştir.



**Şekil 4.** (A)Düzgün Kanat Profili, (B) Veterin %10'unda Çukurlu, (C) Veterin %25'inde Çukurlu, (D) Veterin %50'sinde Çukurlu, (E) Veterin %75'inde Çukurlu [2]



**Şekil 5.** İçe Doğru Yerleştirilmiş Dizilim [13]

Araştırmamıza özgünlük sağlayan ve diğer araştırmalardan farklı kılan yönler çukur konumlandırması ve kanat profilindeki farklılıktır. Literatürde de görüldüğü üzere araştırmalarda genel olarak simetrik kanat profili kullanılmıştır. Çukur etkisinin düşük hızlarda daha fazla taşıma oluşturmaları ve aerodinamik verimliliğe olan pozitif etkisi sebebiyle bu çalışmada düşük hızlarda kullanılan pozitif kamburluklu NACA 4421 kanat profili seçilmiştir. Seçilen kanat profili ve üzerinde çukur uygulamasının gösterimi Şekil 6'da verilmiştir.

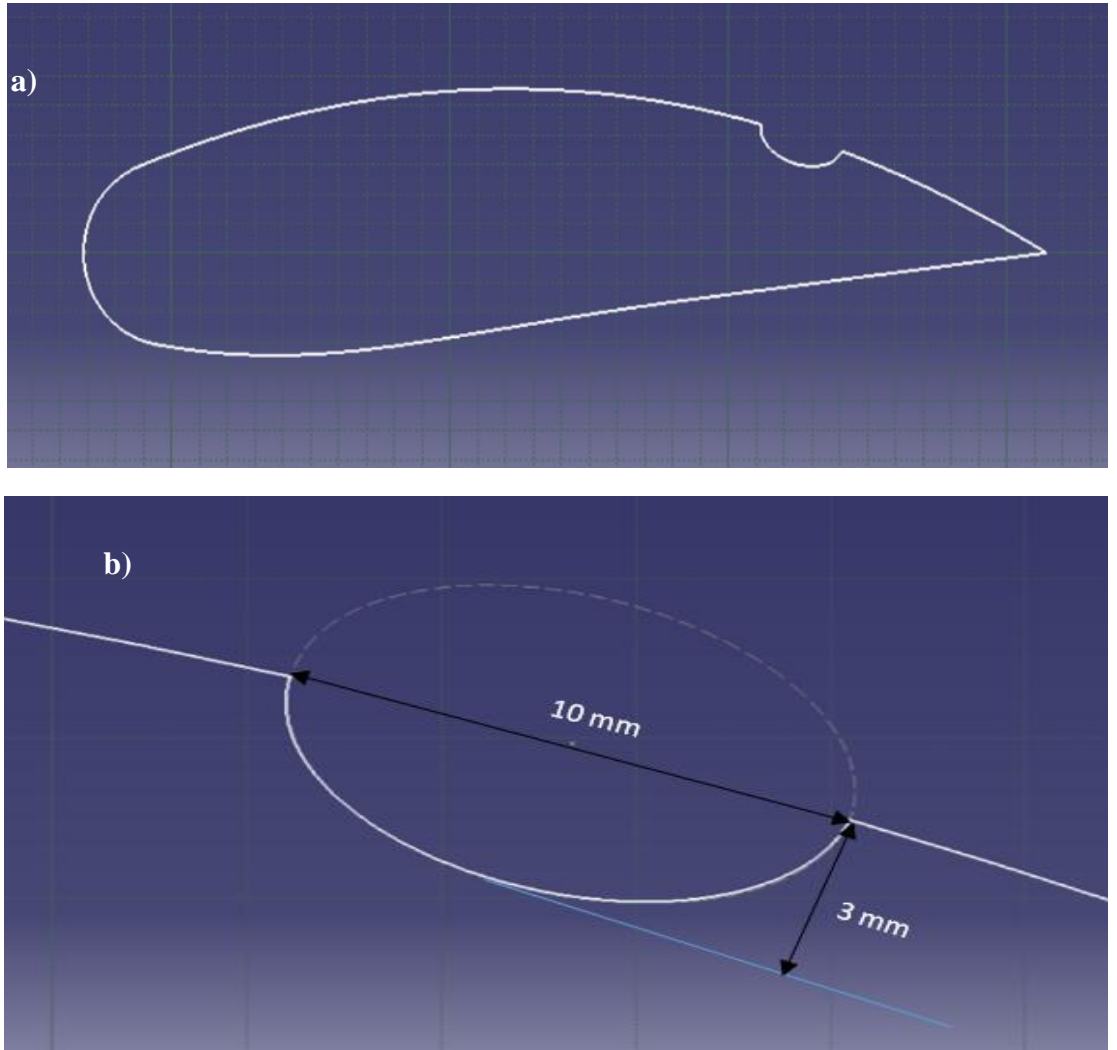


**Şekil 6.** NACA 4421 kanat profili ve üzerinde çukur uygulamasının gösterimi

Literatürde görüldüğü üzere çukurlar tekli ya da çoklu olacak şekilde yerleştirilmiştir. Çoklu kullanımda tek şeritli yapılar incelemeye alınmıştır. Bunlardan farklı olarak araştırmadaki çukur konumlandırması ise akış ayrılmasının gerçekleştiği bölgede yoğun şekilde başlayıp fırr kenarına doğru ardışık şekilde azalan bir konfigürasyon modelidir. Bu konumlandırmadaki asıl amaç hem çukurlardan çıkan türbülanslı havayı hem de çukurlar arası mesafede hızlanan hava akımını tekrar bir çukur etkisine maruz bırakarak fırr kenarına doğru yönlendirip akışın yüzeyde daha fazla tutunmasını sağlamaktır.

## 2. YÖNTEM VE MATERYAL

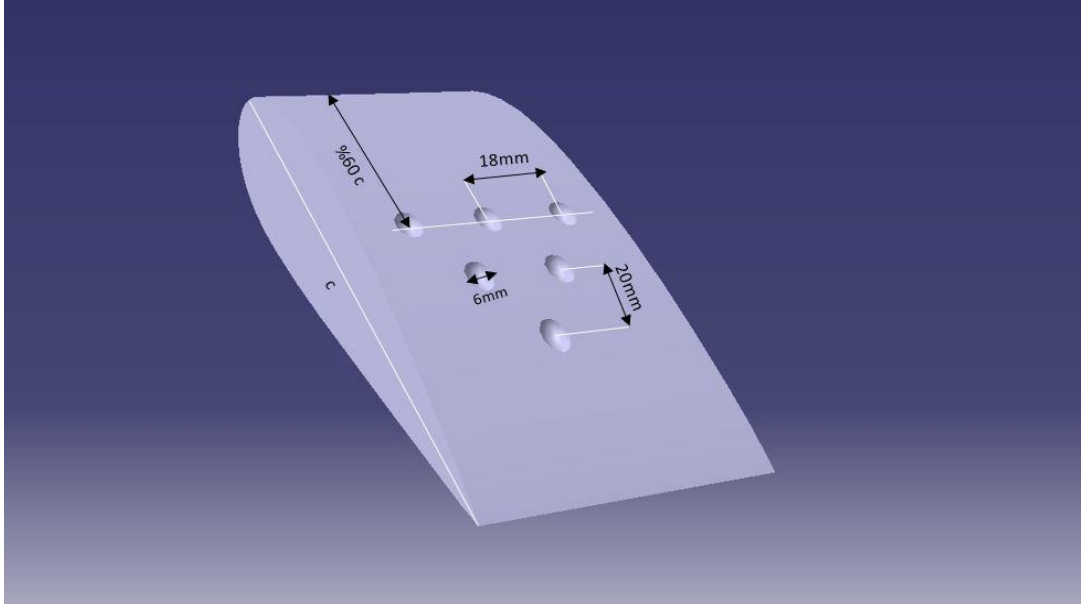
Yapılan araştırmalar sonucunda kanat için içbükey çukurun dışbükey çukura göre daha elverişli olması nedeniyle çalışmada içbükey çukur yapısı tercih edilmiştir. Analizi yapılan çukur şekillerinden aerodinamik açıdan en verimli olan şeklin eliptik çukur olması nedeniyle bu çalışmada eliptik çukur yapısı seçilmiştir. Yapılacak çalışmada düşük hızlarda kullanılan pozitif kamburluklu NACA 4421 kanat profili yüzeyine uygulanacak eliptik çukurun boyutları ise kısa yarıçapı 3 mm, uzun yarıçapı 5 mm ve çukur derinliği 3 mm olarak belirlenmiştir. Seçilen geometri boyutlandırması doğrultusunda CATIA uygulamasında 3 boyutlu modellenmesi yapılmıştır. NACA 4421 üzerinde eliptik çukur gösterimi ve boyutlandırılması Şekil 7’de sunulmuştur.



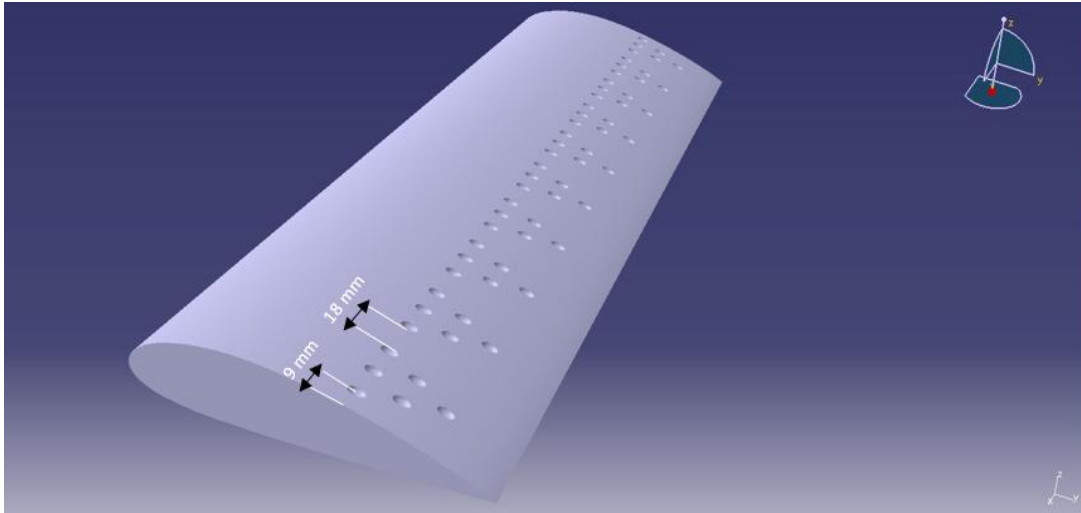
**Şekil 7. a) NACA 4421 Üzerinde eliptik çukur gösterimi ve b) boyutlandırılması**



Boyutları verilen eliptik çukurun konumlandırılması ise veter uzunluğunun %60'ından başlayarak firar kenarına doğru ardışık olarak azalan bir konfigürasyonda olması belirlenmiştir. Çukurların yatay sıra boyunca merkezleri arasındaki mesafe 18 mm, düşey sıra boyunca merkezleri arasındaki mesafe ise 20 mm olarak tasarlanmıştır. NACA 4421 kanat yüzeyinde çukurların konumlandırılması Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir.



**Şekil 8.**Çukur Konfigürasyonunun Gösterimi



**Şekil 9.**Çukur Konfigürasyonunun Kanat Boyunca Gösterimi

Kanat için seçilen malzeme bir alüminyum alaşımı olan 7075 T651 alaşımıdır. Malzeme için karakteristik özellikler şu şekildedir:

- Mukavemet: Mükemmel
- İşlenebilirlik: Çok iyi
- Kaynak Edilebilirlik: Zayıf
- Şekil Alma: Normal
- Korozyon Direnci: Kötü
- Isıl İşlem: Evet

Malzemenin mekanik özellikleri ise Şekil 10' da gösterilmiştir.

Mekanik Özellikler			
Kalınlık (mm)	Akma Dayanımı (Min.)	Çekme Dayanımı (Min.)	Uzama %
0.203 mm - 0.279 arası	425 MPa	502 MPa	6
0.305 mm - 0.991 arası	455 MPa	515 MPa	7
1.02 mm - 3.17 arası	460 MPa	530 MPa	8
3.20 mm - 6.32 arası	468 MPa	528 MPa	8
6.35 mm - 12.7 arası	455 MPa	530 MPa	9
12.7 mm - 25.4 arası	461MPa	535 MPa	7
25.43 mm - 50.8 arası	454 MPa	521 MPa	6
50.83 mm - 63.5 arası	434 MPa	515 MPa	5
63.53 mm - 76.2 arası	414 MPa	495 MPa	5
76.23 mm - 88.9 arası	390 MPa	480 MPa	4
88.93 mm - 102 arası	365 MPa	454 MPa	4

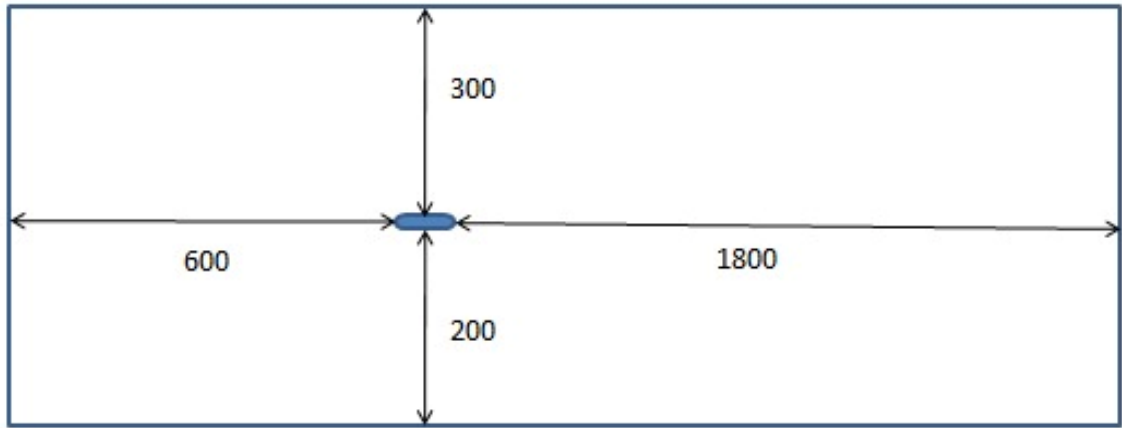
**Şekil 10.** 7075 T651 Alüminyum Alaşımı Mekanik Özellikleri [14]

Kanat profilinin geometrisi CATIA' da modellendikten sonra ANSYS FLUENT programına aktarılarak akış analizleri yapılmıştır. Yapılan bu akış analizleri 0°, 4°, 8° , 10° , 12° , 16° hücum açılarında ve 30 m/s giriş hızında gerçekleştirilmiştir.

ANSYS FLUENT programında analiz yapılırken deniz seviyesi koşullarında hesaplanan Reynolds sayısı  $5,2732 \times 10^6$  olarak bulunmuştur. Reynolds sayısına bakılarak akışın türbülanslı olduğu görülmektedir. Bundan ötürü en yaygın modellerden biri olan ve basit türbülanslı akışlar için kullanılan K-Epsilon modeli ANSYS FLUENT programında akış

analizinde tercih edilmiştir. Analizlerde deniz seviyesi koşulları kullanılarak çözümleme yapılmıştır.

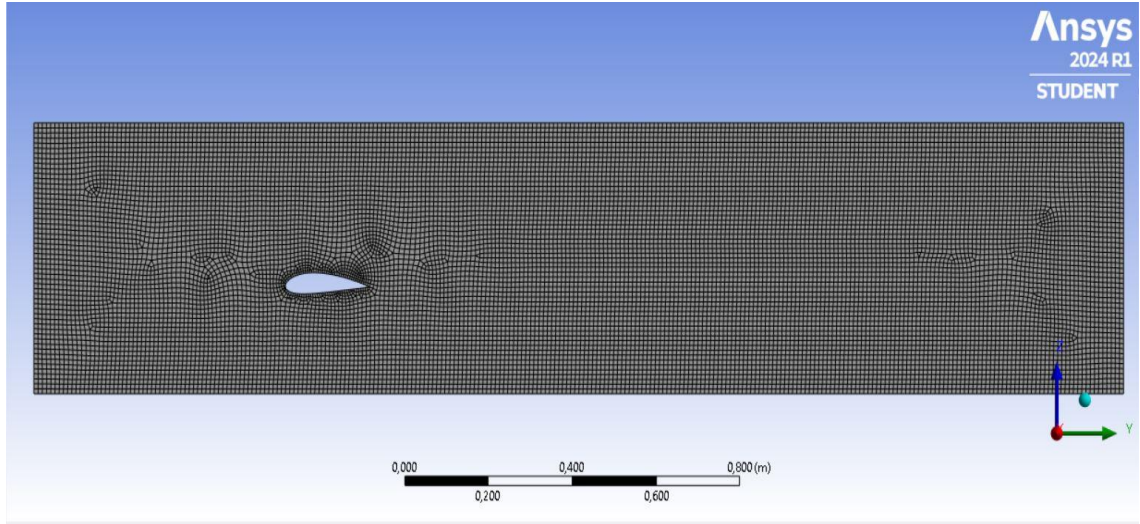
Analizlerin düzgün yapılabilmesi için kanadın tamamını kapsayacak şekilde kutu(box) tipi akış alanı kullanılmıştır. Bu akış tipini seçmemizdeki amaçlar; basit ve düzenli yapıları sayesinde hesaplama ağı(mesh) oluşturma ve çözme süreçlerinde daha verimli olması, büyük bir analiz alanı sunarak akışkanın sınırdan etkilenmeden doğal bir şekilde hareket etmesine olanak sağlaması böylelikle sınır etkilerini en aza indirmesidir. Akış alanının gereğinden büyük olması analizlerin daha uzun sürede çözülmesi anlamına gelmektedir. Optimal bir çözüm aralığının elde edilmesi için en düşük zaman diliminde en doğru çözümlerin yapılması gerekmektedir. Bu şartlar göz önünde bulundurularak optimum değerler Şekil 11’de verilmiştir.



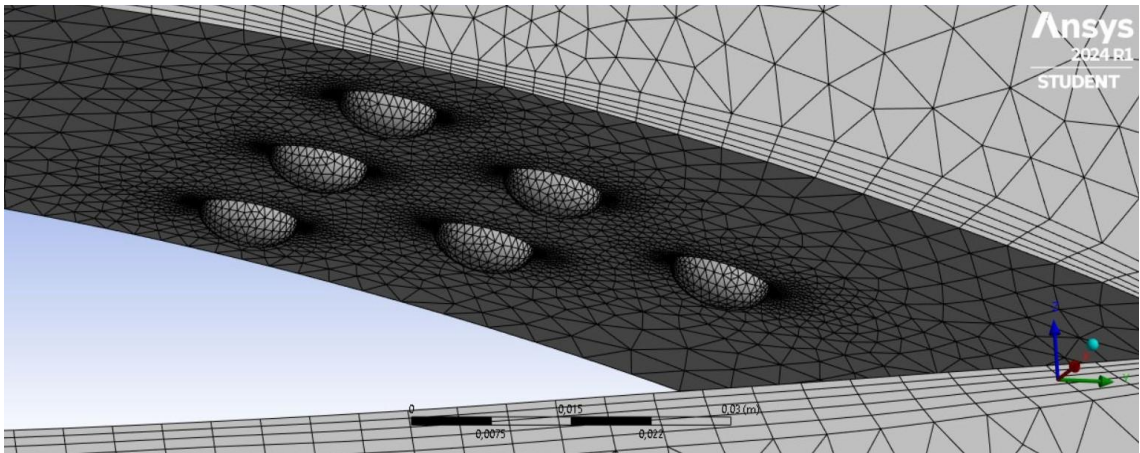
**Şekil 11.**Kutu Tipi Akış Alanı(Box Domain)

Tasarlanan geometriler ANSYS FLUENT’e aktarılarak sınır şartları belirlenmiştir. Analiz sonuçlarının doğruluğunu etkileyen en önemli faktörlerden biri ağ yapısıdır. Ağ yapısı, geometrinin hesaplama alanını küçük ve sonlu elemanlara bölerek diferansiyel denklemlerin sayısal çözümlemesine yardımcı olur. Ağ yapısı kalitesi küçük detayların doğru şekilde yakalanmasına olanak tanır. Bu yüzden ağ kalitesi analizde dikkat edilen önemli hususlardan biridir. Çukurlu kanat profilinde akış çözümlemesinin daha hassas yapılabilmesi için kanat etrafında ‘inflation’ özelliğinden yararlanılmıştır. Inflation yöntemi, akışkanın sınır tabakası bölgesinde yüksek çözünürlüklü ağ katmanları oluşturur. Bu da sınır tabakası etkilerinin daha hassas şekilde modellenmesine ve hesaplanmasına olanak sağlar.

Şekil 12.a'da düz kanadın ağ yapısı ve Şekil 12.b'de çukurlu yapının ağ yapısı gösterilmiştir.



**Şekil 12.a. Düz Kanat Ağ Yapısı**



**Şekil 12.b. Çukurlu Yapının Ağ Yapısı**

Analizlerde kullanılan ağ yapısının şekli düz kanatta Hexahedral, çukurlu kanatta Tetrahedral olarak belirlenmiştir. Hexahedral ağ yapısı daha az elemanlı yüksek doğruluk gerektiren basit geometrilerde kullanıldığı için düz kanat profilinde tercih edilmiştir. Tetrahedral ağ yapısı karmaşık ve düzensiz geometrilerin kolayca meshlenmesine yardımcı olduğundan çukurlu kanat profili için kullanılmıştır.

Ağ yapısı belirlendikten sonra kalite değerleri kontrol edilmiştir. Ağ yapısının kalitesini etkileyen faktörler; Ortogonal kalite (Orthogonal quality), çarpıklık (skewness) ve eleman kalitesidir. Skewness, 0 ile 1 arasında değerlere sahiptir. Burada 0 en iyi, 1 en kötü değeri temsil eder. Ortogonal ve eleman kalitesi değerleri de 0 ile 1 arasında değişmektedir. Ancak burada Skewness aksine 0 en kötü, 1 en iyi değerdir. Tablo 2’de ağ yapısının elde edilen ortalama değerleri verilmiştir. Değerlere bakılarak ağ yapısının kalitesinin uygun olduğu görülmüştür.

**Tablo 2.** NACA 4421 Ağ Yapısı Kalite Değerleri

Kalite Faktörleri	Değerler (Ortalama)	
	Düz Kanat	Çukur Kanat
Skewness	0,037	0,222
Ortogonal Kalitesi	0,996	0,776
Eleman Kalitesi	0,90801	0,81048

İncelemesi yapılan  $C_L$  taşıma katsayısı ve  $C_D$  sürüklenme katsayısı denklemleri:

$$\bullet \quad C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * S}$$

$$\bullet \quad C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * S}$$

Denklemlerdeki L taşıma kuvvetini, D sürüklenme kuvvetini,  $\rho$  havanın yoğunluğunu,  $V$  havanın hızını, S kanat alanını ifade etmektedir.

Türbülans modeli olarak K-Epsilon modeli kullanılmıştır. Türbülanslı kinetik enerji için taşıma denklemi:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon + S_k$$

$P_k$ = Ortalama hız kaymasından kaynaklı türbülans kinetik enerji üretimi (TKE)

$P_b$ =Kaldırma kuvveti nedeniyle TKE üretimi

$S_k$ =Kullanıcı tanımlı kaynak

$\sigma_k$ =Türbülanslı Prandtl sayısı (k)

Türbülanslı dağılım hızı için taşıma denklemi:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_3 P_b) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$$

$C_1, C_2, C_3, C_\mu$  içinde değişen model katsayılarıdır k- $\epsilon$  türbülans modelleri

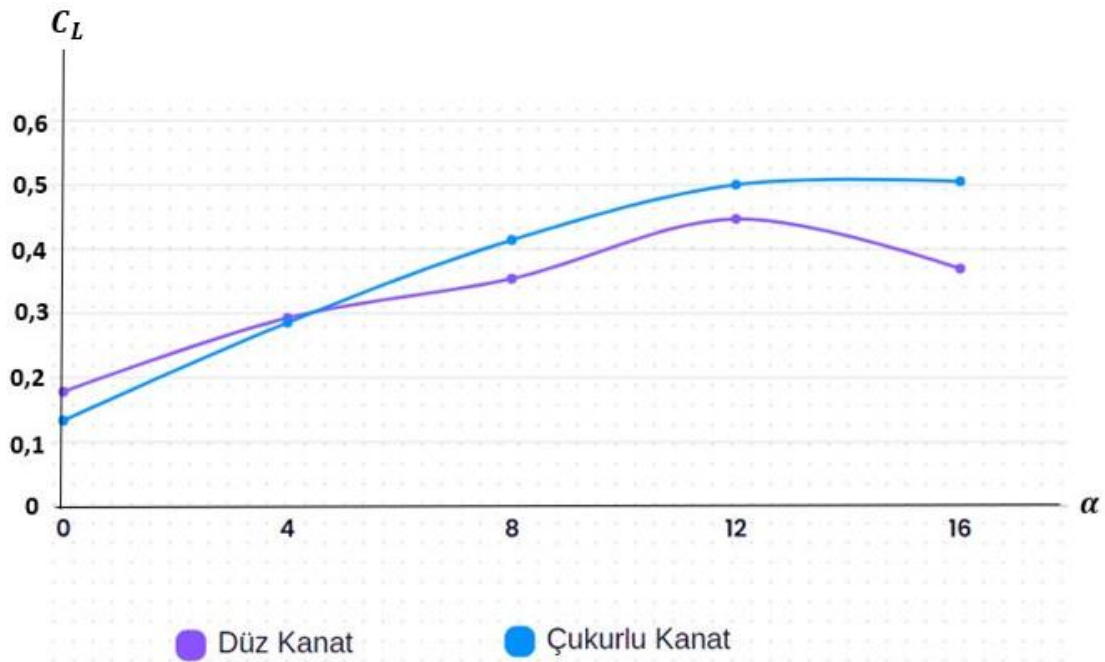
$S_\epsilon$ = Kullanıcı tanımlı kaynak

$\sigma_\epsilon$ = Türbülanslı Prandtl sayısı

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

NACA 4421 kanat modeli, düz ve çukur yapıya sahipken 3 boyutlu olarak incelenmiştir.  $C_L$  ve  $C_D$  değerleri; kanat açıklık oranı 6 ve akışkan hızı 30 m/s iken, 0 ile 16° arasında, 4°'lik hücum açısı aralıklarında elde edilmiştir.

Farklı hücum açılarında düz ve çukur kanatta değişen  $C_L$  değerleri Şekil 13'te verilmiştir.

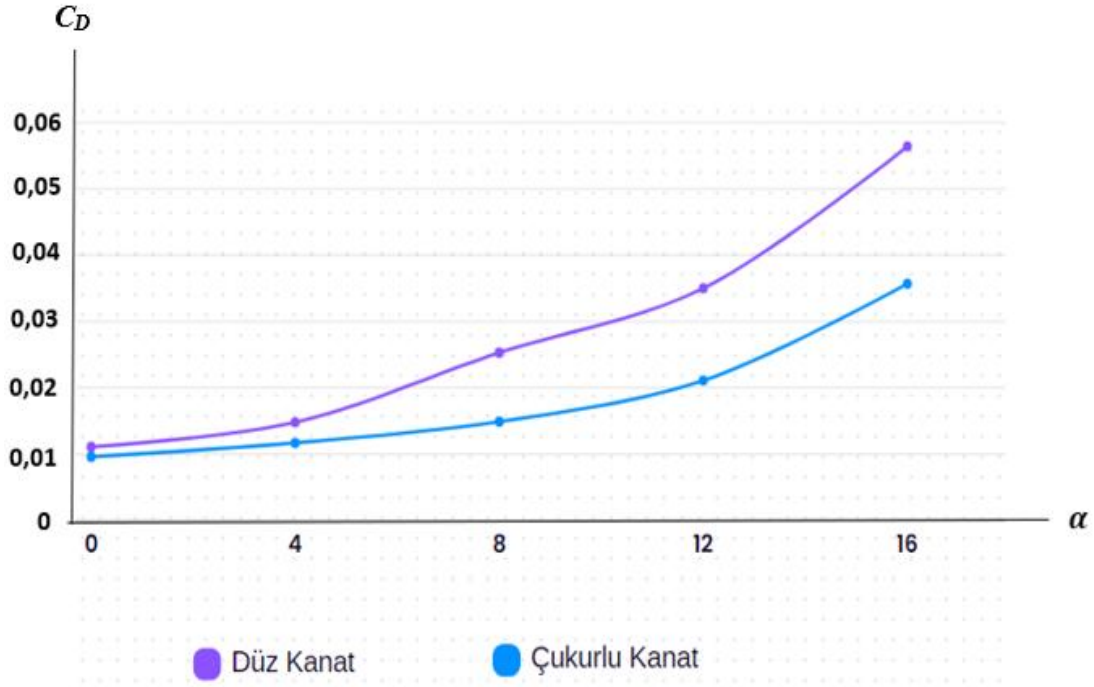


**Şekil 13.** Düz ve çukurlu kanatta  $C_L$ -  $\alpha$  grafiği

Şekil 13'te düz kanat için maksimum  $C_L$  değeri 12°'de gözlemlenmiş olup bu değerden itibaren  $C_L$  değerinin azalmaya başladığı görülmüştür. Yüksek hücum açlarına geçildiğinden dolayı 12° sonrasında stall gözlemlenir. Çukurlu kanat için ise maksimum  $C_L$  değeri 16°'de gözlemlenmiştir.

Veriler göz önüne alındığında 0-16° hücum açısı aralığında 8°'den itibaren çukurlu kanat düz kanada göre daha yüksek aerodinamik performans göstermiştir. Düz kanatta 12°'den sonra  $C_L$  değeri azalırken çukurlu kanatta herhangi bir azalma meydana gelmemiştir. Böylelikle çukurlu yapı sayesinde stall geciktirilmiştir.

Farklı hücum açılarında düz ve çukur kanatta değişen  $C_D$  değerleri Şekil 14'te verilmiştir.

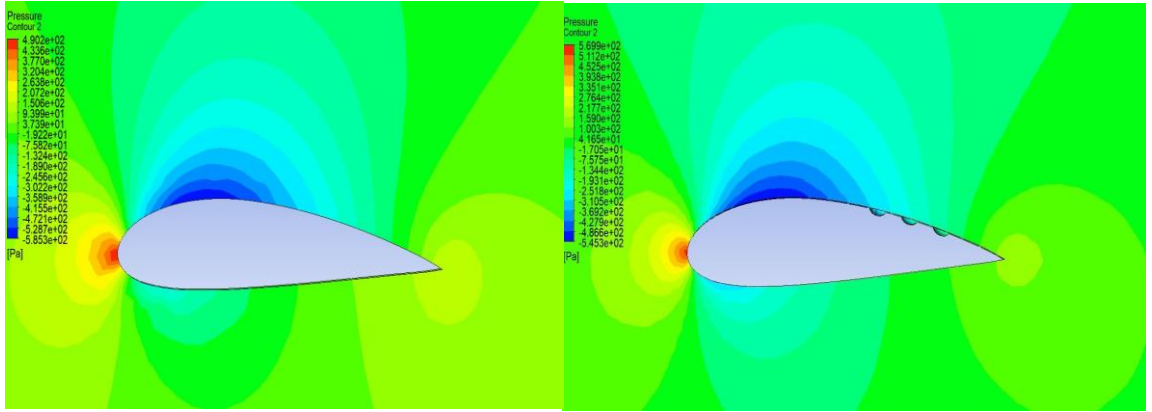


**Şekil 14.** Düz ve çukurlu kanatta  $C_D$ -  $\alpha$  grafiği

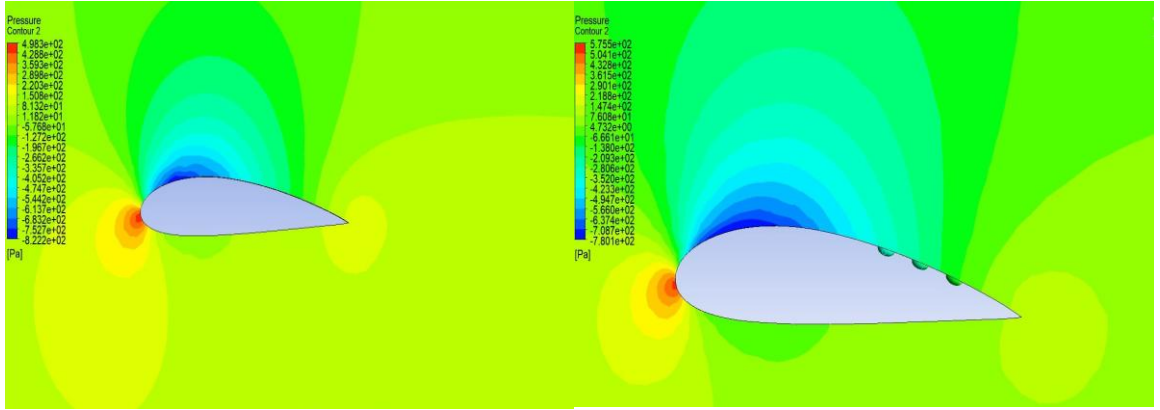
Şekil 14'te karşılaştırılan  $C_D$  değerlerine bakıldığında 0 ile 4° arasında dikkate değer bir fark gözlemlenmemiştir. 4°'den itibaren çukurlu kanattaki  $C_D$  değerlerinin düz kanada göre daha az bir artış gösterdiği görülmüştür. Kanat üzerine eklenen çukurlu yapı,  $C_D$  sürüklenme katsayısını azaltma eğilimindedir.

Yapılan analizlerde kanat etrafındaki akış hareketlerinin belirli bir giriş hızında ve beş farklı hücum açısında basınç dağılımı Şekil 15'te ve akış çizgileri incelemesi Şekil 16'da sunulmuştur.

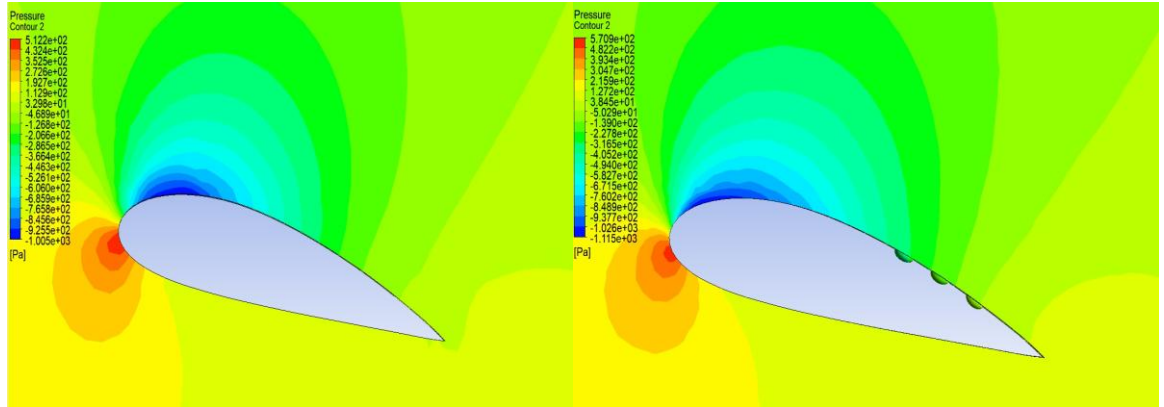




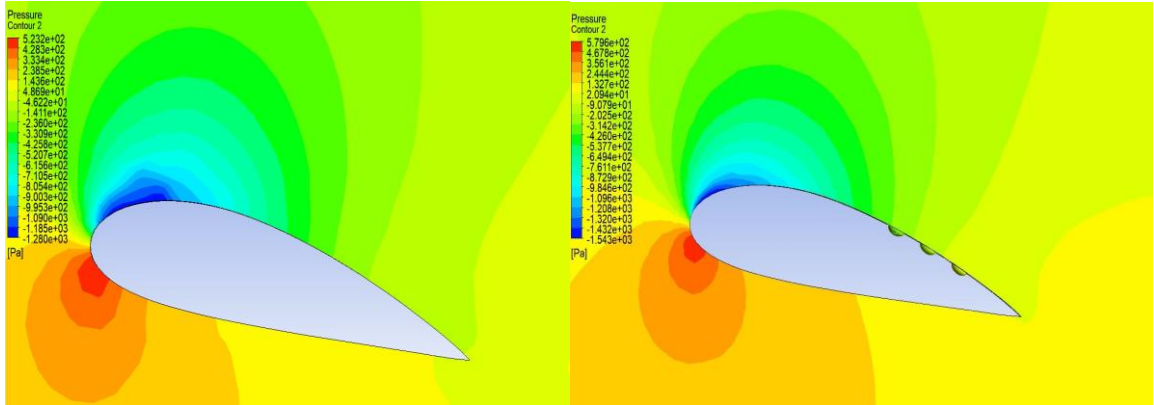
Şekil 15.a. 0° hücum açısında düz ve çukurlu kanat basınç dağılımı



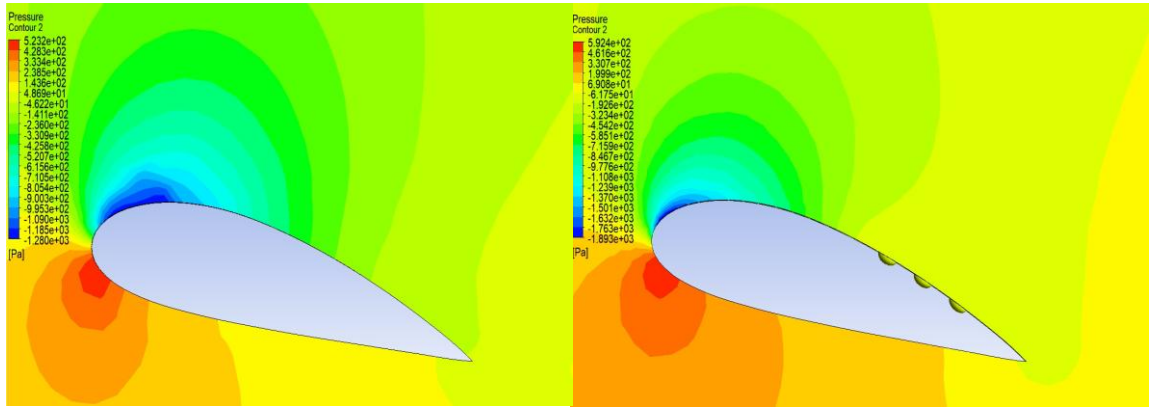
Şekil 15.b. 4° hücum açısında düz ve çukurlu kanat basınç dağılımı



Şekil 15.c. 8° hücum açısında düz ve çukurlu kanat basınç dağılımı

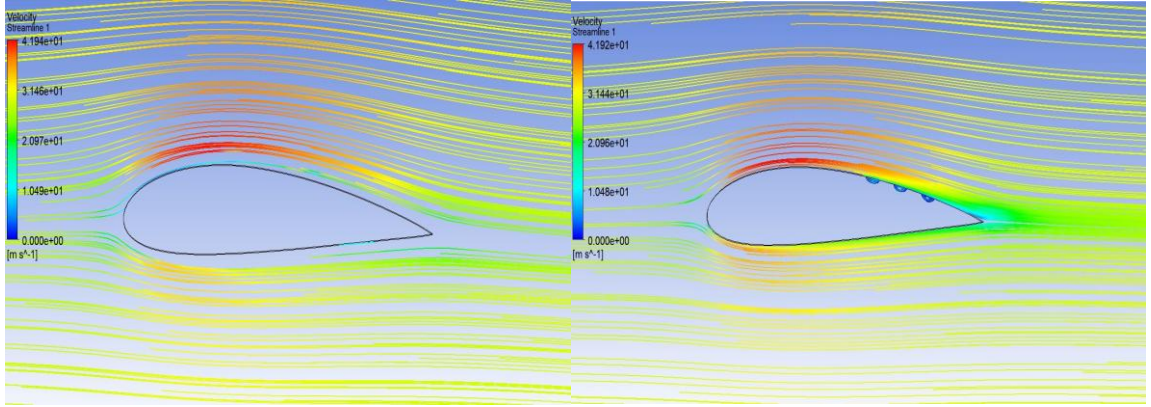


**Şekil 15.d.** 12° hücum açısında düz ve çukurlu kanat basınç dağılımı

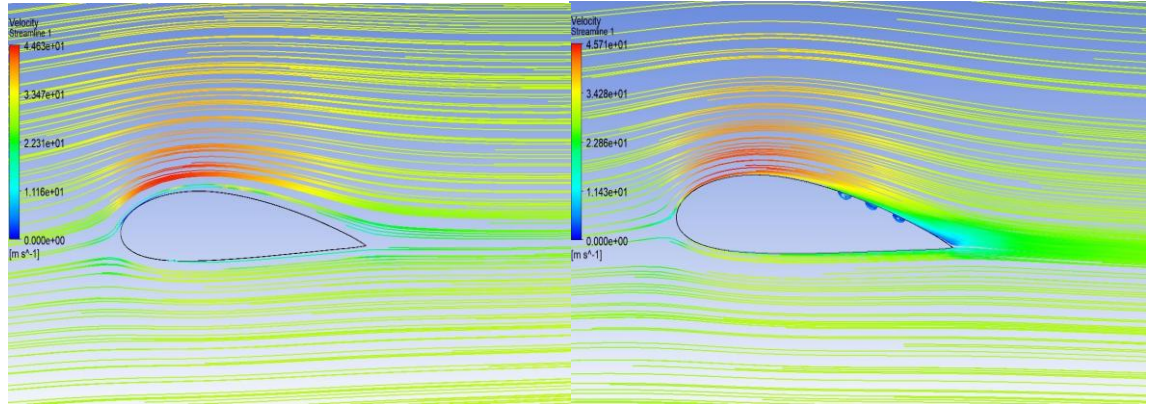


**Şekil 15.e.** 16° hücum açısında düz ve çukurlu kanat basınç dağılımı

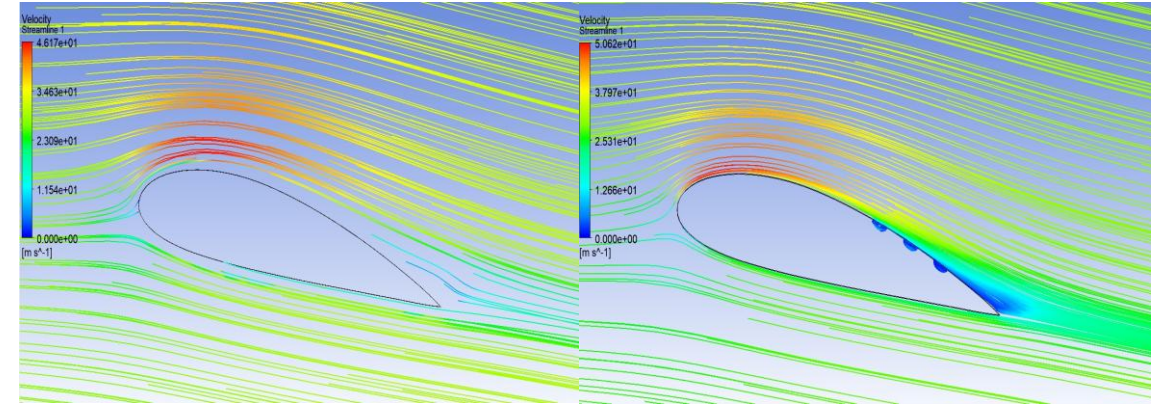
Basınç dağılımları incelendiğinde 0° ile 4° hücum açılarında düz ve çukur kanat modellerinin alt yüzeylerinde oluşan basınç alanları farkı oldukça azdır. Bu hücum açılarında düz kanat taşıma açısından daha iyi basınç dağılımı oluşturmuştur. Ancak 8° hücum açısından itibaren çukurlu kanadın basınç farkı daha belirgin olarak gözlemlenmiştir. 8°, 12° ve 16° hücum açılarında çukurlu kanat ve düz kanadın basınç dağılımları incelendiğinde çukurlu kanadın aerodinamik verimliliği önemli miktarda artırdığı görülmüştür.



**Şekil 16.a.**  $0^\circ$  hücum açısında düz ve çukurlu kanat akış dağılımı

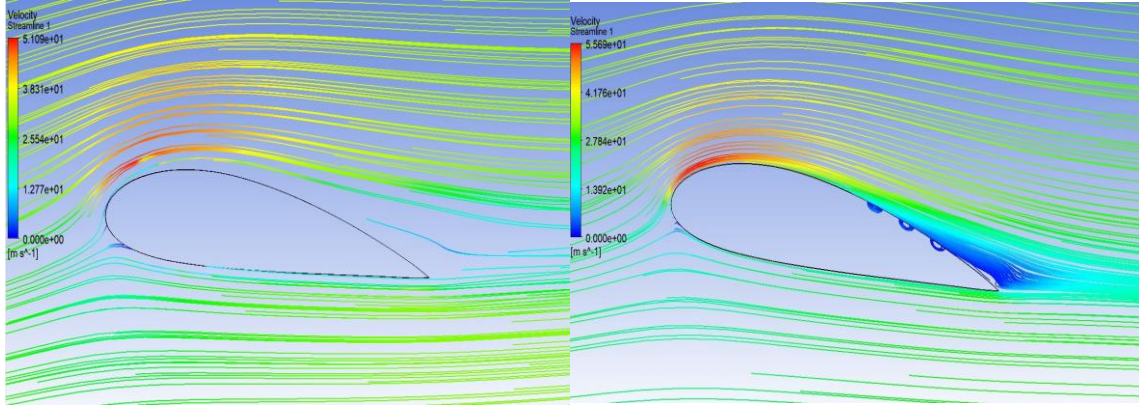


**Şekil 16.b.**  $4^\circ$  hücum açısında düz ve çukurlu kanat akış dağılımı

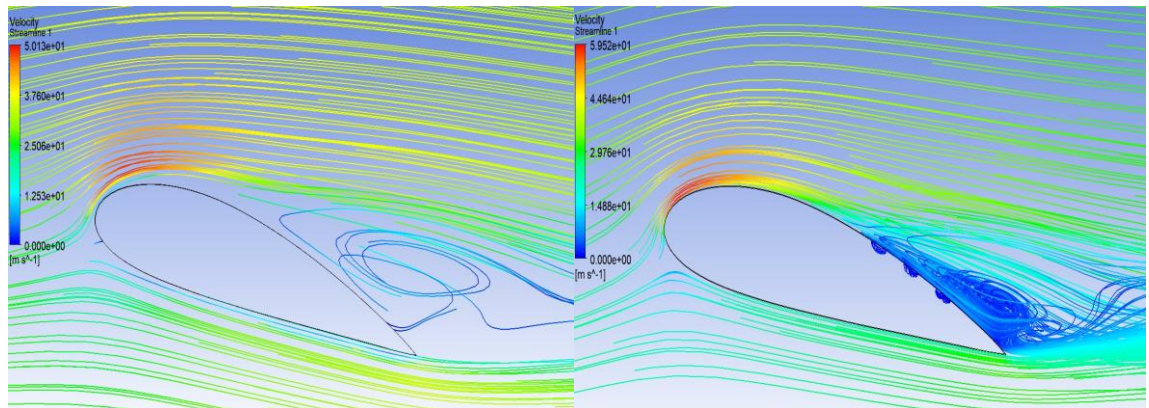


**Şekil 16.c.**  $8^\circ$  hücum açısında düz ve çukurlu kanat akış dağılımı





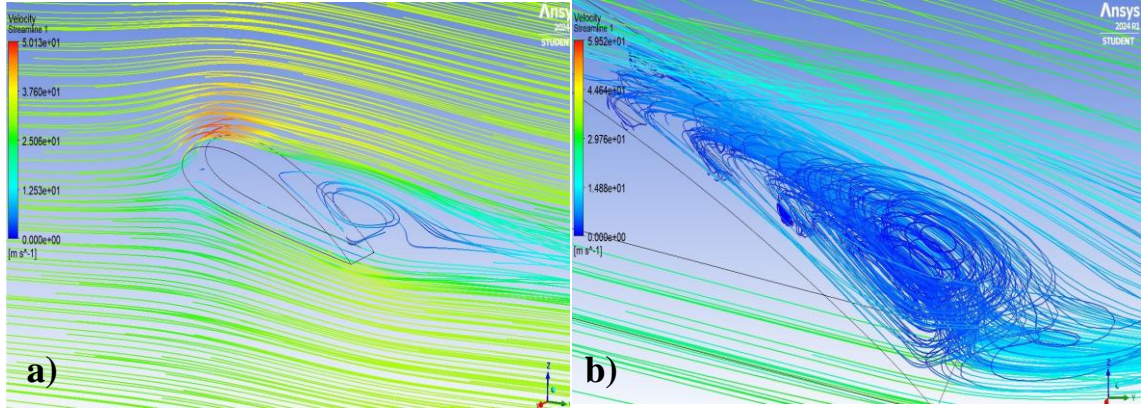
**Şekil 16.d.** 12° hücum açısında düz ve çukurlu kanat akış dağılımı



**Şekil 16.e.** 16° hücum açısında düz ve çukurlu kanat akış dağılımı

Görsellerdeki akış dağılımları incelendiğinde 8° hücum açısından itibaren akışın yüzeye tutunmasının düz kanada göre çukurlu yapıda daha fazla olduğu görülmüştür. Düz kanatta 8° hücum açısından sonra akış ayrılmalarının giderek arttığı ve kanadın olumsuz etkilendiği görülmektedir. Düz kanatta 12° hücum açısında stall meydana gelirken çukurlu kanatta incelenen hücum açılarında stall oluşumu gözlemlenmemiştir. Çukur konfigürasyonu sayesinde bu olumsuzluklar giderilerek düz kanada göre daha avantajlı bir kanat modeli elde edilmiştir.

16° hücum açısında çukurlu kanat modelinin üst yüzeyinin %60'lık bölümünde akış kanada tutunurken düz kanatta bu oran çok daha küçüktür. İki kanat modeli için akış tutunması farkı Şekil 17'de verilmiştir.



**Şekil 17.a.**16° hücum açısı düz kanat akış tutunması **b.**16° çukurlu kanat akış tutunması

Düz ve çukurlu kanatta aynı hız farklı hücum açılarında taşıma ve sürüklenme katsayıları Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Düz ve Çukurlu Kanatta  $C_L$  ve  $C_D$  Değerleri

Kanat	Hız	Açı	$C_L$	$C_D$
Düz	30	0°	0,1780	0,0111
		4°	0,2931	0,0148
		8°	0,3540	0,0253
		12°	0,4470	0,0350
		16°	0,3697	0,0564
Çukurlu	30	0°	0,1332	0,0096
		4°	0,2856	0,0117
		8°	0,4142	0,0149
		12°	0,5004	0,0211
		16°	0,5055	0,0357

## 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 4.1 Sonuçlar

Yapılan çalışmada düz ve çukurlu olmak üzere iki farklı NACA 4421 kanat modeli 30 m/s giriş hızında ve  $0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ, 16^\circ$  hücum açılarında incelenip karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarından elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Düz kanat modelinde stall'un meydana geldiği hücum açısı  $12^\circ$  olarak tespit edilmiştir.
- Kanat yüzeyine eklenen çukurlu konfigürasyonun incelenen beş farklı hücum açısında stall'a uğramadığı görülmüştür.
- $16^\circ$  hücum açısında çukurlu konfigürasyonda düz kanada göre akış tutunmasının maksimum şekilde tespiti yapılmıştır.
- $0^\circ$  hücum açısında çukurlu konfigürasyonla  $C_L$  değeri %25,2 ,  $C_D$  değeri %13,51 azalıyor.
- $4^\circ$  hücum açısında çukurlu konfigürasyonla  $C_L$  değeri %25,6 ,  $C_D$  değeri %20,95 azalıyor.
- $8^\circ$  hücum açısında çukurlu konfigürasyonla  $C_L$  değeri %17,01 artıyorken,  $C_D$  değeri %41,1 azalıyor.
- $12^\circ$  hücum açısında çukurlu konfigürasyonla  $C_L$  değeri %11,95 artıyorken,  $C_D$  değeri %39,7 azalıyor.
- $16^\circ$  hücum açısında çukurlu konfigürasyonla  $C_L$  değeri %36,73 artıyorken,  $C_D$  değeri %36,70 azalıyor.
- Elde edilen sonuçlara bakıldığında  $C_L$  değeri artışı ve  $C_D$  değeri azalışıyla birlikte aerodinamik verimliliğin önemli ölçüde arttığı ve stall'un geciktiği tespit edilmiştir.
- Aerodinamik verimliliğin artması daha az yakıt kullanılması sebebiyle yakıt maliyetinin düşmesine olanak sağlar.

#### 4.2. Öneriler

Gelecekteki çalışmalarda farklı giriş hızlarında ve türbülans modellerinde bu analizler tekrarlanabilir. Ek olarak farklı çukur boyutu ve geometrilerinde incelenerek en iyi çukur yapısının hangisi olduğu da yapılacak olan çalışmalar arasındadır.

Tasarlanan çukur konfigürasyonu yalnızca uçak kanadı yüzeyinde değil enerji santrallerindeki rüzgar türbinlerinin pallerine de uygulanarak enerji verimliliği sağlanabilir. Ayrıca enerji verimliliğiyle birlikte maliyet de önemli ölçüde düşürülebilir.

## KAYNAKÇA

1. 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.
2. Saraf AK., Singh MP., Chouhan TS., (2017). Effect of Dimple on Aerodynamic Behaviour of Airfoil, International Journal of Engineering Technologies.
3. Srivastav D., (2012). Flow Control over Airfoils using Different Shaped Dimples, International Conference on Fluid Dynamics and Thermodynamics Technologies.
4. 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.
5. Şahin İ., 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.
6. Soh ZP., Al-Obaidi ASM., (2016). Numerical Analysis of the Shape of Dimple on the Aerodynamic Efficiency of NACA 0012 Airfoil, Eureka.
7. Sowmyashree, Y., Aishwarya, DIP, Spurthy, S., Sah, R., Pratik, BV, Srikanth, HV ve Suthan, R., 2020, January.
8. Tanürün HE., Salman M., Kaya AF., Acır A., (2019). NACA 4412 Kanat modeli yapısında çukur etkisinin sayısal analizi. 2nd International Conference on Energy Resarch.
9. Singh, D., Gajghat, R. H., Manik, M. K., “Experimental Investigation To Examine The Effect of Shape And Size Of Dimple At Suction Surface Of Aerofoil”, International Journal of Scientific & Technology Research, Vol. 8(12), 2019, pp. 521-534.
10. Tej, G. R., Rajasai, B., and Anurang, S., “Variation of Behaviour of Dimples on Aircraft Wings,” IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, 2016.



11. Gopinath S., Yuvaraj C., Jeyan ML., (2019). CFD Analysis of controlling the airflow over airfoils using dimples, Journal of Emerging Technologies and Innovative Research.
12. Stolt A., Ullah EH., Estevadeordal J., (2019). Study of Leading-Edge Dimple Effects on Airfoil Flow Using Tomographic PIV and Temperature Sensitive Paint, Fluids.
13. Saravanan R., Sharu SK., Sundareswaran E., Krishnamoorthy V., Balaji S., (2020). Numerical Analysis of Dimple Effect on Airfoils for varied AoA, International Research Journal On Advanced Science Hub.
14. Gabrian International (H.K.) Ltd., 7075 Aluminum Alloy: Properties, <https://www.gabrian.com/>

