

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NACA0015 KANAT PROFİLİ ÜZERİNDE ÇİFT YARIKLI KOORDİNELİ JET  
AKTÜATÖR İLE AKTİF AKIŞ KONTROLÜNÜN DENEYSEL VE SAYISAL  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fatih SONKAYA**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Isı-Akışkan Programı**

**HAZİRAN 2019**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NACA0015 KANAT PROFİLİ ÜZERİNDE ÇİFT YARIKLI KOORDİNELİ JET  
AKTÜATÖR İLE AKTİF AKIŞ KONTROLÜNÜN DENEYSEL VE SAYISAL  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fatih SONKAYA  
(503151148)**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Isı Akışkan Programı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Sertaç ÇADIRCI  
Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Duygu ERDEM**

**HAZİRAN 2019**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503151148 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Fatih SONKAYA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “NACA0015 KANAT PROFİLİ ÜZERİNDE ÇİFT YARIKLI KOORDİNELİ JET AKTÜATÖR İLE AKTİF AKIŞ KONTROLÜNÜN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Dr. Öğr. Üyesi Sertaç ÇADIRCI** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Eş Danışman :** **Dr. Öğr. Üyesi Duygu ERDEM** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğr. Üyesi Kemal Bülent YÜCEİL** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Hakan DEMİR** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Baha ZAFER** .....  
İstanbul Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : **02 Mayıs 2019**

**Savunma Tarihi** : **13 Haziran 2019**





*Aileme,*





## ÖNSÖZ

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda bana yol gösteren danışman hocalarıma, deneysel çalışmalar sırasındaki yardımlarından dolayı okul arkadaşlarıma ve laboratuvar çalışanlarına, elektronik kısımda katkılarından dolayı iş arkadaşlarıma ve bu çalışmanın her aşamasında bana destek olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2019

Fatih Sonkaya  
(Makina Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>SEMBOLLER</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xix</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Tezin Konusu ve Kapsamı .....	3
1.3 Tezin Özgün Değeri .....	4
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>7</b>
2.1 Akış Kontrolünün Esasları .....	7
2.2 Kanat Etrafında Akış Kontrolü Uygulamaları .....	9
2.2.1 Kanat etrafında pasif akış kontrolü uygulamaları .....	11
2.2.2 Kanat etrafında aktif akış kontrolü uygulamaları .....	13
2.3 Jet Aktüatörle Aktif Akış Kontrolü .....	16
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>23</b>
3.1 Deneysel Düzeneklerinin Oluşturulması .....	23
3.1.1 Kanat içerisindeki jet aktüatör düzeneğinin tasarımı ve üretimi.....	25
3.1.2 Rüzgar tüneli içerisine yerleştirilen düzeneğinin tasarımı ve üretimi.....	33
3.2 Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar .....	36
3.2.1 Jet aktüatörün yarık çıkış hızı ölçümleri .....	37
3.2.2 Kanat profili üzerinden basınç ölçümleri .....	41
3.2.3 Kanat profiline ait kuvvet karakteristiklerinin elde edilmesi.....	48
3.2.4 Akış kontrolünün dumanla görüntülenmesi .....	51
<b>4. SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI</b> .....	<b>55</b>
4.1 Tez Öncesi Yapılan HAD Analiz Çalışmaları .....	55
4.2 HAD Analizleri için Çözüm Ağının ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	60
4.3 HAD Analizlerinde Kullanılacak Türbülans Modelinin Belirlenmesi.....	64
4.4 HAD Analizlerinde Kullanılacak Çözüm Ağı Sıklığının Belirlenmesi .....	73
4.5 Jet Aktüatörlü Kanat için HAD Analizlerinin Gerçekleştirilmesi.....	75
4.5.1 Jet aktüatörlü kanat için çözüm ağının oluşturulması .....	75
4.5.2 Jet aktüatörlü kanat için HAD analizi sınır şartlarının belirlenmesi .....	76
4.5.3 Jet aktüatörlü kanat için HAD analizi sonuçları .....	81
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>89</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>93</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>97</b>



## KISALTMALAR

<b>2B</b>	: İki boyutlu
<b>3B</b>	: Üç boyutlu
<b>CFD</b>	: Computational Fluid Dynamics
<b>DBD</b>	: Dielectric Barrier Discharge
<b>DC</b>	: Direct Current
<b>DES</b>	: Detached Eddy Simulation
<b>HAD</b>	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
<b>İTÜ</b>	: İstanbul Teknik Üniversitesi
<b>LES</b>	: Large Eddy Simulation
<b>MRF</b>	: Micro-riblet film
<b>NACA</b>	: National Advisory Committee for Aeronautics
<b>PIV</b>	: Particle Image Velocimeter
<b>PLA</b>	: Polilaktik asit
<b>PWM</b>	: Pulse Width Modulation
<b>RANS</b>	: Reynolds Avaraged Navier Stokes
<b>RNG</b>	: Re-Normalisation Group
<b>SST</b>	: Shear Stress Transport
<b>UDF</b>	: User Defined Function



## SEMBOLLER

<b>Re</b>	: Reynold sayısı
<b>Ma</b>	: Mach sayısı
<b>C<sub>l</sub></b>	: Taşıma katsayısı
<b>C<sub>d</sub></b>	: Sürüklenme katsayısı
<b>C<sub>p</sub></b>	: Basınç katsayısı
<b>C<sub>μ</sub></b>	: Momentum katsayısı
<b>C</b>	: Viter uzunluğu
<b>y<sup>+</sup></b>	: Boyutsuz duvar mesafesi
<b>y<sub>s</sub></b>	: Yüzey üzerindeki akışa ait ilk ağ yapısı elemanının yüksekliği
<b>h</b>	: Jet yarık genişliği
<b>R<sub>jet</sub></b>	: En yüksek jet yarık çıkış hızının serbest akış hızına oranı ( $A_{jet}/U_{\infty}$ )
<b>A<sub>jet</sub></b>	: En yüksek jet yarık çıkış hızı
<b>V<sub>jet</sub></b>	: Jet yarık çıkış hızı
<b>μ</b>	: Vizkozite
<b>ρ</b>	: Özkütle
<b>ρ<sub>h</sub></b>	: Havanın özkütlesi
<b>α</b>	: Kanadın hücum açısı
<b>Θ<sub>j</sub></b>	: Jetin yarık çıkış açısı
<b>Φ</b>	: Kanat profili üzerindeki bir noktanın yüzey normalinin açısı
<b>U<sub>∞</sub></b>	: Serbest akış hızı
<b>U<sub>τ</sub></b>	: Yüzey sürtünme hızı
<b>U<sub>y</sub></b>	: Yarık çıkış hızı deneysel sonuçları için türetilen fonksiyon
<b>U<sub>1</sub></b>	: Jet aktüatör piston-1 çıkış hızı için türetilen fonksiyon
<b>U<sub>2</sub></b>	: Jet aktüatör piston-2 çıkış hızı için türetilen fonksiyon
<b>mm</b>	: Milimetre
<b>cm</b>	: Santimetre
<b>m</b>	: Metre
<b>d/d</b>	: Devir/Dakika
<b>f</b>	: Frekans
<b>t</b>	: Zaman

<b>T</b>	: Periyot
<b>sn</b>	: Saniye
<b>Hz</b>	: Hertz (1/sn)
<b>fps</b>	: Frame per second (Saniyede alınan görüntü)
<b>P<sub>i</sub></b>	: Kanat üzerindeki i ölçüm noktasından alınan basınç değeri
<b>P<sub>∞</sub></b>	: Serbest ortam basıncı
<b>Pa</b>	: Pascal
<b>K</b>	: Kelvin
<b>V</b>	: Volt
<b>π</b>	: Pi sayısı
<b>x</b>	: Koordinat sisteminin x eksenindeki değişim miktarı





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 3.1</b> : Aktif akış kontrol uygulamasında incelenecek jet karakteristikleri. ....	<b>28</b>
<b>Çizelge 3.2</b> : Basınç prizlerinin kanat üzerindeki konumları. ....	<b>31</b>
<b>Çizelge 4.1</b> : Ağ yapısındaki eleman sayısının değişimine göre $C_l$ katsayıları. ....	<b>73</b>
<b>Çizelge 4.2</b> : Ağ yapısındaki eleman sayısının değişimine göre $C_d$ katsayıları.....	<b>74</b>
<b>Çizelge 4.3</b> : Kontrollü ve kontrolsüz kanat profillerinin deney ve HAD analizleri arasındaki $C_l$ ve $C_d$ katsayıları kıyaslaması. ....	<b>81</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Kanatların kullanıldığı bazı araçlar (Url-1, Url-2, Url-3, Url-4).....	1
Şekil 1.2 : Uçak kanatları üzerine yerleştirilen kanatçık yapıları (solda) ile girdap üreteçleri (sağda) (Joslin ve Miller, 2009).....	2
Şekil 2.1 : Sınır tabaka üzerinde akış ayrılmasının oluşumu (Schlichting, 1979). ....	8
Şekil 2.2 : Akış kontrol uygulamalarının temel amaçları (Gad-el-Hak, 2000). ....	9
Şekil 2.3 : Akış kontrol yöntemlerinin sınıflandırılması (Joslin ve Miller, 2009). ...	10
Şekil 2.4 : Pasif girdap üreteçlerinin boyutlandırılmasında kullanılan değişkenler (Godard ve Stanislas, 2006).....	12
Şekil 2.5 : Pasif kontrol uygulamalarında Gurney kanatçığı kullanımı (Li ve diğ, 2002). ....	12
Şekil 2.6 : Kambur balinadan esinlenen pasif kontrol geometrisi (Favier ve diğ, 2012). ....	13
Şekil 2.7 : Firar kenarı üzerine eklenen salınımlı kanatçık yapısı (Xiao ve diğ, 2013). ....	14
Şekil 2.8 : Kanat üzerindeki salınımlı parçanın yerleşimi (Kang ve diğ, 2015).....	15
Şekil 2.9 : Piezoelektrik tahrik sistemine sahip sentetik jet aktüatörü (Tang ve diğ, 2014). ....	17
Şekil 2.10 : Jet aktüatör çıkışı için iki farklı tasarımının gösterimi (Godard ve diğ, 2006). ....	18
Şekil 2.11 : Kanat üzerinde iki farklı konumda jet aktüatör kullanımı (Müller-Vahl ve Greenblatt, 2015). ....	20
Şekil 2.12 : You ve Moin (2008) tarafından gerçekleştirilen HAD analizine ait ağ yapısı (a) ve analizin herhangi bir anına ait hız dağılımları (b).....	21
Şekil 3.1 : Deneysel çalışmalarında kullanılan rüzgar tüneli. ....	24
Şekil 3.2 : İki yarıkli jet aktüatör sisteminin şematik gösterimi. ....	25
Şekil 3.3 : Tasarlanan iki yarıkli jet aktüatör sistemine ait ölçülerin gösterimi. ....	26
Şekil 3.4 : Kanat tasarımına ait katı modelin gösterimi. ....	29
Şekil 3.5 : Kanat profili için üretilen alt parçalar. ....	30
Şekil 3.6 : Kanat üzerinde bulunan basınç prizi konumlarının şematik gösterimi. ...	31
Şekil 3.7 : Basınç prizlerine geçirilen hortumların görüntüsü. ....	32
Şekil 3.8 : Jet aktüatör sistemine ait elektronik devre. ....	32
Şekil 3.9 : Jet aktüatörlü kontrol sistemine sahip NACA0015 kanat düzeneğinin montaj görüntüsü. ....	33
Şekil 3.10 : Rüzgar tüneli içerisine yerleştirilen düzeneğin katı model tasarımı. ....	34
Şekil 3.11 : Rüzgar tüneli içerisindeki yerleşimin şematik gösterimi. ....	35
Şekil 3.12 : Rüzgar tüneli içerisine yerleştirilen deney düzeneği.....	36
Şekil 3.13 : Yarık çıkışında hız ölçümlerinin gerçekleştirildiği konumlara ait şematik gösterim. ....	38
Şekil 3.14 : Ortalama yarık çıkış hızlarının zamana bağlı değişimi. ....	39

<b>Şekil 3.15</b> : 18,67 Hz frekanslı çalışmaya ait hız grafiği ile bu sonucu temsil etmek üzere oluşturulan fonksiyona ait grafiğin kıyaslanması.....	<b>41</b>
<b>Şekil 3.16</b> : Kanat üzerindeki basınç ölçümlerinin yapıldığı 32 kanallı ESP-32HD minyatür basınç tarayıcı ve Aeroprobe yazılımının kullanıldığı bilgisayar.....	<b>42</b>
<b>Şekil 3.17</b> : Gerçekleştirilen deneylerde elde edilen kanat etrafındaki $C_p$ dağılımları.....	<b>43</b>
<b>Şekil 3.18</b> : Gerçekleştirilen deneylerde kontolsüz ve kontrollü kanada ait kuvvet karakteristiklerinin gösterimi.....	<b>50</b>
<b>Şekil 3.19</b> : Rüzgar tüneli içerisinde kontolsüz kanada ait dumanla görüntüleme sonuçları.....	<b>52</b>
<b>Şekil 3.20</b> : Rüzgar tüneli içerisinde kontrollü kanada ait dumanla görüntüleme sonuçları.....	<b>53</b>
<b>Şekil 4.1</b> : ANSYS Fluent programı içerisinde kullanılmakta olan türbülans modelleri (ANSYS Inc, 2014). .....	<b>56</b>
<b>Şekil 4.2</b> : 4 derece hücum açısına sahip %14 kalınlıklı süper-kritik bir kanat profilinin deney ve HAD analizi sonuçları (Nakayama, 1985). .....	<b>57</b>
<b>Şekil 4.3</b> : Kaskat kanat profili üzerinde deney ve HAD analizi sonuçları (Kurz ve diğ, 2016). .....	<b>58</b>
<b>Şekil 4.4</b> : Akış kontrollü ve kontolsüz NACA0015 profili üzerindeki $C_p$ dağılımı için deney ve HAD analiz sonuçları (You ve Moin, 2008). .....	<b>59</b>
<b>Şekil 4.5</b> : Kontolsüz NACA0015 kanat modeli için oluşturulan çözüm ağı yapısı.	<b>61</b>
<b>Şekil 4.6</b> : 12 derecelik hücum açısına sahip kontolsüz kanadın analizi sırasında oluşan $y^+$ dağılımı. ....	<b>62</b>
<b>Şekil 4.7</b> : Kontolsüz NACA0015 kanat modeli için oluşturulan sınır koşulları. ....	<b>63</b>
<b>Şekil 4.8</b> : HAD analizleri içerisinde kullanılan sayısal çözüm metotları: a) DES / Spalart-Allmaras b) DES / k-e Rea. Enh. c) DES / k-w SST.....	<b>63</b>
<b>Şekil 4.9</b> : Taşıma katsayısı açısından HAD analizleri ile deney ve literatür sonuçlarının kıyaslanması (He ve Corke, 2009; Zheng ve diğ, 2018)..	<b>64</b>
<b>Şekil 4.10</b> : Sürüklenme katsayısı açısından HAD analizleri ile deney ve literatür sonuçlarının kıyaslanması (He ve Corke, 2009; Zheng ve diğ, 2018)..	<b>66</b>
<b>Şekil 4.11</b> : Kanat üzeri $C_p$ dağılımı için HAD analizleri ile deney sonuçlarının kıyaslanması.....	<b>68</b>
<b>Şekil 4.12</b> : Çift yarıklı jet aktüatörlü NACA0015 kanat modeli için oluşturulan çözüm ağı yapısı. ....	<b>76</b>
<b>Şekil 4.13</b> : Çift yarıklı jet aktüatörlü NACA0015 kanat modeli için oluşturulan sınır koşulları.....	<b>77</b>
<b>Şekil 4.14</b> : Kanat içerisindeki jet aktüatörün çalışması ile yarık çıkışında oluşan hız dağılımları. ....	<b>79</b>
<b>Şekil 4.15</b> : Yarık çıkışındaki hızların deney ve HAD analizleri için kıyaslaması. ..	<b>80</b>
<b>Şekil 4.16</b> : Aktif akış kontrolünün uygulanma durumuna göre 16 derecelik hücum açısında akış alanında oluşan hız dağılımları (Baştan sona: Kontolsüz, Kontrollü-8,0 Hz, Kontrollü-13,3 Hz, Kontrollü-18,7 Hz).....	<b>82</b>
<b>Şekil 4.17</b> : Aktif akış kontrolünün uygulanma durumuna göre 16 derecelik hücum açısında akış alanında oluşan hız dağılımları (Baştan sona: Kontolsüz, Kontrollü-8,0 Hz, Kontrollü-13,3 Hz, Kontrollü-18,7 Hz).....	<b>83</b>
<b>Şekil 4.18</b> : Kontrollü kanat üzerindeki $C_p$ değerleri için deney ve HAD analiz sonuçlarının kıyaslanması.....	<b>84</b>
<b>Şekil 4.19</b> : HAD analizleriyle elde edilen $C_p$ dağılımlarının kanadın kontrollü ve kontolsüz durumuna göre kıyaslanması. ....	<b>87</b>

# **NACA0015 KANAT PROFİLİ ÜZERİNDE ÇİFT YARIKLI KOORDİNELİ JET AKTÜATÖR İLE AKTİF AKIŞ KONTROLÜNÜN DENEYSSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ**

## **ÖZET**

Kanat profilleri aerodinamik açıdan sahip oldukları avantajlar sebebiyle endüstriyel ve askeri alandaki birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu uygulamalar içerisinde kanadın getirmiş olduğu etkinin değiştirilmesi veya geliştirilmesi amacıyla kullanılan akış kontrol yöntemleri önemli bir yer tutmaktadır. Kontrol işlemi esnasında dışarıdan enerji girdisi olup olmama durumuna göre pasif ve aktif kontrol olarak ikiye ayrılan akış kontrol yöntemleri, kanat kullanılan uygulamalar içerisinde tarih boyunca çeşitli şekillerde kullanılmıştır. Zaman içerisinde, özellikle de havacılık alanındaki gelişmeler ve enerji sektöründeki verimliliğin artırılması yönündeki çabalar sonucunda akış kontrol yöntemlerine olan ilgi giderek artmıştır. Bununla birlikte elektronik ve yazılım alanlarındaki ilerlemeler ile bu ilgi daha da artmış ve konu hakkında yapılan çalışmaların alanı oldukça genişlemiştir. Son olarak fiziksel prensiplerin pratik uygulamalara dönüştürülmesinde sağlanan kolaylıklar da bu gelişmelere eklenmiş ve akış kontrol yöntemlerinin özellikle de aktif akış kontrol yöntemlerinin birçok alanda uygulanması oldukça avantajlı hale gelmiştir.

Kanat etrafındaki akışı düzenlemek amacıyla kullanılan yöntemlerden olan pasif akış kontrol yöntemleri genellikle kanat üzerine yerleştirilen sabit geometrilerden oluşturulmaktadır. Bu durumda sabit eklenti kanadın tüm olası şartlarında kullanılmakta ve kanadın kontrol edilmek istenen şartları haricinde performans kaybı yaşamasına sebep olmaktadır. Aktif akış kontrol yöntemlerinde ise bu olumsuz durum olabildiğince minimuma indirilmiştir. Kullanılan yöntemin istenilen şartlarda devreye alınıp istenilmeyen şartlarda devre dışı bırakılması, kontrolün kanat üzerindeki etkisinin her zaman olumlu kalmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte pasif sistemlerde aktif sistemlere kıyasla dışarıdan bir enerji girdisi olmaması ve oldukça basit üretim süreçlerine sahip olması, pasif yöntemlerin tercih edildiği uygulamalarda görülen önemli tercih sebeplerindendir.

Tez kapsamında yapılan literatür araştırmaları sonucunda aktif kontrol yöntemlerinden jet aktüatörlü sistemin kullanılmasına karar verilmiştir. Devamında literatürdeki çalışmalara katkı verebilmek amacıyla yeni bir jet aktüatör tasarımının yapılması planlanmıştır. Buna göre NACA0015 kanat profili üzerine açılan iki yarıklı jet aktüatör çıkışına sahip bir tasarım oluşturulmuştur. Bu tasarımda kullanılan jet aktüatör, bir krank-biyel mekanizması yardımıyla pistonu ileri-geri hareket ettirmekte ve böylece pistonun oluşturduğu akış hareketi ile birlikte her iki yarık çıkışında koordineli bir şekilde emme-basma işlemi meydana getirilmektedir. Hareketin tek bir mekanizmayla oluşturulması yarık çıkışlarındaki işlemlerin sıralı bir düzen halinde oluşmalarını sağlamaktadır. Tez kapsamında hazırlanan bu

tasarımın kanat performans parametrelerine olan etkisi farklı jet frekanslarında ve çeşitli hücum açılarında incelenmiştir. Sayısal ve deneysel çalışmalar sonrasında elde edilen sonuçlar kanat kontrolünün etkisinin daha iyi gösterilebilmesi amacıyla çeşitli yönlerden kıyaslanmıştır.

Deneysel çalışmalar tasarlanan modele ait sınırların belirlenmesiyle başlamıştır. Buna göre referans alınan literatür çalışmasında kullanılan modele ait sınırlar ile birlikte kullanılacak rüzgar tüneli ve çeşitli hazır ürünlerin boyutlarının değerlendirilmesi sonrasında, kanat modelinin ölçüleri ve tasarımı oluşturulmuştur. Hazırlanan tasarımın ana gövdeleri ve bazı alt parçalarının tasarımı 3B yazıcı yardımıyla üretilmiştir. Tüm parçaların üretimi ve temini sonrasında gerekli basınç ölçüm noktaları oluşturulmuş ve tüm sistemin montajı yapılmıştır. Sonrasında kanat modeli 0-20 derecelik hücum açıları arasında hareket edebilecek şekilde ve akışın 3 boyutlu etkilerini giderecek şekilde oluşturulan tünel içerisindeki düzeneğe yerleştirilmiştir. Kanada ait performans sonuçlarının elde edileceği deneylere başlamadan önce kanadın üzerindeki yarıklara ait jet çıkış hızları sıcak tel anemometresi kullanılarak ölçülmüştür. Hız değerleri yarık çıkışları boyunca 8'er noktada elde edilmiştir. Böylece jet aktüatör içerisindeki pistonun verimi ve kaçak miktarı ortaya çıkmıştır. Sonrasında gerçekleştirilen deneylerde ise akış kontrolünün kanat performansına olan etkisinin basınç katsayısı ve kuvvet karakteristikleri açısından incelenmesi hedeflenmiştir. Deneyler kontrolsüz kanat için ve 3 farklı frekanstaki jet aktüatörlü kanat için 9 farklı hücum açısında tekrarlanmıştır. Kanat üzerindeki basınç prizlerinden alınan verilerle kanat etrafındaki basınç katsayısı dağılımı elde edilmiş ve grafiklerle gösterilmiştir. Bununla birlikte kanadın  $C_1$  ve  $C_d$  katsayıları, kanat üzerinden elde edilen basınç değerlerinin kullanılmasıyla değişen hücum açısına göre hesaplanmıştır. Deneylerde son olarak kanat etrafındaki akışın dumanla görüntülenmesi gerçekleştirilmiştir. Görüntüleme işlemi ile birlikte akış kontrolünün kanat üzerindeki tutunma kaybı durumunun geciktirilmesine olan etkisi gösterilmiştir.

HAD analizleri için ilk olarak uygun sayısal modelin oluşturulması çalışması yapılmıştır. Bunun için literatürdeki bazı çalışmaların analizleri farklı türbülans modelleriyle gerçekleştirilmiş ve deney sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. DES modeli ile elde edilen sonuçların gerçeğe en yakın sonuçları verdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmadan sonra tez kapsamında kullanılacak NACA0015 kanat profili için çizimler hazırlanmış ve ağ yapısı oluşturulmuştur. DES türbülans modeli içerisindeki farklı RANS modelleri ile analizler tekrarlanmış ve elde edilen basınç katsayısı ile kuvvet karakteristiklerine ait değerler deney sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Burada en uygun sonucu veren türbülans modeliyle kalan analizler sürdürülmüştür. Daha sonra analizin ağ yapısındaki eleman sayısının farklı değerleri için sonuçlar irdelenmiş ve model için yeterli olan eleman sayısı tespit edilmiştir. Bu adımdan sonra akış kontrollü modelin çizimi oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin ağ yapısının sıklığı genel olarak önceki analizden alınmışsa da kanat etrafındaki eleman sayısı burada daha yoğun bir haldedir. Kritik hücum açılarında gerçekleştirilen HAD analizleri sonucunda akış alanına ait hız dağılımının görselleri verilmiş; basınç katsayısı ve kuvvet karakteristikleri deney sonuçlarıyla ve kontrolsüz duruma ait sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar sonrasında gerekli değerlendirmeler yapılmış ve bazı sonuçlara varılarak çeşitli öneriler getirilmiştir. Buna göre kullanılan akış kontrol sistemi jet frekansına bağlı olarak değişmekle birlikte kanat üzerinde olumlu etkilere sahiptir. Özellikle tutunma kaybının geciktirilmesi, taşıma

katsayısının arttırılması ve sürüklenme kuvvetlerinin azaltılması gibi avantajlar bunlardan bazılarıdır. Sonuç olarak tasarlanan modelin kanat uygulamalarında aktif kontrol yöntemi olarak kullanılması mümkün gözükmektedir. Ancak gerçekleştirilen çalışmanın hem deneysel hem de sayısal kısmında geliştirilmesi gereken noktalar bulunduğundan model üzerinde daha fazla çalışma yapılması daha uygundur. İlerleyen dönemde yapılacak çalışmalarda tasarlanan modelin daha detaylı şekilde analizlerinin gerçekleştirilmesi, uygulanan aktüatör frekansı için aralığın genişletilmesi ve farklı jet aktüatör tipleri ile çeşitli performans parametreleri açısından kıyaslanması bu çalışmalara örnek olarak verilebilir.







# **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF ACTIVE FLOW CONTROL BY COORDINATELY JET ACTUATOR WITH DUAL SLOT ON NACA0015 AIRFOIL**

## **SUMMARY**

Due to their aerodynamic advantages, wing profiles are used in many industrial and military applications. In these applications, flow control methods used to change or improve the effect of the wing have an important position. Flow control methods, which are divided into passive and active control methods according to the presence or absence of external energy input during the control process, have been used in various ways throughout the history in the applications where the wing is used. Over time, interest in flow control methods has increased, especially as a result of advances in aviation and efforts to increase efficiency in the energy sector. Moreover, this interest has increased with the advances in electronics and software fields and the field of studies on the subject has expanded considerably. Finally, the convenience of converting physical principles into practical applications has been added to these developments and it has become very advantageous to apply flow control methods, especially active flow control methods, in many areas.

Passive flow control methods used to regulate the flow around the airfoil are generally composed of fixed geometries placed on the airfoil. In this case, the fixed part is used in all possible conditions of the airfoil and causes the performance loss of the airfoil except for the conditions to be controlled. In active flow control methods, this negative situation is minimized as much as possible. Activating the method used in the desired conditions and deactivating it under undesirable conditions ensures that the effect of the control on the airfoil always remains positive. On the other hand, the fact that there is no external energy input in passive systems compared to active systems and that they have very simple manufacturing processes are among the important reasons that are preferred in applications where passive methods are used.

As a result of the literature research done within the scope of the thesis, it was decided to use jet actuator system which is one of the active control methods. In order to contribute to the studies in the literature, a new jet actuator design is planned. Accordingly, a design which has jet actuator that has two slot outlets opening onto the NACA0015 airfoil has been generated. The jet actuator used in this design moves the piston back and forth with the aid of a crank-connecting rod mechanism, whereby the suction-blowing movement of the piston is formed in a coordinated manner at both slot outlets. The eventuating of the movement by a single mechanism ensures that the processes realized as synchronous. The effect of this design on airfoil performance parameters was investigated at different jet frequencies and various angle of attack. The results obtained after numerical and experimental studies were compared in various aspects in order to better demonstrate the effect of wing control method. Moreover, visuals were obtained from both experimental and

numerical studies in order to show the velocity distribution of the flow around the airfoil.

Experimental studies started with determination of the boundaries of the designed model. Firstly, an assesment was made on the boundaries of the model used in the reference literature study, the dimensions of the wind tunnel and the size of the various products. According to this assessment, the dimensions of the design are clarified. The main bodies and some sub-parts of the prepared design are produced with the help of 3D printer. Thus, manufacturing of wing model has become easier. After the production and supply of all parts, necessary pressure measurement points were formed and the whole system was assembled. The wing model was placed in the wind tunnel as centered to eliminate the 3-dimensional effects of the flow. It can be turned to attack of angles between 0-20 degrees in the wind tunnel. Before starting the experiments to obtain the performance results of the airfoil, jet exit velocities of the slots on the airfoil were measured using hot wire anemometer. Velocity values were obtained at 8 points along the slot outputs. Thus, the efficiency of the piston in the jet actuator and the amount of leakage have been revealed. Accordingly, the highest velocity value of the flow at the slot exit was approximately 13% lower than expected. Furthermore, it has been found that the flow rate of the suction operation of the jet actuator is lower than the flow rate of blowing operation. In the subsequent experiments, it was aimed to investigate the effect of flow control method on airfoil performance in terms of pressure coefficient and force characteristics. The experiments were repeated at 9 different angle of attack for the uncontrolled airfoil model and for the controlled airfoil model which has 3 different jet actuator frequencies. The distributions of the pressure coefficient around the airfoil were obtained from the pressure outlets on the airfoil and they are shown in graphs. Moreover,  $C_l$  and  $C_d$  coefficients of the airfoil were calculated according to the angle of attack by using the pressure values obtained from the pressure outlets on the airfoil. Finally, the smoke flow visualization around the airfoil was carried out in the experimental studies. Thus, the effect of flow control method on stall was presented visually.

The study was carried out to determine the appropriate numerical model, before the CFD analysis was performed. For this purpose, some studies in the literature were analyzed with different turbulence models and compared with experimental results. It was found that the results obtained with DES model gave the most realistic results. After this study, drawings were prepared for NACA0015 airfoil to be used within the scope of the thesis and a mesh was generated on model. The analysis was repeated with different RANS models in DES turbulence model and the values of pressure coefficient and force characteristics obtained were compared with the experimental results. DES / k-w SST turbulence model was determined as the most suitable turbulence model according to the results. Then, the results for the different values of the number of elements in the mesh of the CFD analysis were examined and sufficient number of elements for the model was determined. After this step, the drawing of the flow controlled airfoil model was generated. Density of the mesh structure of the controlled airfoil model is more dense from uncontrolled airfoil model. As a result of CFD analysis performed at critical attack of angles, visuals of velocity distribution of flow area was given; pressure coefficient and force characteristics of airfoil were compared with experimental results and results of uncontrolled airfoil model.

After the studies carried out within the scope of the thesis, the results were evaluated and some suggestions were made. Accordingly, the flow control method used in study has positive effects on the airfoil; however, magnitude of the effect varies according to value of jet frequency. Delaying of stall, increasing the lift coefficient and reducing the drag coefficient are some of these positive effects. As a result, it is possible to use the designed model as an active control method in wing applications. However, since there are points that need to be developed in both experimental and CFD study, further work on the model may be required. Further detailed analysis of the model, widening the range for the actuator frequency applied and comparing the different types of jet actuators with different performance parameters are examples for these studies.





## 1. GİRİŞ

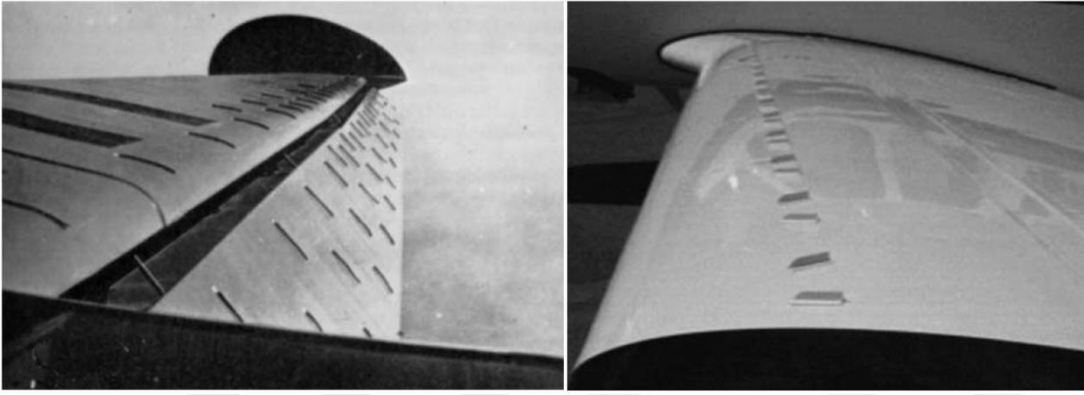
Kanatlar akışın yönlendirilerek çeşitli amaçlar çerçevesinde kullanılmasını sağlayan araçlardır. Bazı canlıların doğuştan sahip olduğu kanatların bu canlılara getirmiş olduğu yararlar tarih boyunca insanların da ilgisini çekmiş ve üretilen bir çok araç içerisinde kanatlardan faydalanılmıştır. Günümüzde, Şekil 1.1'de görüldüğü üzere, özellikle ulaşım araçları, turbomakinalar ve roketli silah sistemleri gibi alanlarda kanatlar kullanılmaktadır. Bahsedilen alanlardaki araçların tasarımında önemli bir yere sahip olan kanatlar, bununla alakalı bir çok bilimsel çalışmanın da konusu olmaktadır.



**Şekil 1.1 :** Kanatların kullanıldığı bazı araçlar (Url-1, Url-2, Url-3, Url-4).

Birçok sistemde olduğu gibi kanat sistemlerinde de tarih boyunca gelişmeler sürmüştür. İlk başlarda kanat profillerinin sahip olduğu geometri, aerodinamik açıdan geliştirilmiş ve birbirinden farklı hedefleri sağlamak amacıyla uygulama bazlı çeşitlendirilmiştir. Sonrasında pasif akış kontrol teknikleri kullanılarak kanat üzerine eklemeler yapılmış ve istenilen özellikler daha da geliştirilmiştir (Şekil 1.2). Son

yüzyıl içerisinde gerçekleşen iki dünya savaşı ve uzay teknolojisi yarışları havacılığa gösterilen önemin artmasına; sonrasında yaşanan 1973 Enerji Krizi ise havacılık da dahil olmak üzere ulaşım araçlarındaki enerji tüketiminde verimliliğin ön plana çıkarılmasına yol açmıştır. Bunların etkisinin yanı sıra elektronik alanda yaşanan teknolojik gelişmelerle birlikte aktif akış kontrol sistemlerinde de ciddi bir ilerleme kaydedilmiştir. Çok çeşitli fiziksel yöntemlerin istenilen anda ve büyüklükte kullanılabilmesi, aktif sistemlerin pasif sistemlere göre önemli avantajlara sahip olmasını sağlamıştır. Bununla birlikte aktif akış kontrol sistemlerinin sahip olduğu eksiklerin birçoğunun zaman içerisinde giderilmesi, kanatlı uygulamalarda bu sistemlerin kullanılmasını uygulanabilir hale getirmiştir (Gad-el-Hak, 1996).



**Şekil 1.2 :** Uçak kanatları üzerine yerleştirilen kanatçık yapıları (solda) ile girdap üreteçleri (sağda) (Joslin ve Miller, 2009).

## 1.1 Tezin Amacı

Günümüzde birçok kanat uygulamasında kullanılan akış kontrol yöntemlerinin temel amacının kaynakların daha verimli bir şekilde kullanılması olduğu söylenebilir. Özellikle ulaşım araçlarında tüketilen yakıt miktarının azaltılması amacıyla kullanılan bu yöntemler, çevresel ve ekonomik alanlarda olumlu sonuçlara sebep olmaktadır. Bununla birlikte akış kontrol yöntemlerinin kanat özelinde getirmiş olduğu faydalar incelenirse; akışa ait geçiş bölgesinin ertelenmesi, akış ayrılmasının geciktirilmesi, taşıma katsayısının artırılıp sürüklenme katsayısının azaltılması ve gürültünün azaltılması gibi olumlu etkilere sahip olduğu görülür (Gad-el-Hak, 2000).

Tez içerisinde, çift yarıkli koordineli jet aktüatör sistemi kullanımının NACA0015 kanat profili performansı üzerine sağladığı faydaların incelenmesi planlanmaktadır. Kullanılan akış kontrol tekniği ile kanada ait taşıma ve sürüklenme katsayılarının iyileştirilmesi ve tutunma kaybının olduğu hücum açısının geciktirilmesi

hedeflenmektedir. Bununla birlikte tez çalışmaları içerisinde gerçekleştirilmesi planlanan deneysel ve sayısal çalışmaların kıyaslanması ve böylece sayısal yöntemler içerisindeki farklı modellerin sonuca olan etkisinin irdelenmesi hedeflenen çıktılardan bir diğeridir. Ayrıca literatürdeki çalışmalarda uygulanmamış bir tasarımın denenmesiyle birlikte jet aktüatörlü aktif akış kontrol teknikleri ile ilgili çalışmalara bir katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

## **1.2 Tezin Konusu ve Kapsamı**

Tez kapsamında NACA0015 kanat profili üzerinde jet aktüatörlü aktif akış kontrolü uygulaması yapılmıştır. Jet aktüatör sistemi, kanat üzerindeki çift yarık üzerinden koordineli/bağlantılı şekilde emme-basma yapılarak çalıştırılmaktadır. Çalışmalar hem deneysel hem de sayısal olarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmıştır.

Öncelikle kanat üzerinde akış kontrolü üzerine bir literatür araştırması yapılmış ve konuyla alakalı çalışmalardan kısaca bahsedilmiştir. Benzer çalışmalardan referanslar getirilerek teze ait bazı noktalar netleştirilmiştir. Bununla birlikte incelenen konuyla alakalı teorik bilgiler verilmiş ve ilgili denklemler gösterilmiştir.

Çalışmalarda kanat üzerindeki bazı parametrelerin değiştirilmesiyle ortaya çıkan sonuçlar incelenmiştir. Buna göre 0-20 derece arasında değişen hücum açılarında kanadın kontrolsüz ve kontrollü durumları için deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Akış kontrollü durum için 3 farklı aktüatör frekansı belirlenmiştir ve bu şekilde akış kontrolünün kontrolsüz duruma göre etkisi farklı frekans değerleri boyunca gösterilmiştir. İncelenen yöntemin sınırlarını belirleyebilmek adına bazı parametrelerin değiştirilmesi söz konusu olsa da birçok parametrenin sabit tutulması gerekmiştir. Kanat üzerindeki yarıkların konumları ve genişlikleri, yarık çıkış açısı ve akışa ait Re sayısı sabit tutulan parametrelerden bazılarıdır.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar içerisinde kanat üzerinde basınç ölçümleri, yarık çıkış hızı ölçümleri ve dumanla görüntüleme yer almaktadır. Basınç ölçümlerinden elde edilen  $C_p$ ,  $C_l$  ve  $C_d$  katsayıları kanat performansının değerlendirilmesi adına çeşitli grafiklerle gösterilmiştir. Bununla birlikte yarık çıkışından elde edilen hız değerleri zamana bağlı bir fonksiyona dönüştürülerek HAD analizlerinde referans

olarak kullanılmıştır. Dumanla görüntülemeye ise aktif akış kontrolünün kanat üzerindeki "tutunma kaybı" durumuna olan etkisinin gösterilmesine çalışılmıştır.

Tez içerisinde yapılan sayısal çalışmalarda ilk olarak türbülans modelinin belirlenmesi adına analizler gerçekleştirilmiştir. Buradan elde edilen model ile analizler sürdürülmüş ve ağ yapısı eleman sayısının sonuçları etkilemediği yeterlilik seviyesi belirlenmiştir. Sonrasında belirlenen türbülans modeli ile ağ yapısının bazı bölgeleri ve ağ yoğunluğu kısmen kullanılarak akış kontrollü sistem için ağ yapısı tekrardan oluşturulmuştur. Böylece HAD analizlerinin gerçekleştirilmesiyle birlikte kanada ait iki kritik hücum açısında, aktüatörün 3 farklı frekans değeri için analizler tamamlanmıştır.

Sonuç olarak yapılan tüm çalışmalar ve elde edilen değerler kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Sonuçlarla ilgili yorumlar ve ileride yapılabilecek çalışmalar için öneriler getirilmiştir. İncelenen yöntemin gelecekte kullanımına dair öngörüler belirtilmiştir.

### **1.3 Tezin Özgün Değeri**

Tez içerisinde incelenen çift yarıklı koordineli jet aktüatör ile gerçekleştirilen aktif akış kontrolü, literatürde görülen bir çalışmadaki sistem üzerinden geliştirilmiştir. Gilarranz ve diğ. (2005) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada, NACA0015 kanat profili üzerindeki tek yaraktan emme-basma yapacak bir jet aktüatör sistemi kullanmışlardır. Tasarladıkları sistem içerisinde motorun tahrik ettiği bir piston bulunmakta ve pistonun hareketi ile birlikte kanat üzerindeki yaraktan dış ortama emme-basma yapılmaktadır. Böylece akış içerisinde kontrollü bir şekilde girdaplar oluşturulmakta ve akış ayrılması geciktirilmektedir. Tez kapsamında incelenen yöntemde ise bu çalışmadan hareketle tasarımdaki pistonun iki yarık çıkışını da besleyebileceği bir tasarım düşünülmüştür. Buna göre pistonun ön tarafı bir yarık çıkışına açılırken arka tarafı da bir başka yarık çıkışına açılacaktır. Bu sayede motor shaftının tek bir dönüşü ile dış ortama iki defa besleme yapılabilir. Dahası iki yarık çıkışı aynı pistondan beslediği için koordineli / senkronize bir şekilde emme-basma (üfleme) durumu oluşacaktır. Yani ön yarık basma hareketi yaparken arka yarık emme hareketini, öndeki yarık emme hareketini yaparken arkadaki yarık basma hareketini gerçekleştirecektir.



Literatür çalışmaları incelendiğinde önerilen jet aktüatör sistemine benzer bir çalışma tespit edilememiştir. Her ne kadar çift yarığa sahip jet aktüatörlü sistemler daha önceki çalışmalarda bulunsa da, tek piston üzerinden iki farklı yarığı koordineli bir şekilde besleyen jet aktüatör sistemi literatürdeki uygulamalarda bulunmamaktadır. Bu sebeple önerilen sistemin özgün bir tasarım olduğu belirtilebilir.



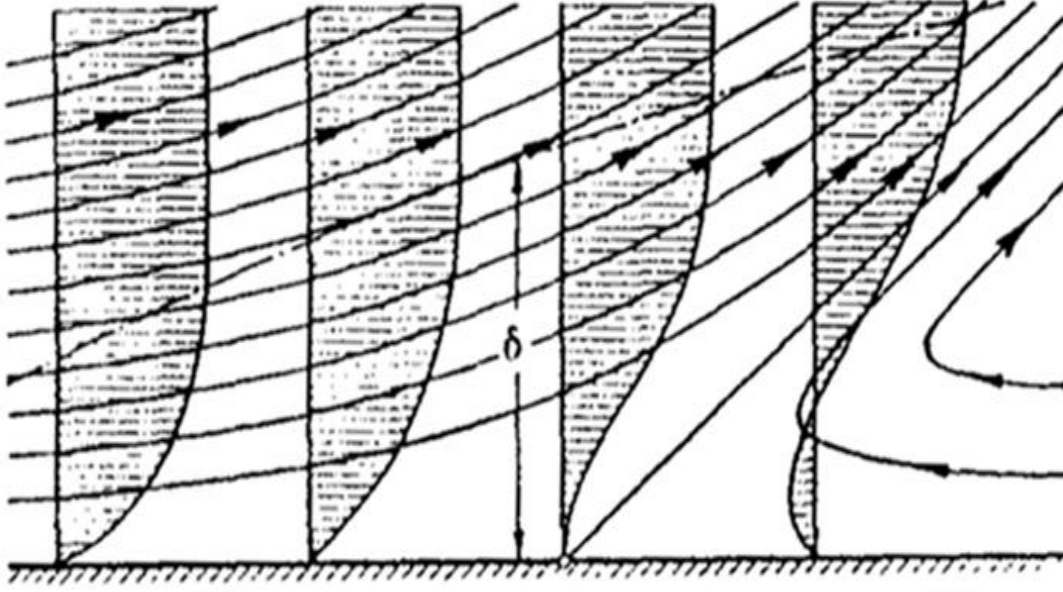


## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1 Akış Kontrolünün Esasları

Akış kontrolünü tanımlamak gerekirse, öncelikle bu terimden kastedilen mananın konuya uzak kişiler için olduğundan farklı bir anlam ifade ettiğini kabul etmek gerekir. Akış kontrolünün herhangi bir akışkanın çeşitli araçlarla "kontrol edilerek" faydalı işe dönüştürülmesini sağlayan eyleme ya da akışkan debisinin istenen miktara ayarlanarak "kontrol edilmesine" karşılık gelmediği belirtilmelidir. Buradaki akış kontrolü kavramı, akış alanına müdahale edilerek akışa ait karakteristiğın ve yönelimin normalde olması gerekenden farklı hale getirilmesi anlamına gelmektedir. Böylece kullanılan kontrol yöntemi aracılığıyla akışa ait istenmeyen durumların önüne geçilmesi ve akış şartlarının düzenlenerek iyileştirilmesi hedeflenmektedir (Gad-el-Hak, 2000).

Sınır tabaka kavramı, cismin dış yüzeyi üzerindeki akışa ait hız değişiminin yaşandığı ve duruma göre değişken bir yüksekliğe sahip bölgeyi ifade etmek amacıyla kullanılmaktadır. Akış kontrolü uygulamalarının birçoğunda kontrol, sınır tabaka üzerinden akışa uygulanan çeşitli pasif ve aktif etkiler yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple akış kontrolü kavramını daha iyi anlayabilmek için sınır tabaka üzerinde akış ayrılmasının açıklanması gerekmektedir. Şekil 2.1'de sınır tabaka üzerinde akış ayrılmasının oluşumu gösterilmektedir. Resimde akışkanın sabit bir katı cisim üzerine girişiyle birlikte yüzeydeki hız farkından kaynaklı viskoz sürtünmelerin artması ve sonrasında sınır tabakanın oluşumu ve değişimi gözükmektedir. Burada katı cidarı takip etmekte olan akışkana bazı durumlarda hareketi engelleyici şekilde basınç kuvvetleri etki etmektedir. Bu durumda sınır tabaka bölgesindeki akışkanın bu kuvvetleri karşılayabilecek bir momentuma sahip olmaması sonucunda akış hızı azalarak ters yönlü oluşmaya başlar. Böylece katı cidara yakın durumdaki akışkan genel akışın tersi yönde harekete geçerek katı cidar üzerindeki bağımlı koparır ve nihayetinde akış ayrılması gerçekleşmiş olur.

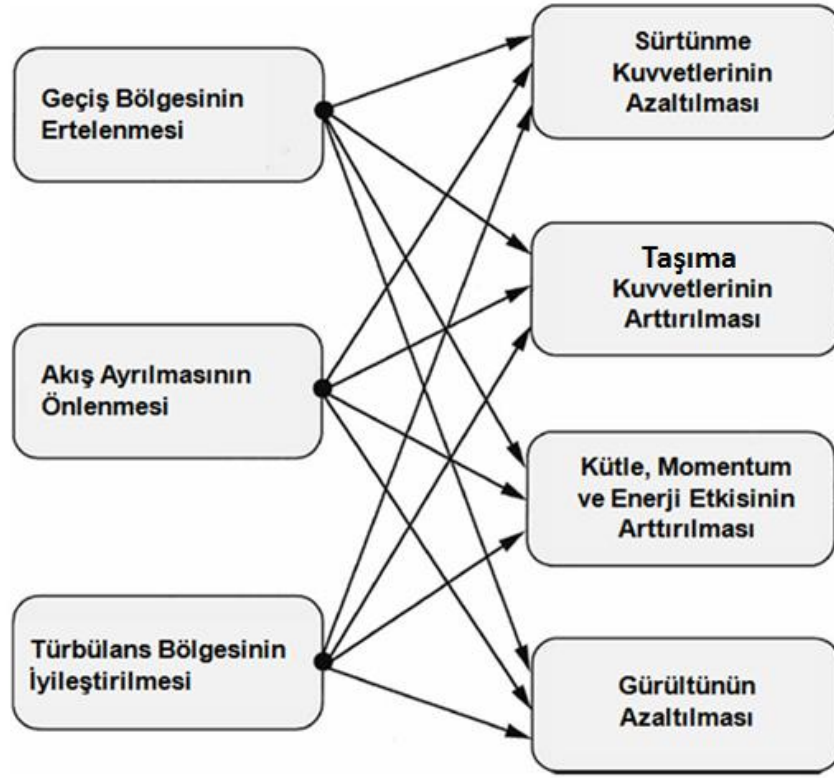


**Şekil 2.1** : Sınır tabaka üzerinde akış ayrılmasının oluşumu (Schlichting, 1979).

Akış ayrılması bazı uygulamalarda olumlu etkilere sahip olsa da genellikle istenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Akış düzeninin bozulması ile birlikte ortaya çıkan ciddi oranda enerji kayıpları, sürtünme kuvvetlerinin artıp taşıma kuvvetlerinin azalması, tutunma kayıplarındaki artış ve basınç dağılımının kötüleşmesi akış ayrılmasının önlenmesi veya geciktirilmesini önemli bir hedef haline getirmektedir. Bu nedenle akış ayrılmasının engellenmesi amacını taşıyan çeşitli kontrol yöntemleri geliştirilmektedir (Gad-el-Hak ve Bushnell, 1991).

Akış kontrolü yalnızca akış ayrılması durumunda değil, geçiş bölgesi ve türbülans bölgesi gibi istenmeyen durumların giderilmesi veya etkisiz hale getirilmesinde de kullanılmaktadır. Şekil 2.2'de gösterilen tablo üzerinde akış kontrolü uygulamalarının temel hedefleri gösterilmektedir. Buna göre sol kısımda bulunan etkilerin gerçekleştirilmesiyle birlikte sağ kısımda gösterilen olayların geliştirilmesi mümkün olmaktadır. Burada gösterilen kavramlar akış kontrolü uygulamalarının temel amaçlarını oluşturmaktadır (Gad-el-Hak, 2000).

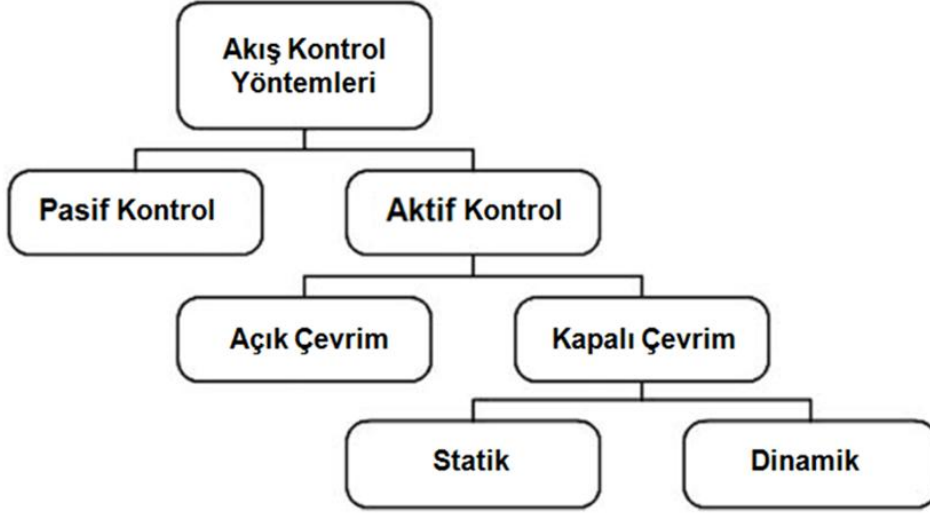
Akış kontrolünün uygulandığı alanlar incelendiğinde birçok endüstriyel uygulama alanı bulunan kanatlar göze çarpmaktadır. Literatürdeki çalışmalar arasında, kanat üzerinde akış kontrolü üzerine yapılan çalışmaların geniş bir yer kapladığı görülmektedir. Tez kapsamında incelenen bu konu üzerinde yapılan çalışmalar sonraki bölümlerde detaylı şekilde verilecektir.



Şekil 2.2 : Akış kontrol uygulamalarının temel amaçları (Gad-el-Hak, 2000).

## 2.2 Kanat Etrafında Akış Kontrolü Uygulamaları

Kanat etrafındaki akış kontrol uygulamalarına başlamadan önce akış kontrol yöntemleri için bir sınıflandırmaya gitmek ve literatürdeki çalışmaları bu sınıflandırma altında incelemek daha uygun olacaktır. Şekil 2.3'te gösterildiği üzere akış kontrol yöntemleri temel olarak iki başlık altında incelenebilir. Bunlar aktif ve pasif akış kontrol yöntemleridir. Aralarındaki farkı kısaca açıklamak gerekirse, aktif kontrol yöntemi içerisinde sisteme bir enerji girişi olurken pasif kontrol yöntemine sahip sistemlerde dışarıdan içeriye herhangi bir enerji girişi olmamaktadır. Bununla birlikte pasif sistemler genellikle sabit elemanlardan oluşurken, aktif sistemler hareketli ve değişken enerjili elemanlardan oluşmaktadır. Aktif kontrol yöntemleri içerisinde yapılan alt sınıflandırmada ise sistemin geri besleme durumuna göre açık ve kapalı çevrim olarak ikiye ayrılması söz konusudur. Bunlardan kapalı çevrime sahip sistemlerde geri besleme periyodunun sistemin cevap verme periyoduna göre değişimi, kapalı çevrimlerin statik ve dinamik olarak iki alt kategoriye ayrılmasına neden olur.



**Şekil 2.3 :** Akış kontrol yöntemlerinin sınıflandırılması (Joslin ve Miller, 2009).

Kanat üzerinden gidilecek olursa, pasif akış kontrol sistemleri genellikle kanat üzerine eklenen tümsek ve çukur yapılar, akış yolunu değiştiren kanallar, çeşitli geometrilere sahip siperler ve girdap üreteçleri gibi örneklere sahiptir. Bu yapılar kanat üzerinde sabit halde bulunan ve akış şartlarının değişimiyle değişmeyen ve kontrol edilemeyen geometrik eklentilerdir. Pasif akış kontrol yönteminin sahip olduğu avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da vardır. Bu sistemin dışarıdan herhangi bir enerji girişine ihtiyaç duymaması en büyük avantajıdır. Ayrıca basit ve ucuz bir şekilde imal edilebilmeleri sebebiyle uygulamalar içerisinde kullanımları daha kolay olabilmektedir. Bununla birlikte sahip oldukları stabil yapı sebebiyle değişen çalışma şartlarına uygun hale getirilememeleri ve hedeflenen tasarım sınırları haricinde sürüklenme kuvvetlerinde artışa neden olmaları gibi çeşitli olumsuz etkilere de sahiptirler (Çadırcı, 2010).

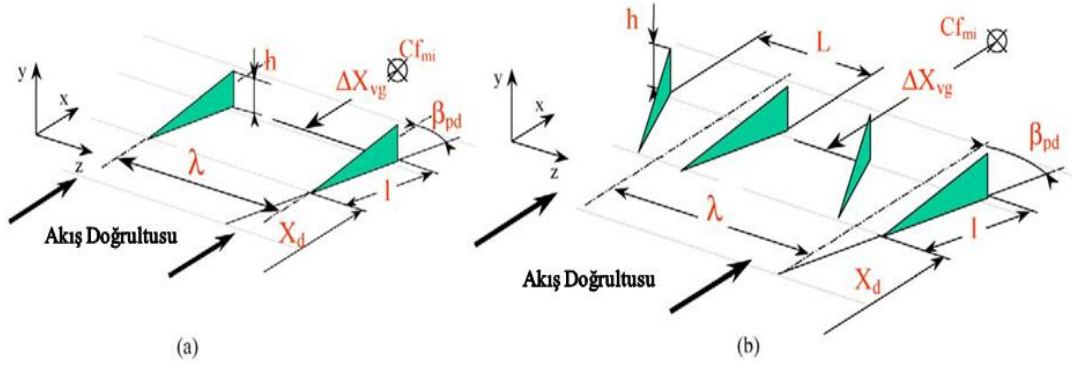
Aktif akış kontrol yöntemleri pasif yöntemlerden çok daha çeşitli uygulama örneklerine sahiptir. Fizik kanunlarından hareketle sisteme etki edebilecek birçok teknik, aktif akış kontrol yöntemleri altında kullanılmaktadır. Bunlar arasında hareketli geometrilerle oluşturulan aktüatörler olduğu gibi çeşitli tiplere sahip jet aktüatörler, plazma aktüatörler ve termal aktüatörler de bulunmaktadır. Tüm bu yöntemler dışarıdan enerji girdisi şeklinde ve hedeflenen akış sınır şartlarında kullanılabilir. Böylece kontrol mekanizmasının daha etkin olduğu şartlarda çalıştırılması ve akışa olumlu bir etkisinin olmadığı zamanlarda çalıştırılmaması sağlanabilmektedir. Bununla birlikte aktif kontrol sistemlerindeki verimin değeri de sistemin kontrol kabiliyetine bağlı olarak geliştirilebilmektedir (Çadırcı, 2010).

### 2.2.1 Kanat etrafında pasif akış kontrolü uygulamaları

Pasif akış kontrol yöntemleri uygulama esnasında dışarıdan enerji girdisi olmayan ve genellikle sabit yapılardan oluşan çeşitli akış kontrol yöntemlerinin ortak adıdır. Burada kritik olan nokta, normal şartlar altında kullanılmakta olan profillerin üzerine yapılan eklentilerin yapıyı kalıcı olarak değiştirmesidir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde kanatlar üzerinde kullanılan pasif kontrol yöntemleri çok çeşitli şekillerde gerçekleştirilmektedir. Özellikle kanat üzerine sonradan eklenebilecek şekilde kolaylıkla monte edilebilen yapılar uygulamalar sırasında kolaylık sağladığından daha fazla tercih edilmektedir. Bu yapıların şekilleri, konumları ve sıklıkları ise genellikle yapılan çalışmalarda incelenen değişkenler olmaktadır.

NACA 0012 kanat profili üzerine kapladıkları V-şekilli mikro-tırtık filmin (micro-riblet film / MRF) kanadın akış karakteristiklerine olan etkisini deneysel olarak inceleyen Lee ve Jang (2005), elde ettikleri verileri yayınladıkları çalışma ile paylaşmışlardır. Deneysel kuvvet ölçümleriyle birlikte PIV ölçümü ve dumanla görüntüleme de gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda özellikle sürüklenme katsayısı ve türbülans yoğunluğunun değişimi incelenmiştir. Buna göre kanat üzerine gelen sürüklenme kuvvetinin MRF kullanılan pasif akış kontrollü kanatlarda düşük Re değerleri ( $Re=1.54 \cdot 10^4$ ) için azaldığını, bununla birlikte Re sayısının yükselmesiyle ( $Re=4.62 \cdot 10^4$ ) birlikte sürüklenme kuvvetinin de arttığı gösterilmiştir.

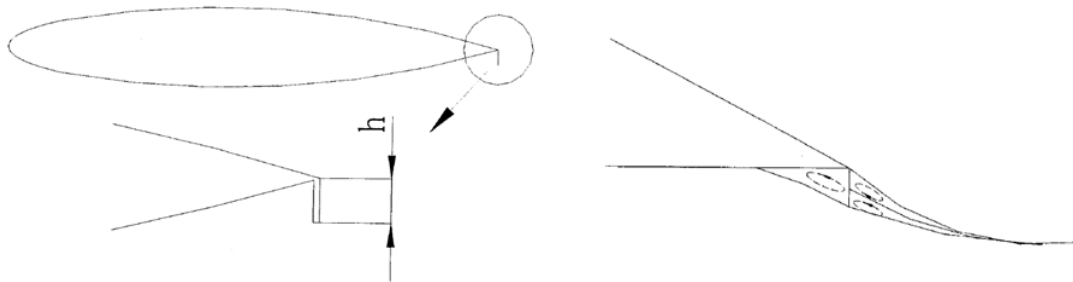
Literatürdeki pasif akış kontrollü çalışmalar arasında belki de en sık görülen yöntem girdap üreteçleri ile akış kontrolüdür. Godard ve Stanislas (2006) yapmış oldukları çalışmada kanadın yüksek hücum açılarındaki sınır tabaka ayrılmasını önlemek amacıyla kullanacakları aktif kontrol sistemlerini denemeden önce, ortaya çıkacak akış koşullarını gözlemleyebilmek için pasif girdap üreteçleri kullanmışlardır. Deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmalarda sıcak tel anemometresi, sıcak film sensörü ve PIV ile ölçümleri yapılmıştır. Şekil 2.4'te gösterilen girdap üreteçlerinin boyut ve konumlandırılması gibi parametrelerinde yapılan değişikliklerle ortaya çıkan sonuçlar kıyaslanarak yorumlanmıştır. Sonuç olarak girdap üreteçlerinin yüzey sürtünmelerine ve akış iz bölgesine olan etkisi incelenmiş ve boyutlardaki değişimlere göre bir optimizasyon çalışması yapılmıştır.



**Şekil 2.4** : Pasif girdap üreteçlerinin boyutlandırılmasında kullanılan değişkenler (Godard ve Stanislas, 2006).

Mazaheri ve diğ. (2015) kanat üzerine ekledikleri bir çıkıntının transonik akış koşullarındaki etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Akışın ses hızını aştığı sırada oluşan şok dalgalarının sürüklenmeye olan etkisini azaltmak amacıyla uygulanan pasif kontrol yöntemi, birkaç kanat profili üzerinde test edilmiştir. Çıkıntının boyutları parametrik olarak tanımlanarak optimizasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte çıkıntının kanat üzerindeki konumunun etkisi de incelenmiş ve buradaki değişimlerin akış bölgesine olan etkilerinden söz edilmiştir.

Gurney kanatçığı (gurney flap) pasif kontrol uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir diğer yapıdır (Şekil 2.5). Bu yapı kanadın kuyruk kenarı üzerine yerleştirilmekte ve temel olarak taşıma katsayısını arttırmayı amaçlamaktadır. Li ve diğ. (2002) de NACA0012 kanat profili üzerinde yapmış oldukları çalışmada bu yapıyı kullanarak akış karakteristiklerine olan etkilerini gözlemlemişlerdir. Deneylerde kanat üzerine eklenen yapıya ait boyutlar değiştirilerek ortaya çıkan sonuçlar incelenmiştir. Buna göre Gurney kanatçığının kullanımı ile birlikte  $C_l$  katsayısında ciddi bir artış gözlemlenmiştir. Kanatçık boyutunun en verimli olduğu değerin  $0.2C$  olduğu ve diğer taraftan kanadın  $C_d$  katsayısının da bu artışa paralel olarak arttığı da çalışma içerisinde belirtilmektedir.

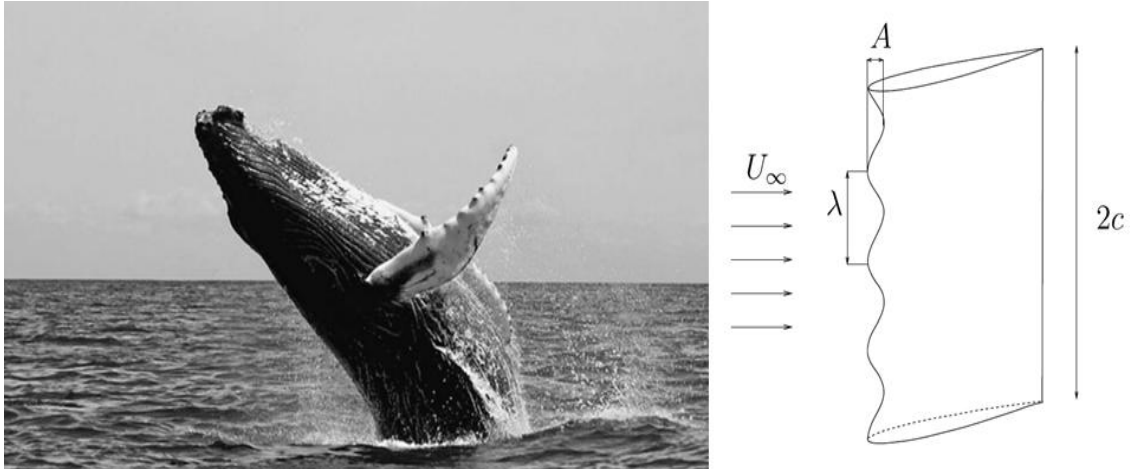


**Şekil 2.5** : Pasif kontrol uygulamalarında Gurney kanatçığı kullanımı (Li ve diğ., 2002).



Pasif akış kontrol yönteminin kullanıldığı bir diğer çalışma da Belamadi ve diğ. (2016) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada genellikle rüzgar türbinleri üzerinde kullanılan S809 kanat profili üzerine 2B yarıklar açılmış ve bu değişimin kanat karakteristikleri üzerine etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada kullanılacak türbülans modeli deneysel çalışmalardan elde edilen değerlere göre belirlenmiştir. Yarığa ait konum, genişlik ve doğrultu gibi parametreler HAD analizleri sırasında değiştirilerek denemiş ve kanat performansına en olumlu katkıyı sağlayan geometri tespit edilmiştir. Sonuç olarak kullanılan kontrol yönteminin kanat üzerinde yalnızca yüksek hücum açıları için fayda sağladığı, düşük hücum açılarında sürüklenme katsayısını artırma gibi olumsuzluklara sahip olduğu görülmüştür.

Favier ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmada kambur balina kanatçıklarının yumrularından esinlenerek bir pasif kontrol geometrisi geliştirmişlerdir (Şekil 2.6). Buna göre kanadın hücum kenarı üzerine sinüzoidal şekilde dalgalı bir geometri oluşturulmuş, bu geometrideki dalgalanmaların genlik ve dalga boyu değerleri ile oynanarak sayısal analizlerle optimizasyon koşturulmuştur. Oldukça düşük Re sayılarında gerçekleştirilen analizler sonrasında oluşturulan yapının sınır tabaka ayrılmasının kontrolü üzerinde oynadığı rol gösterilmiştir.



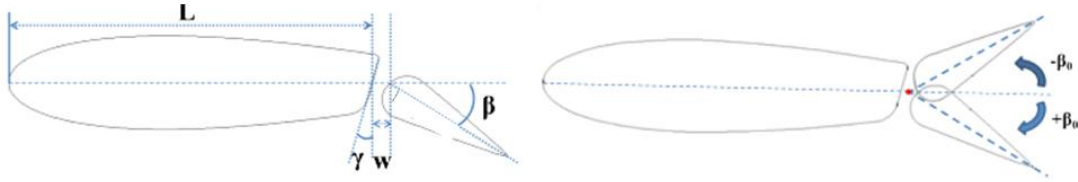
**Şekil 2.6 :** Kambur balinadan esinlenen pasif kontrol geometrisi (Favier ve diğ, 2012).

### 2.2.2 Kanat etrafında aktif akış kontrolü uygulamaları

Aktif akış kontrol yöntemleri pasif yöntemlerden farklı olarak enerji beslemeli olarak çalışırlar. Aktif sistemlerde akış ortamındaki şartların değişimine bağlı olarak tepki veren açık veya kapalı çevrimli bir kontrol mekanizması bulunmaktadır. Sistemde

bulunan aktüatör, duruma göre istenen çalışma konumuna, frekansına ya da enerji yoğunluğuna getirilerek kontrol edilmektedir. Literatürde gerçekleştirilen aktif akış kontrol çalışmaları içerisinde de genellikle bu parametrelerin en uygun şekilde belirlenmesi inceleme konusu olmaktadır.

Xiao ve diğ. (2013) tarafından hazırlanan çalışma, literatürdeki kanat üzeri aktif akış kontrolü uygulamalarına bir örnek olarak gösterilebilir. Burada dikey eksenli gelgit türbinlerinde kullanılacak kanadın firar kenarı üzerine salınımlı kanatçık yapısı eklenmiş ve bu kanatçığın boyutlarına ait bazı parametrelerin değişimine göre türbin güç katsayısındaki değişim incelenmiştir (Şekil 2.7). Bahsedilen çalışmalar HAD analizleriyle gerçekleştirilmiştir. İnceleme sonucunda en uygun kanatçık geometrisi belirlenmiş ve aktif akış kontrolünün türbinin güç katsayısını arttırdığı tespit edilmiştir. Bu artışın temel sebebi olarak kullanılan kontrol yönteminin kanat üzerindeki akış ayrılmasını engellediği ve girdap oluşumlarını kontrol ettiği söylenebilir.



**Şekil 2.7 :** Firar kenarı üzerine eklenen salınımlı kanatçık yapısı (Xiao ve diğ, 2013).

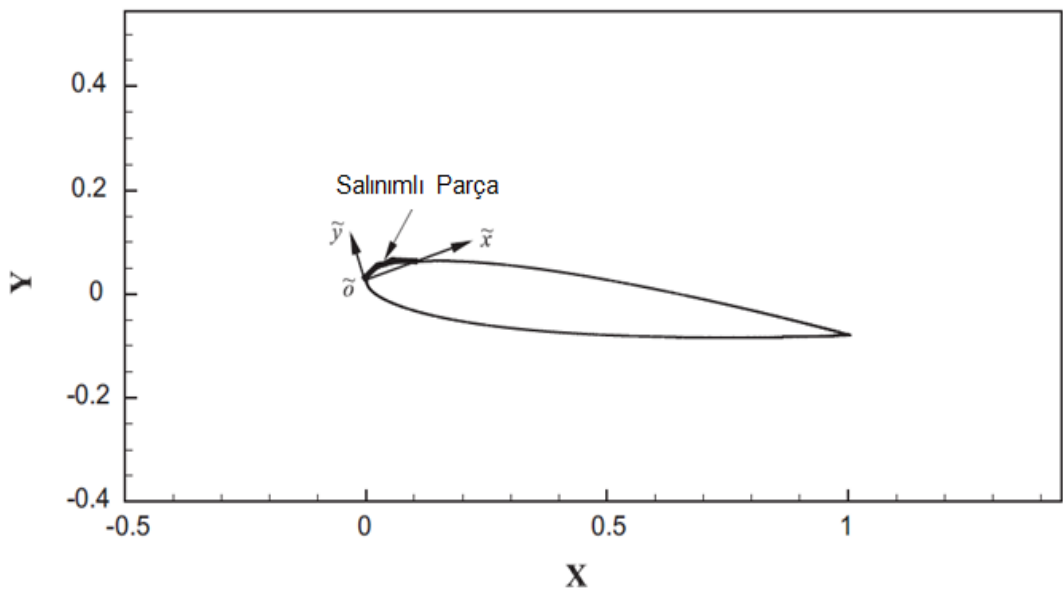
Aktif akış kontrol uygulamalarında son yıllarda oldukça yoğun şekilde çalışılan bir diğer yöntem de plazma aktüatörlerdir. Bu konuda yapılan çalışmalardan biri de Benard ve diğ. (2009) tarafından NACA0015 hücum kenarı üzerine yerleştirilen Dielektrik Bariyer Deşarjı (DBD) ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda yapılan kuvvet ölçümleriyle birlikte kanat karakteristikleri hesaplanmış ve plazma aktüatörün etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak kullanılan kontrol yöntemi sayesinde akış ayrılması birkaç derece geciktirilmiş ve kanadın aerodinamik performansı iyileştirilmiştir.

Kanat içeren yapılar içerisinde akışın kontrol edilme amaçlarından biri de gürültünün önlenmesidir. Ai ve diğ. (2016) gerçekleştirdikleri çalışmada bu hedef doğrultusunda şekil değiştiren yapılar kullanarak aktif akış kontrol uygulaması geliştirmişlerdir. Hem NACA0012 gibi basit yapılı, hem de 30P30N gibi çok elemanlı kanat profilleri üzerinde, kontrol elemanları geometrilerinin modifiye edilmesiyle birlikte sayısal

analizler ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda kanatlara ait kuvvet karakteristikleri çıkarılmış, iz bölgesine ait akış hızları ölçülmüş ve gürültü karakteristikleri elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmıştır.

Seifert ve diğ. (1998) aktif akış kontrolünde piezoelektrik aktüatör kullanımına örnek gösterilebilecek bir çalışma ortaya koymuşlardır. Gerçekleştirdikleri deneylerde kanat üzerine yerleştirdikleri aktüatörü 2B ve 3B olarak iki farklı modda çalıştırarak kanadın aerodinamik karakteristiklerinin değişimini gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak 2B aktüatör kullanımı, kuvvet karakteristiklerinde en yüksek artışı sağlamış; bununla birlikte 3B aktüatör ile yapılan iyileştirmelerde enerji verimliliğinin daha yüksek boyutlarda olduğu görülmüştür.

Literatürde bulunan başka bir çalışmada Kang ve diğ. (2015) kanadın hücum kenarında bir salınım hareketi ile akışı kontrol etmeyi düşünmüş ve bununla ilgili sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Salınlı parçanın kanat üzerindeki yerleşimi Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Düşük Reynolds sayıları için gerçekleştirilen analizlerde salınımın frekans ve genlik değerlerinde yapılan değişikliklerle analizler tekrarlanmış ve ortaya çıkan sonuçlar irdelenmiştir. Buna göre frekans ve genlik değerlerindeki büyümenin kanadın taşıma katsayısını ve kanat üzeri basınç dağılımını iyileştirdiği gözlenmiştir. Bununla birlikte genlik değerinin enerji verimliliği açısından en uygun değeri de tespit edilmiştir.



**Şekil 2.8 :** Kanat üzerindeki salınlı parçanın yerleşimi (Kang ve diğ, 2015).

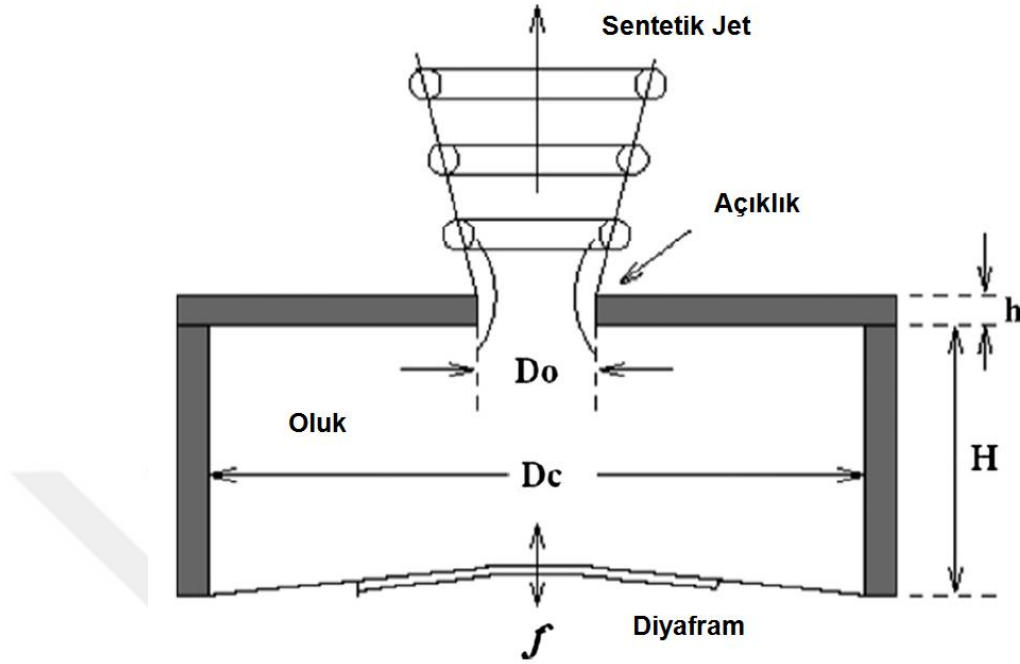
Aktif akış kontrol yöntemleri içerisinde en sık şekilde kullanılan yöntemler arasında bulunan jet aktüatör uygulamaları ile ilgili literatür çalışmaları ise sonraki bölümde detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

### **2.3 Jet Aktüatörle Aktif Akış Kontrolü**

Aktif akış kontrol uygulamalarında kullanılan aktüatör tiplerinden bazılarının kullanımı hakkında önceki bölümde bilgi verilmişti. Bu bölümde ise bu aktüatörler arasında sıklıkla kullanılmakta olan jet aktüatörler üzerine gidilecek ve literatürdeki çeşitli örnekler üzerinden detaylı olarak inceleme yapılacaktır. Ama öncelikle jet aktüatörün tanımı üzerine biraz bilgi verilmelidir. Cattafesta ve Sheplak (2011), burada jet aktüatörler olarak isimlendirilecek olan aktüatör grubunu "fluidic" olarak isimlendirmişler ve ortama akışı basan veya ortamdan akışı emen (veya her ikisini de yapan) hareketli sistemler olarak tanımlamışlardır. Bununla birlikte jet aktüatörleri de dış ortamla arasında bir kütle alışverişi olup olmamasına göre ikiye ayırmışlardır. Bunlardan sentetik jet ismiyle anılan ilk grupta akış ortamına dış kaynaklı bir kütle giriş çıkışı olmamaktadır. Sistemdeki aktüatörün hareketi ile birlikte belirli bir miktar akışkan sürekli olarak sisteme basılıp emilmektedir. Diğer taraftan ikinci grup olan kütle debili jet aktüatörlerde ise kontrol sisteminin dış ortamla arasında bir kütle geçişi bulunmaktadır. Burada aktüatörün devamlı olarak sisteme akışkan bastığı ya da emdiği söz konusu olabileceği gibi, akışkanın çeşitli aralıklarla emme-basma işlemlerini yapabilmesi de mümkündür.

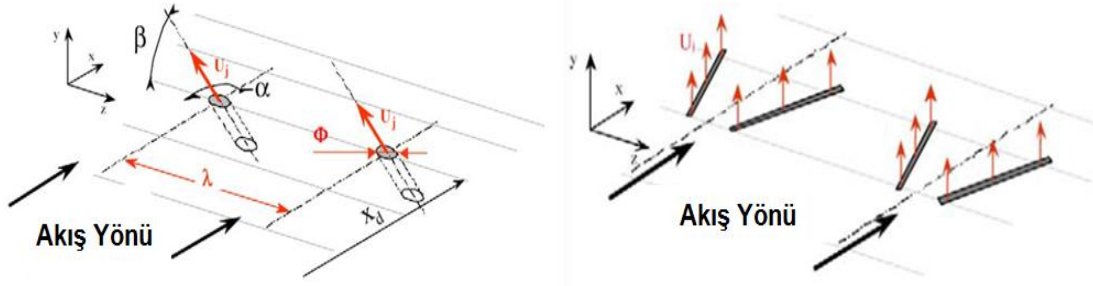
Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde jet aktüatörlerin birçok farklı kullanım amacı olmakla birlikte genellikle akış ayrılmasını engellemek veya geciktirmek gibi bir amaçla kullanıldığı görülmektedir. Bu amaç dahilinde kanadın daha yüksek hücum açılarında ulaşabilmesi ve taşıma katsayısının daha yüksek değerlere çıkarılabilmesi de mümkün olmaktadır. Tang ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışma da bahsedilen duruma örnek olarak gösterilebilir (Şekil 2.9). Burada deneysel çalışmalar için tasarlanan sentetik jet aktüatörlerin kanat içerisine yerleştirilerek kanat üzerindeki yarıklardan akış ortamını etkilemeleri amaçlanmıştır. Bu doğrultuda frekans gibi çeşitli parametrelerin değiştirilmesiyle birlikte ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen verilere göre kanadın taşıma karakteristiğinde %27,4'lük bir artış, sürüklenme karakteristiğinde ise %19,3'lük bir azalma görülmüş ve kanadın tutunma kaybı durumuna düştüğü hücum açısı yaklaşık 4 derece

geciktirilmiştir. Ayrıca deneylerde aktüatöre ait güç tüketimi de tespit edilmiş ve bu değerler oldukça düşük olduğu vurgulanmıştır.



**Şekil 2.9 :** Piezoelektrik tahrik sistemine sahip sentetik jet aktüatörü (Tang ve diğ., 2014).

Godard ve diğ. (2006) tarafından yapılan çalışmalarda jet aktüatörün farklı kullanım şekilleri incelenmiştir (Şekil 2.10). Gerçekleştirdikleri deneylerde kanat içerisine yerleştirilen jet aktüatörlerin kanat üzeri çıkışlarını ilk önce çizgi şeklindeki yarıklardan, daha sonra ise dairesel deliklerden vermişlerdir. Bununla birlikte aktüatörleri kesintisiz/sürekli ve kesintili şekillerde çalıştırarak aralarındaki farkı incelemişlerdir. Ayrıca aktüatörlerin boyut ve yerleşimine dair ölçülendirmelerde çeşitli parametreler belirleyerek bu parametrelerin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Diğer taraftan bu alandaki bir diğer deneysel çalışma da Tuck ve Soria (2004) tarafından yapılmıştır. Kullandıkları sentetik jet aktüatör, NACA0015 kanat profilinin tam önüne açılan 2B yarık geometrisi üzerinden akış ortamına etki etmektedir. PIV ve akış görüntüleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde jet aktüatörün akışa olan olumlu etkileri tespit edilmiştir. Buna göre başta akış ayrılmasının geciktirilmesi olmak üzere kanadın taşıma katsayısındaki artışlarda da ciddi gelişmeler görülmüştür. Kanadın akış ayrılması kaynaklı tutunma kaybı durumunun yüksek hücum açılarında ertelenmesi ise dumanla akış görüntüleme ile gösterilmiştir.



**Şekil 2.10** : Jet aktüatör çıkışı için iki farklı tasarımın gösterimi (Godard ve diğ., 2006).

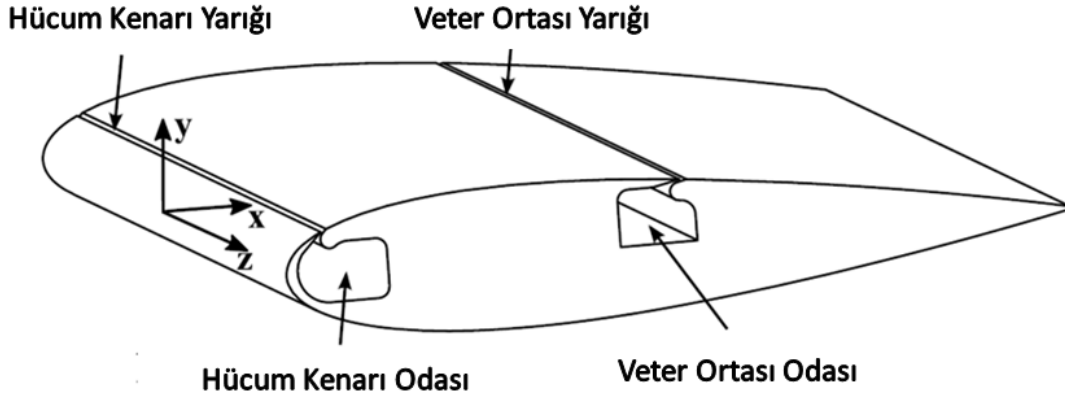
Jet aktüatörler üzerinde yapılan incelemelerden biri de jet çıkışındaki akışkan hareketinin zamana göre değişimidir. Jet aktüatörün kanat üzerinde oluşturduğu emme ve basma işlemlerinin sürekli veya aralıklı olarak yapılması akış üzerinde farklı sonuçlara neden olmaktadır. Chapin ve Benard (2015) yapmış oldukları aktif akış kontrol uygulamasında jet aktüatörleri bu açıdan kıyaslamışlardır. Buna göre aktüatör çıkışına sürekli aynı debiyi basan sürekli jet, sinüzoidal şekilde hıza sahip akış oluşturan sentetik jet ve değişmeli olarak aynı hızda akışı emme-basma şeklinde basan darbeli jet olmak üzere 3 farklı tipte jet aktüatör incelenmiştir. Aktüatörlerin akış karakteristikleri ise olabildiğince eşit olacak şekilde belirlenmiştir. Sonuç olarak belirlenen durum içerisinde taşıma katsayısının geliştirilmesi açısından yapılan incelemelerde sürekli jetin en iyi sonucu verdiği ortaya çıkmıştır. Sentetik jet ise darbeli jet ile yakın sonuçlara sahip olmakla birlikte biraz daha üstün gözükmemektedir. Giorgi ve diğ. (2015) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise yine benzer bir şekilde sürekli jet ile sentetik jet arasındaki farklar incelenmiştir. Çalışmalar hem deneysel olarak hem de iki ve üç boyutlu sayısal analizler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar çeşitli yönlerden incelenmiş olup aradaki farklar gösterilmişse de, her iki yöntem arasında kanadın taşıma performansına getirdikleri katkı yönünden ciddi bir fark gözükmemektedir.

Kanat üzerindeki jet aktüatörlü aktif akış kontrol uygulamaları literatürde tek bir yarık çıkışından yapıldığı gibi iki veya daha fazla yarık çıkışından da yapılmaktadır. Bunlardan biri Genç ve diğ. (2011) tarafından yapılan çalışmadır. Bu çalışmada akış kontrolsüz kanat profili hem deneysel hem sayısal olarak, jet aktüatöre sahip profiller ise yalnızca sayısal olarak analiz edilmiştir. Tek bir hücum açısı için yapılan çalışmalarda jet aktüatör ile ilgili birçok parametrenin değişimi ve çeşitli türbülans modellerinin sonucu tespit edebilme yeteneği incelenmiştir. Çalışmada ayrıca tek jet

aktüatör kullanımı haricinde kanat üzerinde iki farklı noktaya jet aktüatör koyularak bir taraftan emme bir taraftan da basma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak k-k<sub>1</sub>-w geçiş türbülans modeliyle gerçekleştirilen HAD analizlerinin kanat üzerindeki akış ayrılmasının konumunu başarıyla tespit ettiği gözlenmiştir. Dahası iki jet çıkışı kullanılan durumun tek jet kullanılan duruma göre üstünlüğü belirtilmiş ve jet hızının serbest akış hızına olan oranı ile jet çıkış açısının değişiminin kanat performansına olan etkisi gösterilmiştir. Diğer taraftan Kim ve Kim (2009) tarafından yapılan çalışmada ise birçok farklı durumun incelenmesinin yanı sıra jet aktüatörün birden fazla sayıda ve farklı konumlarda olması durumu da değerlendirilmiştir. Akışı kontrol edebilmek için tek bir sentetik jet kullanımı halinde gerekli olan jet hızını azaltabilmek için iki sentetik jet kullanımına gidilmiş ve bu kullanımın kanat performansına olan etkisinin olumlu olduğu görülmüştür.

Aktif akış kontrol sistemlerinin bulunduğu uygulamalarda kontrol sistemlerinin sürekli olarak çalıştırılmaları istenmez. Bununla birlikte jet aktüatör uygulamalarında normalde kanat profili üzerinde olmayan yarıklar veya çıkıntılar oluşturulması gerekir. Jet aktüatörün kullanımı için gerekli olan bu tasarım revizyonları, bazen akışı etkilemeyecek kadar küçük boyutta olurken bazen de akışı ciddi şekilde etkileyecek boyutlarda olabilmektedir. Müller-Vahl ve Greenblatt (2015) gerçekleştirdikleri çalışmada iki yarıklı tasarımın pasif koşullarda akışı ne kadar etkilediğini incelemiştir (Şekil 2.11). Çalışmanın temel amacı, sürekli emme veya sürekli basma yapan jet aktüatör kullanımının iki farklı konum için kıyaslanması olsa da pasif durumla ilgili olarak geniş bir inceleme yapılmıştır. Buna göre yarıklı profilin temiz profile göre taşıma katsayılarındaki değişim grafiklerle gösterilmiştir. Bununla birlikte jet çıkışının kanadın ön bölgesinde ve orta bölgesinde kullanılma durumu da incelenmiş ve bu iki kullanım arasında önemli farklar olduğu çeşitli katsayıların değişimi üzerinden gösterilmiştir. Bir diğer uygulamada ise Xu ve diğ. (2015) tarafından hazırlanan jet aktüatör tasarımının kanat geometrisini ciddi oranda değiştirdiği söylenebilir. Bu çalışmada S809 kanat profilinin vakum kenarı üzerinde ön ve arka kısma iki adet jet aktüatör çıkışı eklenmiştir. Jet çıkışlarının yüzeye paralel olması istendiğinden kanat geometrisi belli oranda revize edilmiştir. Burada yapılması planlanan aktif kontrol yöntemi, kanat üzerindeki akış ayrılmasının geciktirilmesini hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda kanadın ön tarafındaki jet çıkışından sürekli basma, arka tarafındaki jet çıkışından da sürekli emme

yapılmaktadır. Sonuç olarak kanadın kontrollü durumunda kontrolsüz duruma göre taşıma katsayısının büyük oranda arttığı, sürüklenme katsayısının azaldığı ve akış ayrılmasının daha yüksek hücum açılarında ertelendiği görülmektedir.

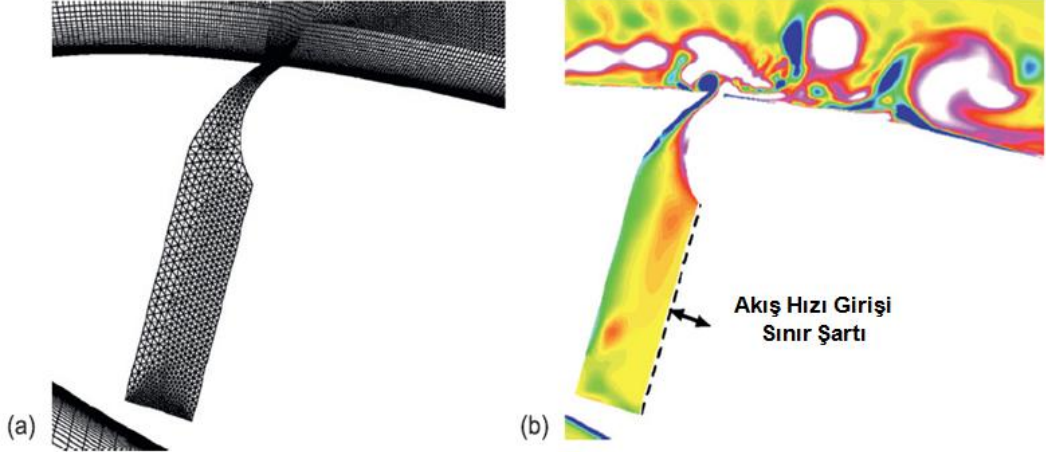


**Şekil 2.11** : Kanat üzerinde iki farklı konumda jet aktüatör kullanımı (Müller-Vahl ve Greenblatt, 2015).

Gilarranz ve diğ. (2005) gerçekleştirmiş oldukları sentetik jet aktüatör uygulamasını iki bölüm içerisinde sunmuşlardır. İlk bölümde kanat içerisine yerleştirilecek pistonlu jet aktüatör mekanizmasının tasarımından bahsedilmiş; aktüatör frekansının ve yarık çıkışı genişliğinin jet çıkışındaki akışa olan etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak sistem içerisinde kullanılan motorun daha verimli bir şekilde çalıştırılabilmesi adına, akışın sıkıştırılabilirlik etkilerinin azaldığı aralıklarda tasarım parametreleri belirlenmiştir. Çalışmalarının ikinci kısmında ise tasarlanan jet aktüatörün NACA0015 kanat profili içerisine, kanadın da rüzgar tüneli içerisine yerleşimi yapılarak belirlenen  $Re=8,96 \times 10^5$  değerine göre deneyler gerçekleştirilmiştir. Akış kontrollü kanatlarda frekansın değiştirilmesine paralel olarak jet çıkış hızı oranı ile momentum katsayısı da değişmiş ve ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir. Buna göre jet aktüatörün kullanılması kanat performansını büyük ölçüde geliştirmiştir. Bununla birlikte aktüatör frekansının denendiği aralık boyunca frekanstaki artışlar akışı olumlu yönde etkilemiştir. Ancak bu etkinin boyutunun çok yüksek olmadığı görülmektedir. Deneysel olarak gerçekleştirilen bu çalışmanın sayısal olarak analiz edilmesi You ve Moin (2008) tarafından yapılmıştır (Şekil 2.12).  $16,6^\circ$ lik hücum açısı için kontrolsüz ve 120 Hz frekansa sahip kontrollü kanat üzerinde 3B ağ yapısı kurularak LES modeli ile sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Burada analiz süresini azaltmak adına hareketli ağ yapısı oluşturmak yerine jet aktüatörün tanımlanması için piston üzerine sinüzoidal hız girişine sahip bir sınır şartı verilmiştir. Bununla



birlikte HAD analizleri, ağ yapısı elemanlarının farklı sayıda olması durumu için tekrarlanmış ve elde edilen değerler deneylerdeki birçok ölçüm değeri ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak HAD analizlerinin deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.



**Şekil 2.12 :** You ve Moin (2008) tarafından gerçekleştirilen HAD analizine ait ağ yapısı (a) ve analizin herhangi bir anına ait hız dağılımları (b).



### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1 Deney Düzeneklerinin Oluşturulması

Tez kapsamında incelenen jet aktüatörlü aktif akış kontrol yönteminin deneysel olarak irdelenmesi amacıyla bir deney düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir. İlk etapta, tez içerisinde incelenmesi planlanan tek yarık ve çift yarık jet aktüatörlü kontrol yöntemine sahip modeller ile kontrolsüz modelin deneysel çalışmalarının yapılması planlanmışsa da; tek yarık ve çift yarık jet aktüatöre sahip modeller arasında yarık çıkış hızı değeri eşit bir şekilde elde edilememiştir. Bundan dolayı yalnızca çift yarık jet aktüatöre sahip akış kontrollü kanat modeli ile akış kontrolsüz kanat modelinin deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Deneylein yapıldığı İTÜ Uçak ve Uzay Fakültesi Trisonik Araştırma Laboratuvarı'ndaki 80x80 cm'lik ses altı rüzgar tünelinin boyutları ve çalışma sınırları ile deneylerde kullanılacak çeşitli sensörlerin çalışma aralıkları deney düzeneğinin boyutlarının belirlenmesinde etkili olmuştur. Bununla birlikte model içerisindeki aktif akış kontrol sisteminde kullanılan DC motorun model içerisine sığabilecek hacimde olması, istenen tork değerini sağlaması, enkodere sahip olması ve kolay bir şekilde temin edilebilmesi gibi gereklilikler de ürün seçiminde ve modelin çeşitli parametrelerinin belirlenmesindeki önemli etkenlerden olmuştur.

Çalışmaların yapıldığı rüzgar tüneli, Şekil 3.1'de görüldüğü üzere Eiffel tipi açık deney odalı bir rüzgar tüneli olup test edilecek modellerin yerleştirilebildiği geniş bir odaya sahiptir. Bu odanın karşılıklı iki yanında bulunan 80x80 cm'lik kesitten deney odasına akış girişi ve çıkışı yapılmaktadır. Tünelin sahip olduğu bu yapı sayesinde test odasına ait ölçüler, incelenmesi planlanan modelin sınırlarına göre değiştirilebilmektedir. Bu esneklik sayesinde, tez kapsamında tasarlanan modelin boyutlarının belirlenmesi sırasında ortaya çıkan zorlukların büyük kısmı ortadan kaldırılmıştır. Buna göre, tasarlanan modelin bir taraftan içerisine yerleştirilecek akış kontrol sisteminin sığabileceği şekilde bir büyüklüğe sahip olması gerekirken bir taraftan da tünel içerisinde kaplayacağı alandan dolayı ortaya çıkacak blokaj

faktöründe de %10'luk oranı geçmemesi istenmektedir. Bu sebeple test odasında akışın geçmesi planlanan kesite ait ölçüler, oda içerisindeki blokaj faktörünün uygun değerlerde tutulabilmesi için tünel giriş çıkışındaki kesit ölçülerinden biraz daha geniş tutulmuştur.



**Şekil 3.1 :** Deney çalışmalarında kullanılan rüzgar tüneli.

Yapılan deneyler iki boyutlu şartlara sahip olacak şekilde planlanmıştır. Bunu sağlayabilmek amacıyla modelin alt ve üst yüzeyleri, akışı bozmayacak geniş yüzeylere sahip pleksi plakalara dayatılarak sabitlenmiştir. Bununla birlikte modelin kanat uzunluğunun veter uzunluğuna oranının da olabildiğince yüksek olması hedeflenmiş ve böylece kenar etkilerinin azaltılmasına çalışılmıştır.

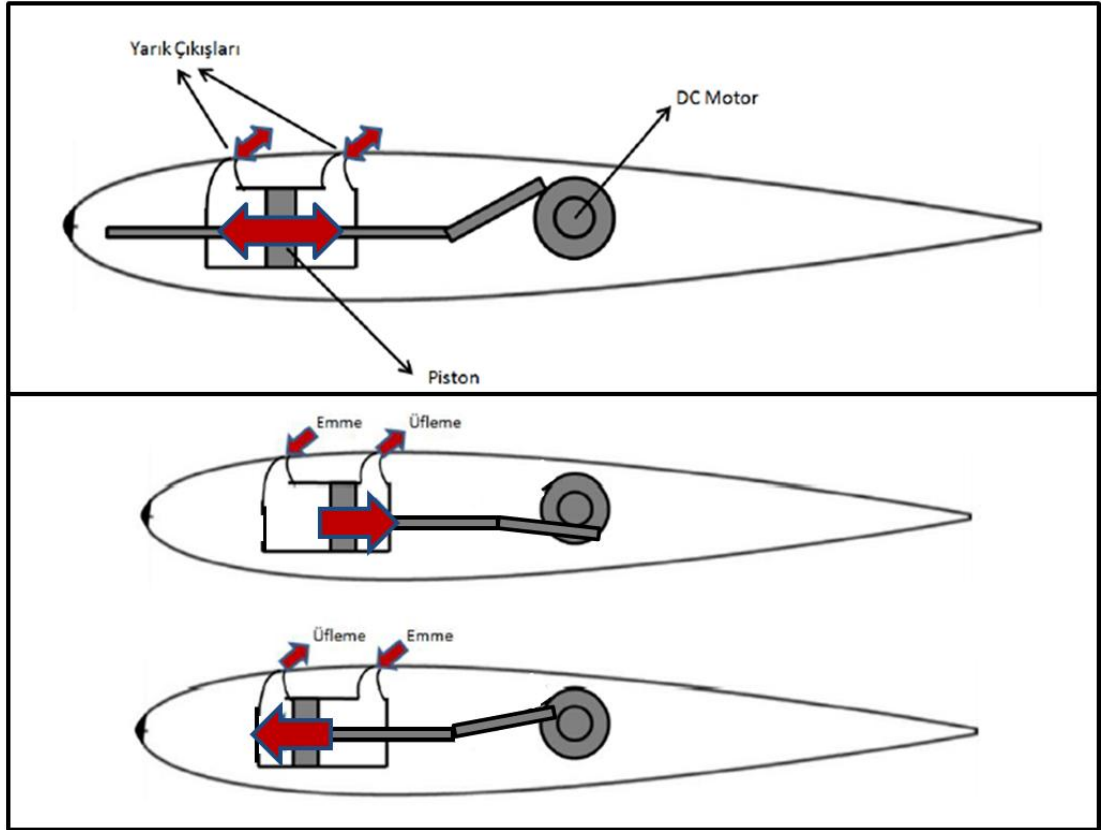
Deney düzeneğinin tasarımında önemli etkisi olan diğer bir parametre de yarı çıkış hızı ile serbest akış hızı arasındaki orandır. Literatürdeki çalışmalara göre bu oranın akış kontrolüne olan olumlu etkisinin görüldüğü değer aralığı belirlenmiş ve bu değer aralığının sağlanabilmesi adına jet aktüatörün piston ve strok mesafesi ile yarı çıkış kanal genişliği gerekli ölçülerde tasarlanmıştır. Dahası akışın deney odasına giriş hızının belirlenmesinde de bu oran göz önüne alınmıştır.

Deney düzeneğinin, özellikle de kanatların, üretiminde 3B yazıcı kullanılmıştır. PLA malzeme ile üretilen bu parçaların haricindeki parçalar ise hazır temin edilen alüminyum profiller ve çelik bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Tünel odası

içerisindeki sınırları oluşturan yüzeyler için ise 10 mm kalınlığa sahip pleksi malzeme tercih edilmiştir.

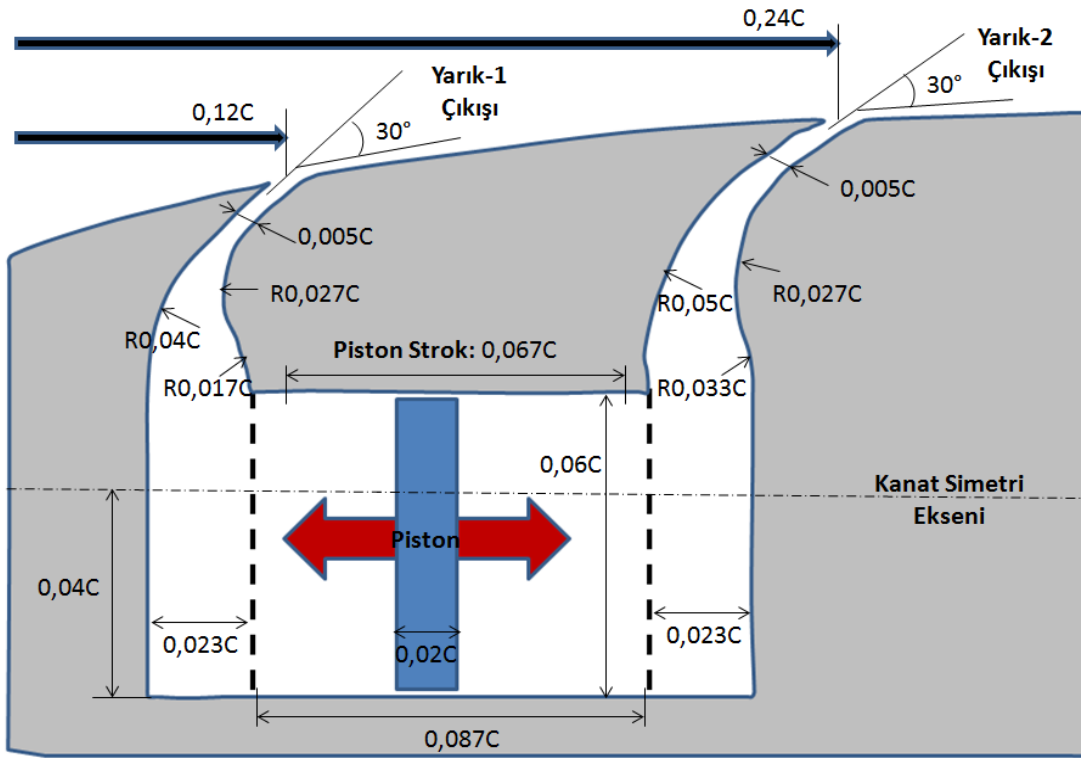
### 3.1.1 Kanat içerisindeki jet aktüatör düzeneğinin tasarımı ve üretimi

Deney düzeneği iki ana bölüme ayrıldığında bunlardan biri kanat üzerindeki akış kontrolünü sağlayan jet aktüatör sistemi, diğeri ise rüzgar tüneli içerisine istenen hücum açıları verebilecek şekilde yerleştirilen rüzgar tüneli sistemidir. Bunlardan jet aktüatör sistemine ait şematik görüntü Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Burada tek bir pistonun hareketiyle iki yarık çıkışından koordineli şekilde emme-basma yapıldığı görülebilmektedir. Motorun dönmesi sırasında pistonun sola doğru hareketi ile birlikte ön taraftaki yarıktaki akışın dışarı atıldığı bir basma hareketi oluşurken, arka taraftaki yarıktaki akışın tersine içeri alınmasıyla birlikte bir emme hareketi oluşmaktadır. Diğer taraftan pistonun sağa doğru hareketi sırasında ön yarıktaki emme, arkadaki yarıktaki ise basma hareketi gözlenmektedir. Bunun tek bir piston ile gerçekleştirilmesi sayesinde bu ikili hareket sistemi (emme-basma) koordineli bir şekilde sürmektedir. Böylece tek yarık çıkışlı jet aktüatöre sahip akış kontrol sistemine göre farklı bir tasarım geometrisi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.2 : İki yarıkli jet aktüatör sisteminin şematik gösterimi.

Jet aktüatör düzeneğinin yerleştirildiği kanat profilinin NACA0015 olarak seçimi, Gilarranz ve diğ. (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmaya referansla belirlenmiştir. Bununla birlikte tasarlanan çift yarıkli kontrol sistemi, düzeneğe üzerine eklenen ikinci yarık çıkışının aynı pistonun diğere yüzey hareketinin oluşturduğu akış sistemine bağlanmasıyla birlikte kendine özgü bir tasarıma sahip olmuştur. Tasarlanan çift yarıkli jet aktüatör sistemine ait ölçülerin belirlenmesinde literatür çalışmalarıyla birlikte üretilecek deney düzeneği sisteminin sınırları da etkili olmuştur. Şekil 3.3'te tasarlanan jet aktüatörlü kontrol sistemine ait uzunluk değerleri kanat veter uzunluğuna bağlı olarak verilmiştir. Burada veter uzunluğu (C) 0,34 m olarak belirlenmiştir. Bu değerin belirlenmesinde; üretim sürecinin kısaltılması adına modelin hacminin düşürülmesi, kenarlardan gelebilecek 3B etkilerin azaltılması ve ilk etapta kullanılması planlanan, ancak çeşitli sebeplerle kullanılmayan, kuvvet sensörünün taşıma sınırları temel faktörler olarak gösterilebilir.



**Şekil 3.3 :** Tasarlanan iki yarıkli jet aktüatör sistemine ait ölçülerin gösterimi.

Literatürdeki jet aktüatörlü akış kontrol çalışmaları incelendiğinde, kanat üzerindeki yarığın konumunun ve normalde yaptığı açının sonucu ciddi şekilde değiştiren önemli parametrelerden olduğu anlaşılmaktadır (Huang ve diğ, 2004). Bununla birlikte, tez kapsamında bu parametrelerin incelenmesinin tezin sınırlarını çok fazla genişleteceği düşünüldüğü için yarık konumlarının ve çıkış açılarının sabit tutulmasına karar

verilmiştir. Kanadın üzerindeki ilk yarığın konumu, Gilarranz ve diğ. (2005) tarafından kullanılan modelin yarık konumu olan 0,12C olarak, yarık çıkış açıları da 30° olarak belirlenmiştir. İkinci yarığın konumunun belirlenmesinde ise tasarımdaki mekanik kısıtlar önemli bir etken olmuştur. Bununla birlikte Guoqing ve diğ. (2016) tarafından yapılan deneysel çalışmadaki jet konumlarının akışa olan etkisi de göz önüne alınarak ikinci yarık için 0,24C değeri belirlenmiştir.

Kontrol sisteminde kullanılan pistonun ait ölçüler akışa ait temel parametrelerin belirlenmesinde çok önemlidir. Jet aktüatörün yarık çıkış hızının tünel akış hızına oranı, serbest akışın Re değeri ve aktüatör frekansının değeri piston ölçülerine bağlı olarak şekillenmektedir. Yani bahsedilen parametrelerin ayarlanması için pistonun ait ölçülerin değiştirilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte sistemin mekanik kısıtları piston ölçülerinin belirlenmesini bir sınır şartı olarak etkilemektedir. Tasarımdaki alan darlığından dolayı pistonun uzunluğu ve strok mesafesi sınırlandırılmaktadır. Özellikle iki yarık arası mesafenin getirdiği kısıttan dolayı ve kullanılan DC motorun hareketini sağladığı krank biyel mekanizmasının model içerisine sığdırılabilmesinin sağlanması amacıyla strok uzunluğunun 20 mm olması kararlaştırılmıştır. Pistonun yüksekliği ise yarık çıkışındaki hızı olabildiğince arttırmak için yüksek tutulmuş ve 18 mm olarak belirlenmiştir. Model içerisine yerleştirilebilecek ve kolay bir şekilde temin edilebilecek bir motor arayışı sonrasında belirlenen PL-3213 model enkoderli DC motorun sahip olduğu maksimum devir, yarık çıkış hızının belirlenmesindeki diğer bir parametre olarak hesaplara etki etmiştir. Motorun sahip olduğu en yüksek hız 2250 d/d olsa da bu değer, model içerisindeki yüklerden ve dışli sistemdeki problemlerden dolayı tam olarak kullanılamamıştır. Ancak motorun yaklaşık 1120 d/d değerinde güvenli bir çalışma elde edilmiştir. Bununla birlikte sistemdeki bir diğer önemli parametre olan yarık çıkışındaki kanal genişliği bir taraftan üretim kaynaklı sorunlardan kaçınmak adına belli bir değer üstünde tutulması istenirken, bir taraftan da yarıktaki çıkış hızını arttırabilmek adına olabildiğince küçük bir değere getirilmesi istenmektedir. Sonuç olarak her iki durumun da değerlendirilmesi ile birlikte yarık genişliğinin 1,5 mm olmasına karar verilmiştir.

Jet aktüatör ile yapılan kanat etrafındaki aktif akış kontrol uygulamaları arasında buradaki uygulamaya benzer bir uygulama olan Gilarranz ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada görüldüğü üzere, etkili bir akış kontrolü sağlayabilmek için jet yarığının maksimum çıkış hızının serbest akış hızına oranı olan  $R_{jet}$  genellikle 1

civarında tutulmaktadır. Tez kapsamında yapılacak çalışmalarda da bu sonuçtan hareketle aktüatöre ait  $R_{jet}$  değerlerinin 1 civarında tutulması ve en büyük  $R_{jet}$  değerinin 1'in üzerinde olmasına karar verilmiştir. Yapılan hesaplar ile birlikte tünelin serbest akış hızının yaklaşık 10 m/s civarında tutulması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu durumda Re sayısı da yaklaşık olarak 200000 civarında olmaktadır.

Kanada ait kritik ölçüler ile jet aktüatörü tahrik edecek motorun çalışma frekansının netleşmesi sonrasında aktif akış kontrolü uygulamasında incelenecek şartlar belirlenmiştir. Çizelge 3.1'te gösterildiği üzere jet aktüatöre ait frekans değeriyle birlikte  $A_{jet}$  hızı ile  $R_{jet}$  ve  $C_{\mu}$  gibi boyutsuz katsayılar belirtilmektedir. Burada gösterilen  $C_{\mu}$  sembolü momentum katsayısını simgelemekte ve serbest akışa oranla çalıştırılan jet aktüatörün momentum etkisini göstermektedir.  $A_{jet}$  sembolü ise jetin maksimum yarı çıkış hızını belirtmektedir. Çizelge üzerinde verilen  $A_{jet}$  ve  $R_{jet}$  değerlerinin piston sisteminde kaçak olmaması durumunda geçerli olduğu söylenebilir. Kaçak durumuna göre burada belirtilen değerler o oranda küçülecektir. Bununla birlikte çizelgede  $C_{\mu}$  şeklinde gösterilen momentum katsayısının karşılığı denklem 3.1'de gösterilmiştir.

$$C_{\mu} = \frac{h(\rho_n A_{jet}^2) \sin(\theta_j)}{c(\rho_n U_{\infty}^2)} \quad (3.1)$$

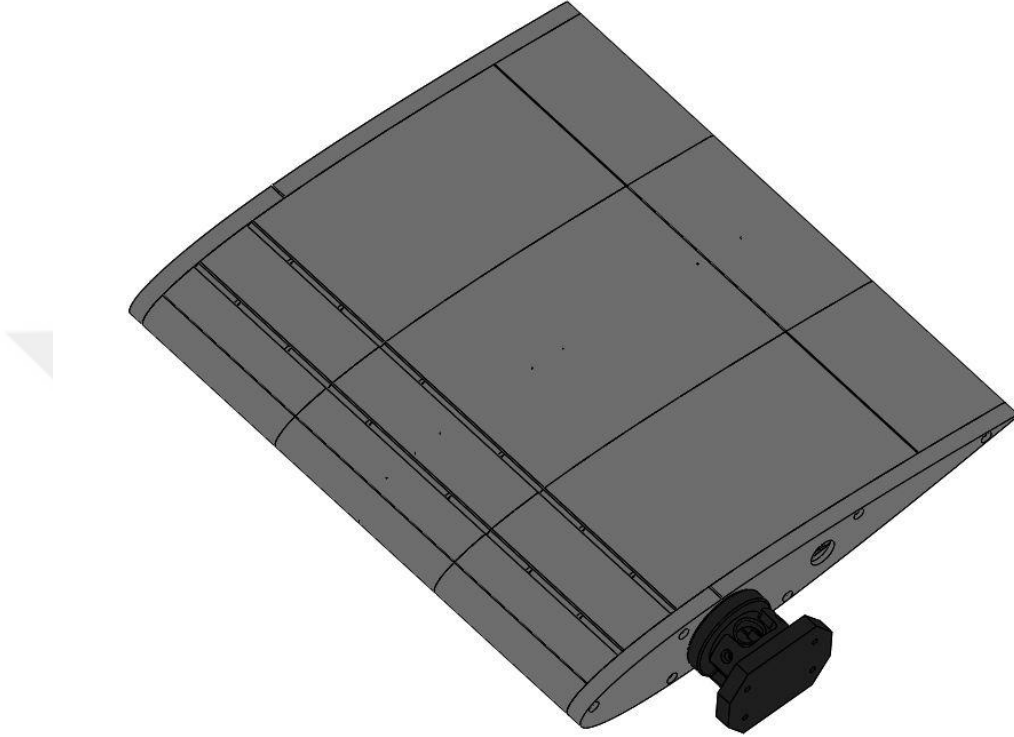
**Çizelge 3.1 :** Aktif akış kontrol uygulamasında incelenecek jet karakteristikleri.

<b>Motor Devri (d/d)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b><math>A_{jet}</math> (m/s)</b>	<b><math>R_{jet}</math></b>	<b><math>C_{\mu}</math></b>
<b>480</b>	8,00	6	0,6	0,0009
<b>800</b>	13,33	10	1,0	0,0025
<b>1120</b>	18,67	14	1,4	0,0049

Kanat için hazırlanan tasarıma ait katı model Şekil 3.4'te verilmiştir. Şekil üzerinde kanadın hücum kenarına yakın tarafındaki iki yarığın yerleşimi de gözükmemektedir. Burada yarıkların gövdeyle birleştiği kısımlarda kullanılan desteklerin akışı etkilemeyecek şekilde ince ve keskin kenarlı yapıldığı belirtilmelidir. Bununla birlikte tasarlanan kanat modelinin birden fazla parçaya bölünmesinin temel nedeninin model içerisindeki basınç prizlerinin ve hortumların yerleştirilmesinde kolaylık sağlanması olduğu söylenebilir. Ayrıca kullanılan 3B yazıcının üretim hacminden gelen kısıtlar da parçalı yapının bir diğer sebebidir.



Tasarımdaki çok parçalı yapının kendi içerisindeki montajının sağlanması için ilk etapta cıvatalı bağlantıların kullanılması düşünülmüştür. Ancak bu bağlantıların bir kısmının montajı sırasında hacim darlığı kaynaklı problemler oluşması nedeniyle, bazı parçaların birbirlerine yapıştırıcı ile bağlanmasına karar verilmiştir.

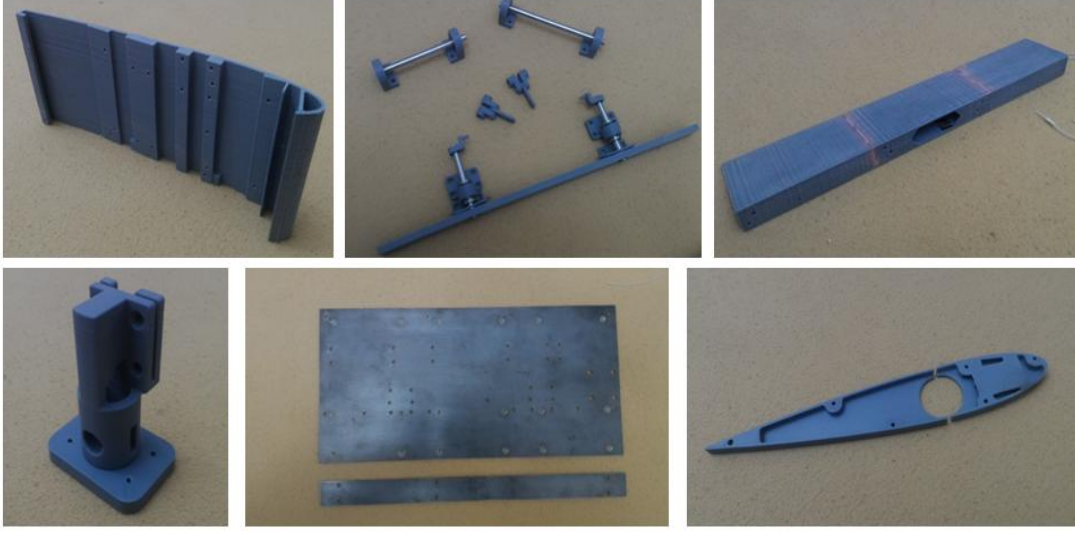


**Şekil 3.4 :** Kanat tasarımına ait katı modelin gösterimi.

Tasarlanan modelin temel parçalarının üretilmesi sırasında 3B yazıcı ve PLA malzeme kullanılmıştır. Hem ekonomik olarak daha uygun bir yöntem olması, hem model içerisindeki zorlu geometrilerin bu yöntemle kolaylıkla çıkarılabilmesi, hem de tasarımda oluşabilecek değişikliklere sonradan müdahaleye kolaylık sağlaması nedeniyle diğer üretim yöntemlerine kıyasla bu yöntem tercih edilmiştir. Bununla birlikte kullanılan 3B yazıcının yalnızca plastik türevi parçalar basabiliyor olması sistemin rijitliği ve dayanımı üzerinde olumsuz bir etki oluşturmuştur. Bu olumsuz etkiyi giderebilmek adına parçaların et kalınlığı 2 mm'nin üzerinde tutulmuş ve tasarım içerisindeki desteklerin sayısı arttırılmıştır.

Şekil 3.5'te kanat profiline ait alt parçalar gösterilmektedir. Montaj sırasında kolaylık sağlanması için profilin birden fazla parçaya ayrılması gerekmektedir. Bununla birlikte yazıcının üretim alanı boyutlarına ait kısıtların da etkisiyle kanat profili 3 ana parçaya ayrılmıştır. Ayrıca gerekli kanat uzunluğunun sağlanabilmesi için bu

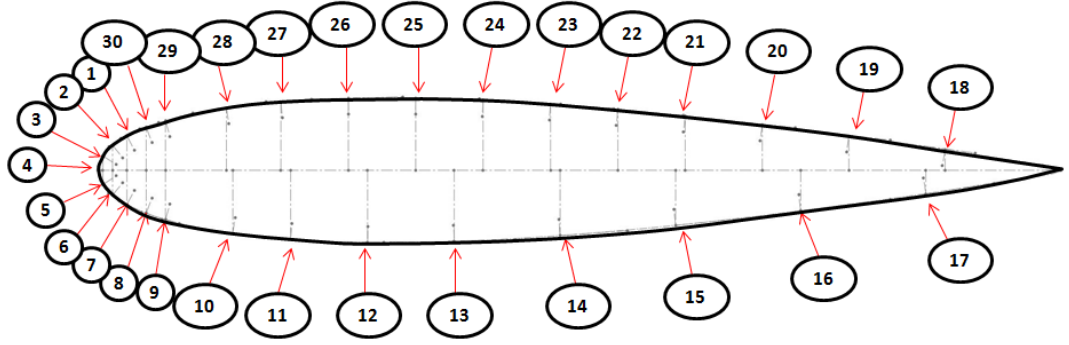
parçaların 3 sıra boyunca dizilmesi gerekmiş ve böylece toplamda 9 farklı parça ile kanadın dış yüzeyinin oluşturulması tamamlanmıştır.



**Şekil 3.5 :** Kanat profili için üretilen alt parçalar.

Kanat içerisindeki jet aktuatör sistemini oluşturan diğer parçaların büyük bir kısmı yine 3B yazıcıdan üretilmiştir. Bunların haricinde hazır temin edilen indüksiyonlu mil, rulman, segman ve civata gibi bağlantı elemanları da tasarımın içerisinde bulunmaktadır. Sistemi bir arada tutması adına şasi olarak 4 mm kalınlığında çelik sac kullanılmıştır. Jet aktuatörün hareket sistemiyle birlikte kanat profillerinin montajı lazerle kesilip delinen bu sac üzerine yapılmıştır. Pistonun yataklaması için alt yüzeydeki sac ile birlikte üst yüzeye de bir sac eklenmiştir. Bu sac üst kanat profili üzerine monte edilmiştir. Pistonun her iki yüzeyle arasında 0,1-0,2 mm arasında bir boşluk bulunmaktadır. Buradaki yüzeyler üzerine gres yağı sürülmüş ve böylece hareket sırasındaki sürtünme kuvvetlerinin azaltılması amaçlanmıştır.

Deneylerde ölçülmesi hedeflenen kanat üzerindeki basınç dağılımının elde edilebilmesi için yüzey üzerindeki konumları belirlenmiş deliklere basınç prizleri yerleştirilmiştir. Basınç prizleri basınç dağılımının çok değişken olduğu noktalarda daha yoğun olacak şekilde NACA0015 profili etrafındaki 30 nokta üzerinde konumlandırılmıştır. Bu noktalara ait görsel ve sayısal veriler Şekil 3.6 ile Çizelge 3.2 üzerinde gösterilmiştir. Buna göre yarıkların olduğu bölgede ve çıkışa yakın bölgelerde mekanik kısıtlardan dolayı basınç prizleri yerleştirilememiştir. Ayrıca 14 numaralı basınç prizinden sağlıklı veri alınamadığı için buradan gelen veriler kullanılamamıştır.



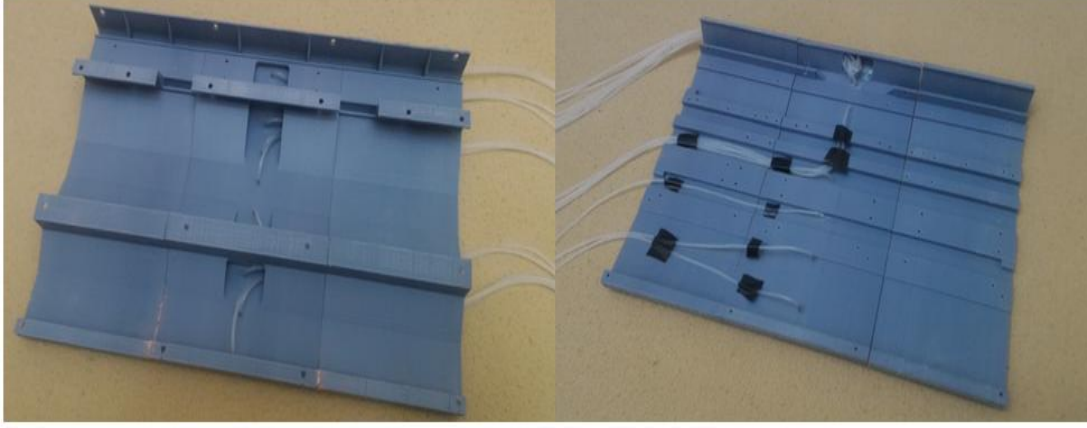
Şekil 3.6 : Kanat üzerinde bulunan basınç prizleri konumlarının şematik gösterimi.

Çizelge 3.2 : Basınç prizlerinin kanat üzerindeki konumları.

Basınç Kenarı	x/C	Vakum Kenarı	x/C
4	0.000	3	0.050
5	0.005	2	0.015
6	0.015	1	0.030
7	0.030	30	0.050
8	0.050	29	0.070
9	0.070	28	0.133
10	0.140	27	0.190
11	0.200	26	0.260
12	0.280	25	0.330
13	0.370	24	0.400
14*	0.480	23	0.470
15	0.600	22	0.540
16	0.730	21	0.610
17	0.860	20	0.690
		19	0.780
		18	0.880

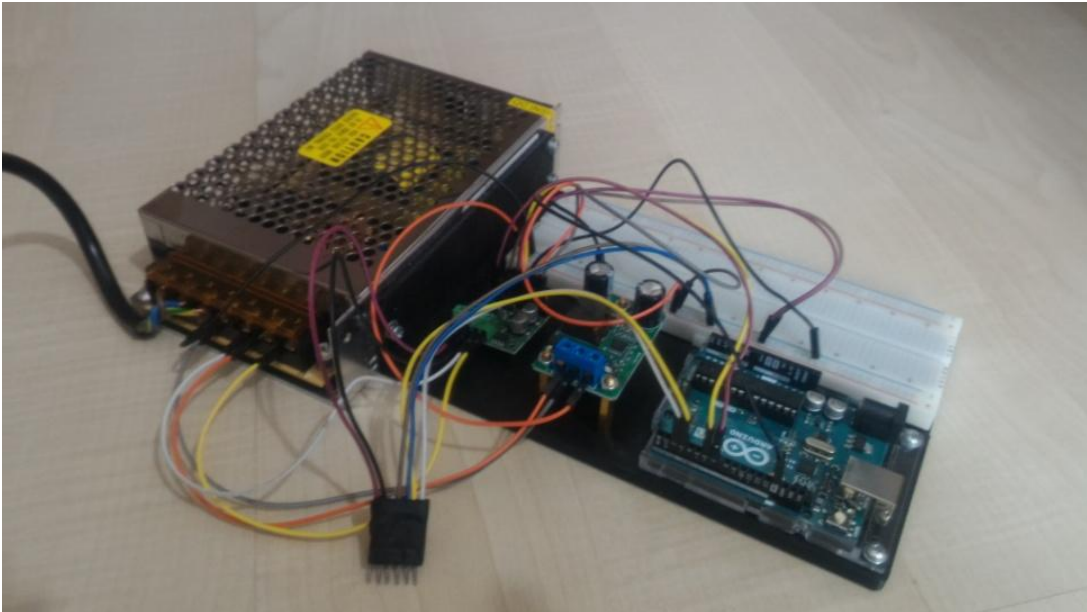
Basınç prizleri 0,7 mm iç, 1,1 mm dış çapa sahip enjektör uçlarından kesilerek ve uç kısımları taşlanarak elde edilmiştir. Sonrasında kanadın orta kısmında bulunan profil parçaları üzerine açılan deliklere sıkı şekilde çakılmış ve yapıştırılarak monte edilmiştir (Şekil 3.7). Burada prizlerin kanat yüzeyi üzerinde herhangi bir yüzey bozukluğuna sebep olmamasına dikkat edilmiştir. Bu işlemden sonra iç çapı 1 mm,

dış çapı 2 mm ve uzunlukları da yaklaşık 500 mm olan esnek silikon hortumlar iç yüzeydeki basınç prizlerine geçirilmiştir. Buradaki bağlantının çözülmemesi ve iki yüzey arasında herhangi bir açıklık olmaması adına hacimli yapıştırıcılar kullanılarak hortumla priz arasındaki bağlantılar sağlamlaştırılmıştır.



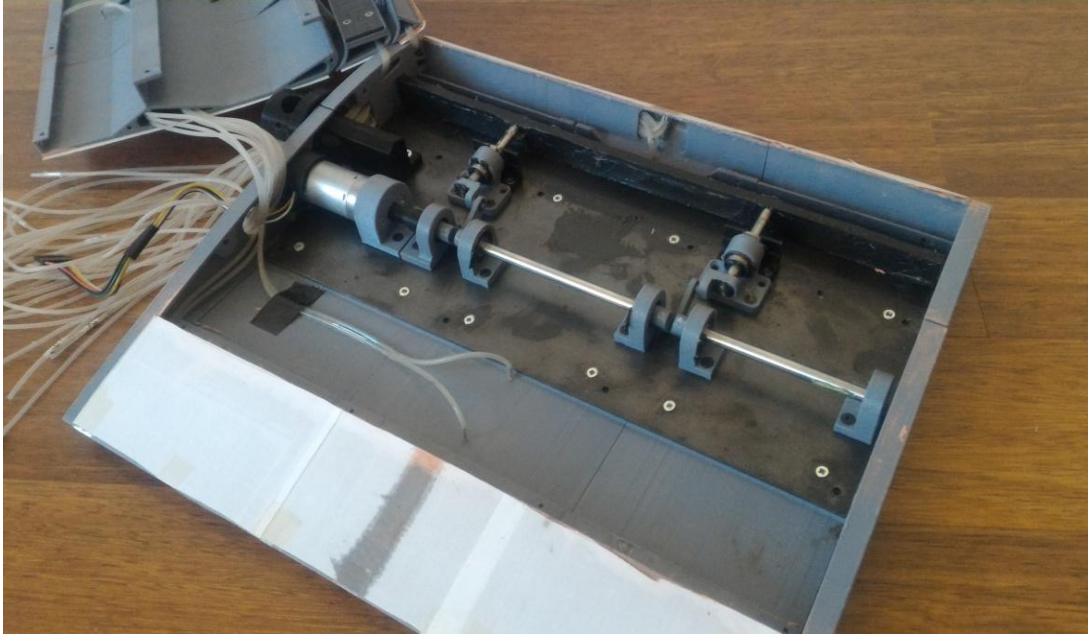
**Şekil 3.7 :** Basınç prizlerine geçirilen hortumların görüntüsü.

Jet aktüatör sistemi içerisinde yer alan motorun PWM değerinin ayarlanarak istenen frekans değerlerinde çalıştırılabilmesi adına bir motor sürücüsü ile birlikte Arduino Uno geliştirme kartı kullanılmıştır. Ayrıca hattan çekilen 220 V'luk elektrik voltajının 12 V değerine indirilmesini sağlayan bir adaptör ile enkoderin ihtiyacı olan 5 V'luk enerjiyi sağlayan başka bir adaptör daha bulunmaktadır. Elektronik devreye ait görüntü Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.8 :** Jet aktüatör sistemine ait elektronik devre.

Alt parçaların üretimi ve hazır parçaların temini sonrasında jet aktüatör sisteminin monte haldeki görüntüsü Şekil 3.9'da verilmiştir. Burada kanat üzerindeki yüzeye yapışmış halde görülen beyaz renkli kağıt kanat yüzeyinin pürüzsüzleştirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Akış kontrolü olmayan modelde kağıt tüm yüzeyi kaplarken akış kontrolü olan modelde kağıdın yarık çıkışlarının olduğu kısımlardan kesilerek çıkarıldığı söylenebilir. Böylece deneylerdeki iki farklı durum için de aynı model kullanılmış ve sonuçların kıyaslanması adına sağlam bir referans noktası oluşturulmuştur.

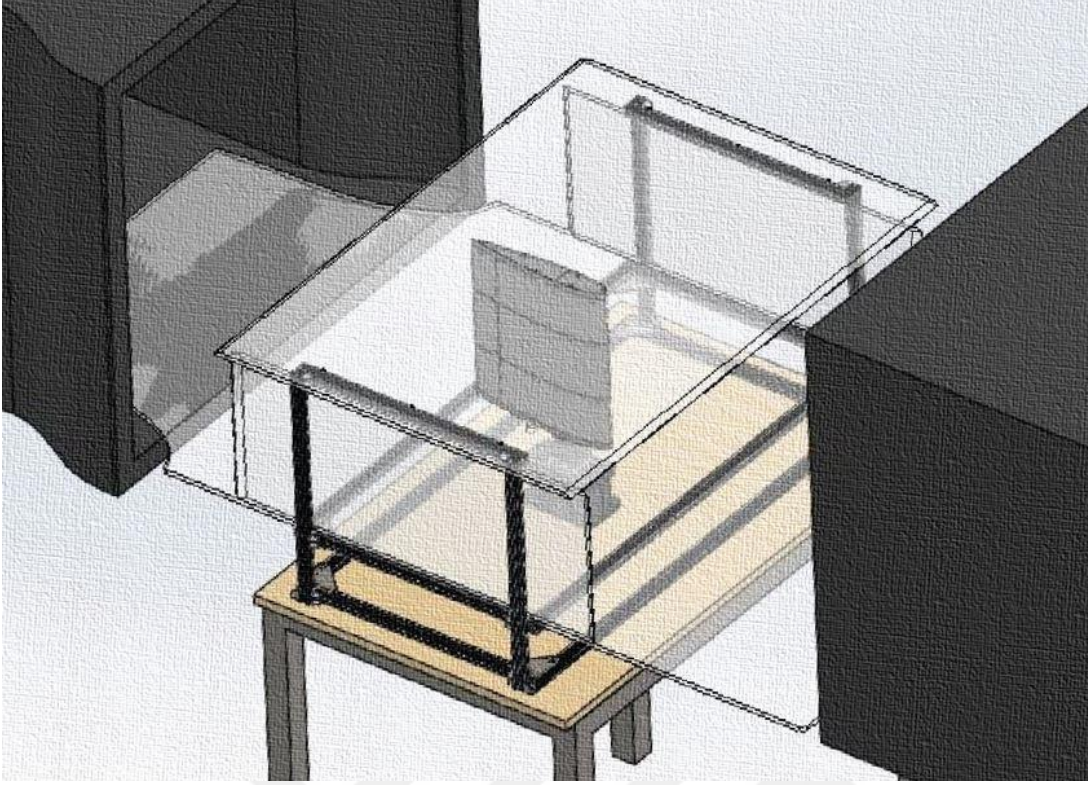


**Şekil 3.9 :** Jet aktüatörlü kontrol sistemine sahip NACA0015 kanat düzeneğinin montaj görüntüsü.

### **3.1.2 Rüzgar tüneli içerisine yerleştirilen düzeneğin tasarımı ve üretimi**

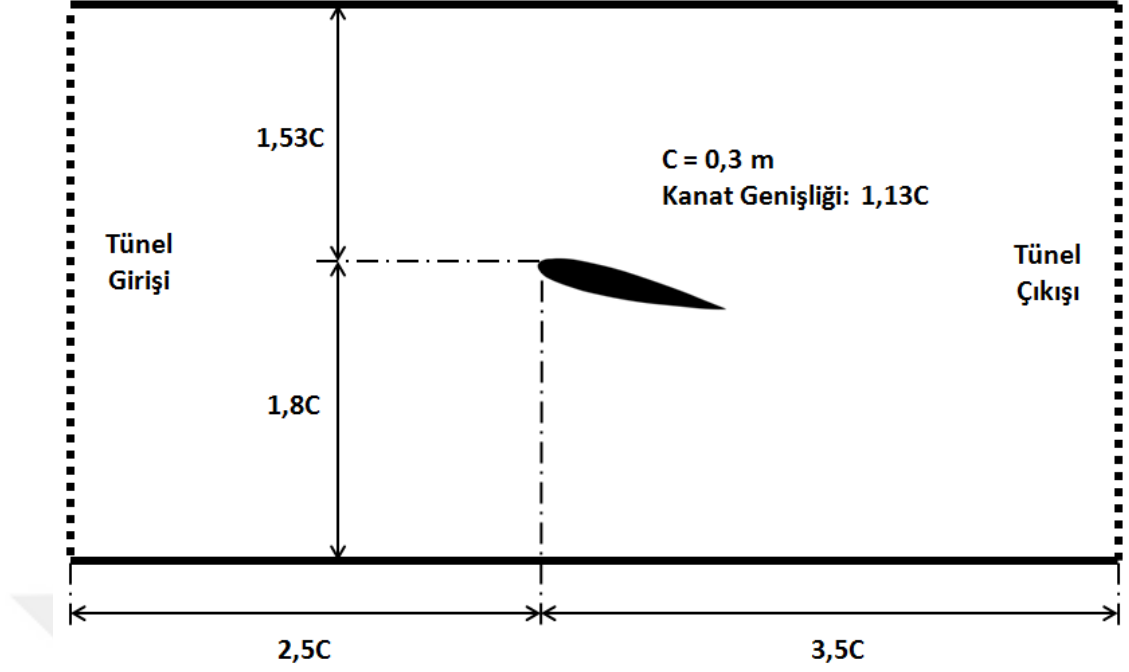
Jet aktüatörlü kanat modelinin hazırlanması ile birlikte kanadın tünel içerisine yerleştirilmesi, istenen hücum açılara ayarlanabilmesi ve gerekli test odası ölçülerinin oluşturulabilmesi için rüzgar tüneline yerleştirilecek bir düzenek hazırlanmıştır. Bu düzeneğe ait tasarımın katı model görüntüsü Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Tasarlanan düzenek temel olarak yüksekliği ayarlanabilir bir masadan, alüminyum profillerden kurulu bir iskelet yapıdan, uygun ölçülerde kesilen pleksi levhalardan, jet aktüatörlü kanat profilinden, kanadın hücum açısını ayarlamakta kullanılan bir tabladan, jet aktüatörün kontrolünü ve gerekli olan güç iletimini sağlayan bir elektronik devreden oluşmaktadır.





**Şekil 3.10 :** Rüzgar tüneli içerisine yerleştirilen düzeneğin katı model tasarımı.

Tünel içerisindeki düzeneğin boyutlarının belirlenmesindeki temel parametre kanada ait veter uzunluğu ve kanat genişliğidir. Veter uzunluğunun belirlenmesinde farklı faktörlerin etkileri değerlendirilerek bir sonuca ulaşılmıştır. Buna göre jet aktüatör mekanik sisteminin kanat içerisine sığdırılması ve deneylerde daha yüksek Reynolds sayılarına ulaşılmasının amaçlanması veter uzunluğunu artırma yönünde etkin faktörlerken; tünelin içerisinde oluşacak blokaj etkilerinin azaltılması ve modele ait parçaların 3B yazıcı ile üretiminin kolaylaştırılması veter uzunluğunu azaltma yönünde etkin faktörler olmuştur. Tüm bu durumların birlikte değerlendirilmesi ile en uygun veter uzunluğu 0,3 m olarak belirlenmiştir. Kanat genişliğinin belirlenmesinde ise Gilarranz ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada kullanılan uzunluk oranı dikkate alınmıştır. Buna göre kanat genişliğinin değeri 0,34 m olacak şekilde tasarım tamamlanmıştır. Düzeneğe ait diğer uzunluklar ise veter uzunluğuna ve uygun bir akış ortamı için gerekli olan kanat yerleşimine uygun olarak belirlenmiştir. Tünel içerisindeki yerleşime ait şematik görüntü ve veter uzunluğuna bağlı ölçülendirmeler Şekil 3.11'de verilmiştir. Burada kanadın tünel içerisine olabildiğince ortalı bir şekilde yerleştirildiği görülmektedir.

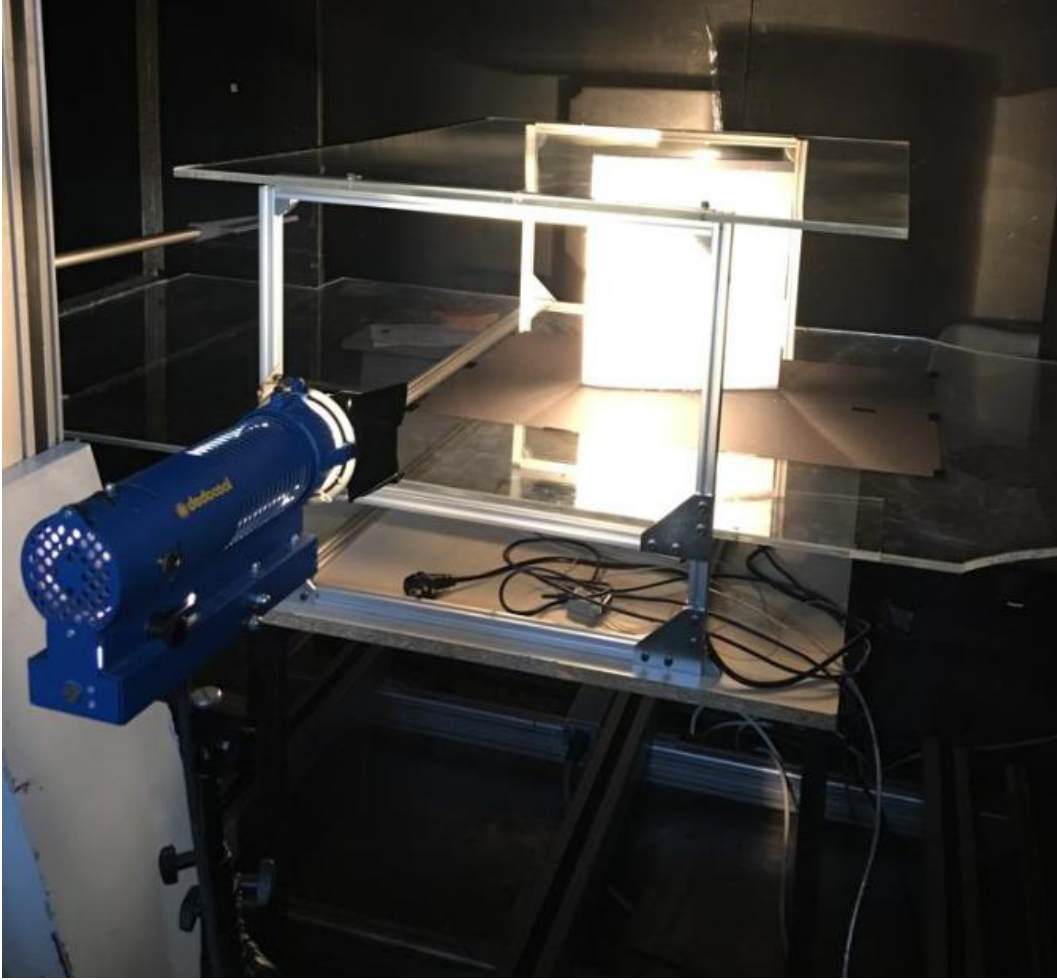


**Şekil 3.11** : Rüzgar tüneli içerisindeki yerleşimin şematik gösterimi.

Kanatın istenen hücum açılarına ayarlanabilmesi için kanatın altına monte edilen bir düzenek hazırlanmıştır. Kanatın alt kısmından kanat içerisindeki sac şasiye sabitlenmiş ve veter eksenini üzerinde başlangıçtan  $0.32C$  mesafede bulunan plastik parça, hücum açısının ayarlanmasında dönme eksenini olarak kullanılmaktadır. Kanat içerisindeki basınç hortumlarının dışarıya çıkartılmasında da kullanılan bu parçanın sabit durumdaki alt tabla üzerine istenen hücum açısında sabitlenmesini ise aradaki bağlantı parçası sağlamaktadır. Tüm bu parçalar arasında civata bağlantıları kullanılmakta ve böylece montaj ve demontaj işlemleri için kolaylık sağlanmaktadır. Özellikle de hücum açısının ayarlanması sırasındaki vakit kaybını azaltmak adına tabla üzerine, ölçümü yapılacak her bir hücum açısı için montaj delikleri açılmıştır. Böylece hücum açısının belirlenmesi aradaki aparatın uygun montaj deliğine getirilmesi sayesinde kolaylıkla sağlanmaktadır.

Düzenek üzerinde bulunan parçalardan bir kısmı 3B yazıcı çıktısı olarak PLA malzemedен elde edilmiştir. Bunun haricinde hazır olarak alınan  $20 \times 20$  mm'lik alüminyum sigma profiller ile tüm sistemi birleştiren iskelet hazırlanmıştır. Uygun montaj bağlantı elemanları kullanılarak kanat, alt taban ayar düzeneği ve lazer ile kesilerek hazırlanan pleksi plakalar tünel içerisine bu iskelet üzerinden monte edilmiştir. Bununla birlikte tasarlanan sistemin deney sırasındaki akış koşullarını

olumsuz şekilde etkilememesi adına Şekil 3.12'de de görüldüğü üzere üst pleksi plaka önüne akışın bozulmasını engelleyici aerodinamik parçalar eklenmiştir.



Şekil 3.12 : Rüzgar tüneli içerisine yerleştirilen deney düzeneği.

### 3.2 Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar

Rüzgar tüneli içerisinde gerçekleştirilen deneyler arasında yarı çıkış hızı ölçümleri, kanat üzerinde basınç ölçümleri ve dumanla görüntüleme yer almaktadır. Bunların haricinde ilk etapta planlamada yer alan kuvvet ölçümleri ise çeşitli nedenlerle tam olarak gerçekleştirilememiştir.

Düzeneklerin hazırlanmasıyla birlikte tüm sistemin Trisonik Araştırma Laboratuvarı'ndaki 80x80 cm'lik ses altı rüzgar tüneli içerisine monte edilmesi sonrasında deneyler gerçekleştirilmiştir. Ancak sonuçlarda tespit edilen hatalar ve deneyler sırasında ortaya çıkan problemlerden dolayı düzenekler ve deney planı birçok defa revize edilmiştir. En sonunda problemlerin birçoğunun giderilmesi ve



deney çalışmalarının daraltılması ile çalışmalar tekrarlanmış ve planlanan durumlar için sonuçlar elde edilmiştir.

Deneyle arasında bulunan yarıık çıkış hızı ölçümleri, jet aktüatörün çalıştığı sırada kanat üzerindeki yarıık çıkış hızlarının ölçümüne dayanmaktadır. Ölçümler serbest akışın olmadığı bir ortam içerisinde her iki yarıık üzerinden de sıcak tel anemometre cihazı yardımıyla yapılmıştır. Jet aktüatörün çeşitli frekanslarda çalıştırılması sonrasında yarıık üzerindeki birden fazla nokta üzerinden hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

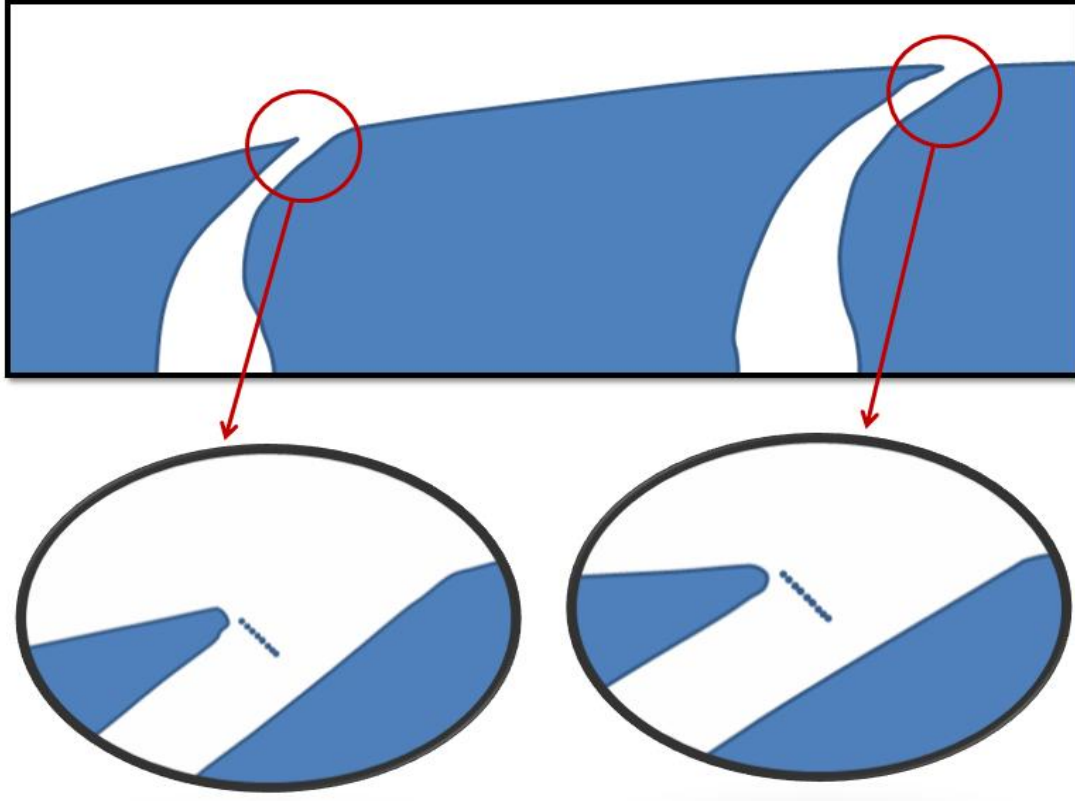
Gerçekleştirilen en kapsamlı deneyle kanat üzerine yerleştirilen basınç prizleri üzerinden alınan basınç ölçümleridir ve farklı hücum açılarında kanat üzerindeki basınç dağılımının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, kanadın kontrolsüz durumu ve farklı aktüatör frekanslarına sahip kontrollü durumları için tekrarlanmışır. Bu ölçümlerde ayrıca tünel içerisindeki akış hızı ve ortama ait basınç değerleri de ölçülmüş ve deney sonuçları içerisinde hesaplara dahil edilmiştir.

Deneyle sırasında akış kontrolü ile "tutunma kaybı" olayının geciktirildiğini görsel olarak da göstermek amacıyla dumanla görüntüleme çalışmaları yapılmıştır. Bu deneyle belirli bir hücum açısındaki kontrollü durum ile kontrolsüz durum için gerçekleştirilmiş ve tünel içerisine yerleştirilen hızlı çekim kamera ile görüntüler elde edilmiştir.

### **3.2.1 Jet aktüatörün yarıık çıkış hızı ölçümleri**

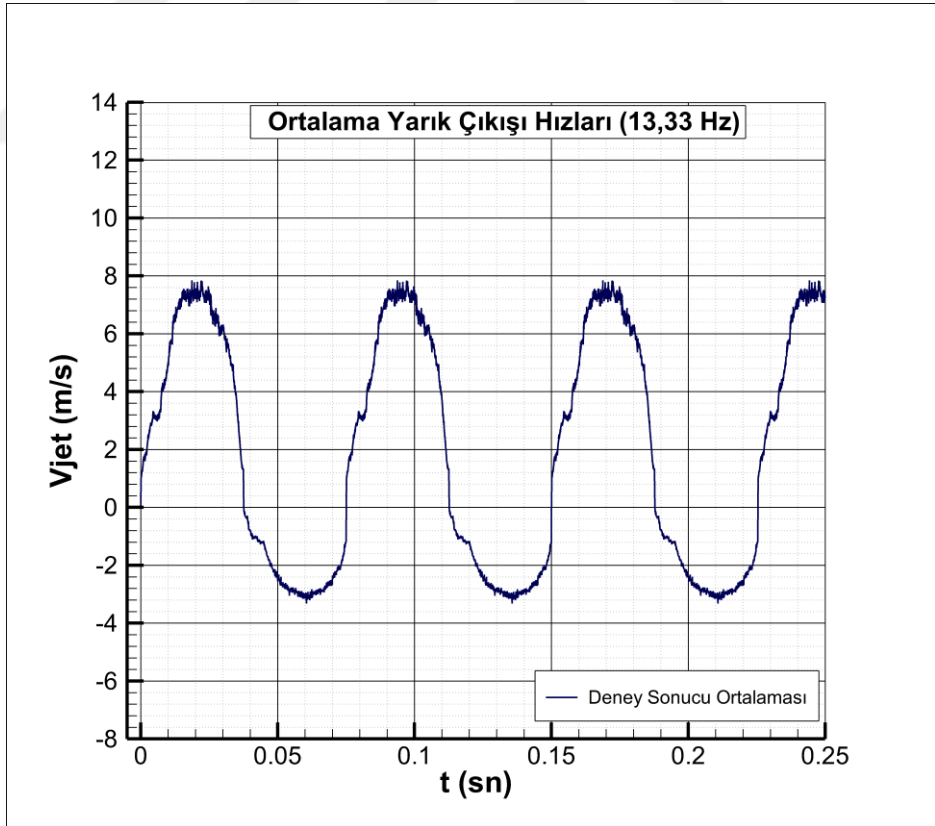
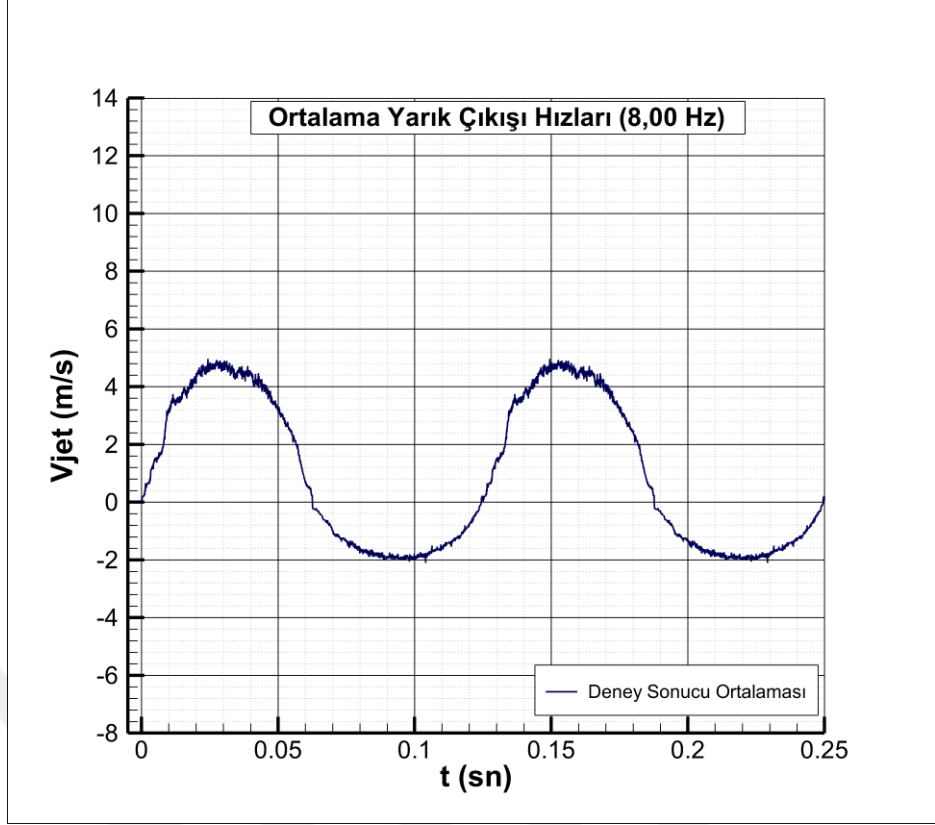
Tasarımı bazı parametrelere göre hesaplanarak tasarlanan kanat modelinin üretiminin gerçekleşmesi sonrasında, modelden beklenen jet çıkışı hız değerlerinin gerçekte elde edilip edilemediğinin deneylele test edilmesi gerekmektedir. Hazırlanan jet aktüatör tasarımına göre kanat üzerindeki yarııklardan çıkan akış hızının, herhangi bir kaçak olmaması durumunda, motorun 1120 d/d değeri için 14 m/s hıza ulaşması beklenmektedir. Ayrıca yarııkların çıkış hızı eğrisinin emme ve basma hareketlerini karşılayacak şekilde sinüzoidal olması ve istenen frekansa uygun olması gerekir. Tüm bu beklentilerin ne kadarının model tarafından karşılandığını görebilmek için kanat yarıık çıkışındaki hızlar sıcak tel anemometre cihazı yardımıyla ölçülmüştür. Deneylelerde her bir durum arasında 0,5 sn bekleme süresi ve 1 sn'lik veri ölçüm süresi uygulanmasına karar verilmiş ve veriler saniyede 15000 veri alma hızıyla kaydedilmiştir.

Kanat üzerindeki yarıklara ait çıkış hızı ölçümleri jet aktüatörün 3 farklı frekans değeri için yapılmıştır. Ayrıca yarık çıkış genişliği olan 1,5 mm'lik kesidin orta noktasından dış kısmına kadar 0,1 mm aralıklı 8 noktada bu ölçümler tekrarlanmıştır. Şekil 3.13'te yarık çıkışı boyunca hız ölçümlerinin yapıldığı konumlar şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere iki yarık için de 8'er konumda tekrarlanan deneylerin toplam sayısı, farklı frekans değerleri de dahil edildiğinde 48'e ulaşmaktadır.

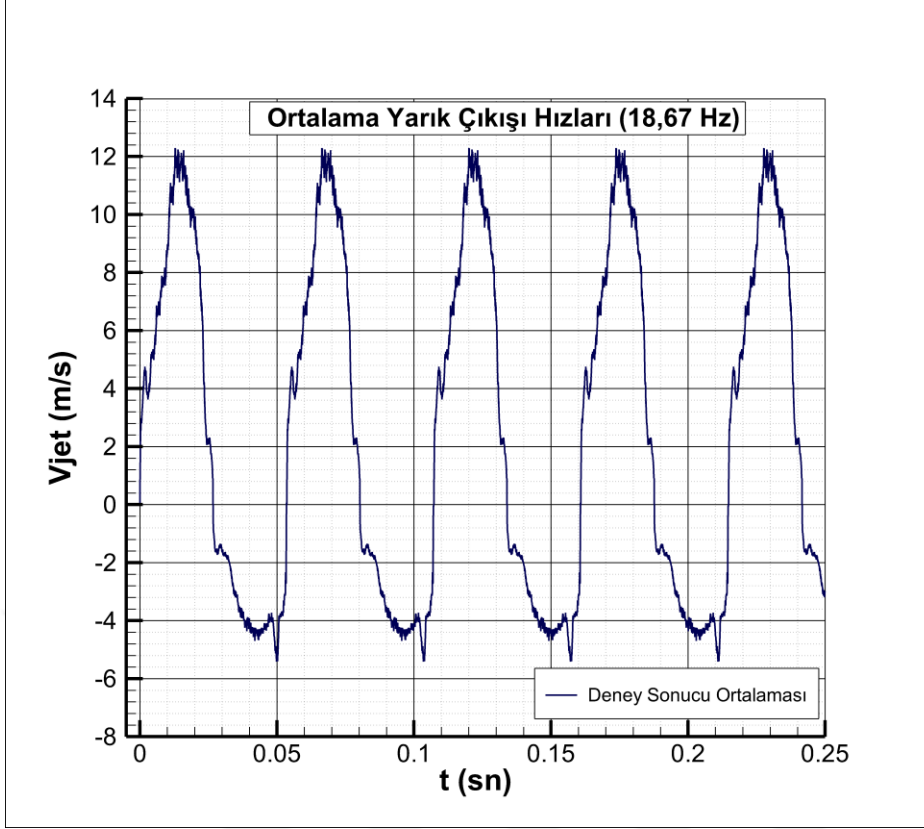


**Şekil 3.13 :** Yarık çıkışında hız ölçümlerinin gerçekleştirildiği konumlara ait şematik gösterim.

Yapılan deneyler sonunda ölçülen yarık çıkış hızı değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren grafikler Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Burada gösterilen grafikler, iki yarıktaki 3 farklı frekans değeri için ayrı ayrı olmak üzere toplamda 8'er farklı noktadaki değerlerin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Diğer bir deyişle, iki yarık çıkışına ait emme ve basma işlemlerine ait hızların bir periyot boyunca ortalama hızları çıkarılmış ve grafik üzerinde görüldüğü üzere çoğaltılarak 0,25 saniyelik zaman aralığına yayılarak gösterilmiştir. Buradaki ortalama alma işleminin temel sebebi, her iki yarık üzerinde yapılan ölçüm konumlarında küçük de olsa hata yapılmış olma ihtimalidir ve ortalama sonuçların verilmesi ile bu hatalar azaltılmıştır.



Şekil 3.14 : Ortalama yarık çıkış hızlarının zamana bağlı değişimi.



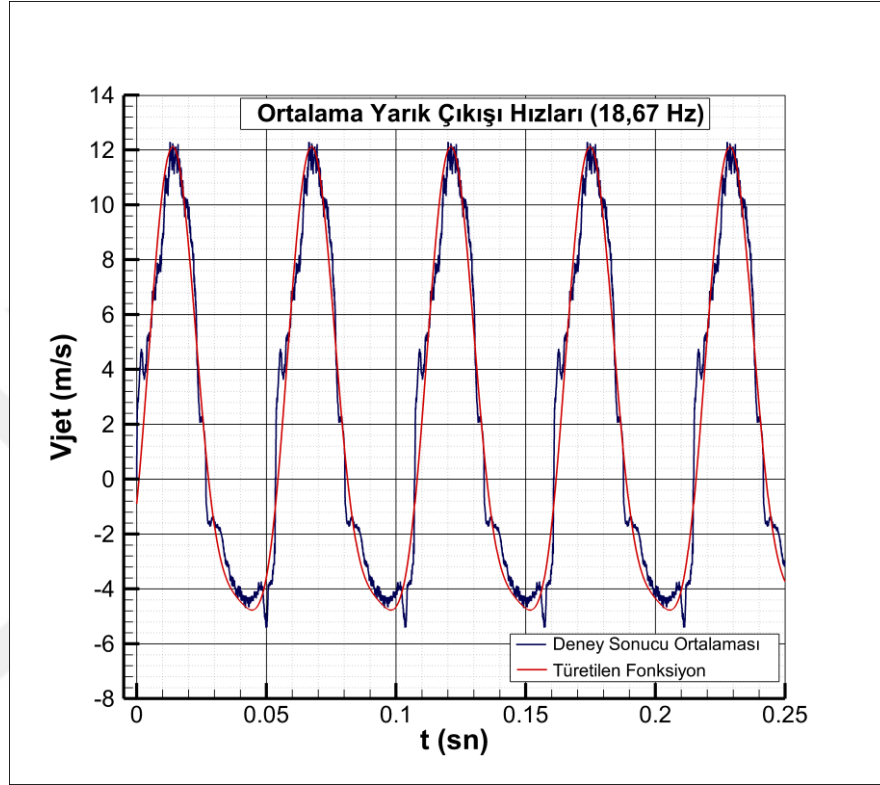
**Şekil 3.14 (devam) :** Ortalama yarık çıkış hızlarının zamana bağlı değişimi.

Elde edilen yarık çıkış hızı sonuçlarına bakıldığında jet aktüatörün oluşturduğu basma sırasındaki akış hızları beklenen hız değerlerinden yaklaşık olarak %13 daha düşük çıkmıştır. Bununla birlikte emme sırasındaki hız değerleri ise beklenenden oldukça düşüktür. Bu nedenle sonuçların sinüzoidal bir eğriden farklı olduğu görülür. Jet aktüatörün yapmış olduğu basma miktarının emme miktarından yüksek olması sistem içerisindeki akışın giren ve çıkanlarının birbirine eşit olmadığını göstermektedir. Tüm bunların esas nedeni olarak pistonun hareket sistemi içerisinde yer alan akış kaçaqları gösterilebilir. Diğer taraftan farklı frekans değerleri için en yüksek jet çıkış hızı değerleri incelendiğinde aralarındaki oranın frekans değerleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Böylece hız çıkışı için türetilecek fonksiyonun tüm durumlar için frekansa değişkeniyle birlikte kullanılabilmesi görülmektedir.

Ortaya çıkan zamana bağlı hız eğrisinin tam olarak sinüzoidal olmaması sonucunda bu yeni eğrinin HAD analizlerinde tanımlanabilmesi için bir fonksiyona benzetilmesi gerekmiştir. Bu nedenle aktüatörün değişken frekansına ve diğer bazı sabitlere bağlı olarak bir fonksiyon tanımlanmıştır. Denklem 3.2 ile gösterilen bu fonksiyon deneysel çalışmalarla elde edilen hız grafiklerine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Şekil 3.15'te 18.67 Hz frekans değeri için yarık çıkış hızlarının

ortalaması ile burada tanımlanan fonksiyonun sonuçları aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Sonuçlar arasındaki benzerliğin HAD analizlerinde kullanılmak üzere yeterli olduğu söylenebilir.

$$U_y(f, t) = \frac{U_\infty f}{100} (4,44 \sin(2\pi f t) - 0,48 \cos(2\pi f t) - 2,04 \cos(2\pi f t)^2 + 2,04) \quad (3.2)$$



**Şekil 3.15 :** 18,67 Hz frekanslı çalışmaya ait hız grafiği ile bu sonucu temsil etmek üzere oluşturulan fonksiyona ait grafiğin kıyaslanması.

### 3.2.2 Kanat profili üzerinden basınç ölçümleri

Kanat yüzeyi üzerindeki basınç dağılımının ölçülmesi, akış kontrolünün etkisinin görülmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Yüzeydeki basınç değerlerinin ölçümü sayesinde kanat profiline ait bir çok özellik belirlenebilmekte ve akış ayrılmasının olduğu kısımlar görülebilmektedir. Bu nedenle tez kapsamında yapılan deneysel çalışmaların merkezinde kanat üzerindeki basınç ölçümleri yer almıştır. Basınç ölçümlerinin gerçekleştirilmesi kanadın dış yüzeyini gören enjektörler ve bu enjektörlere bağlı silikon hortumlar sayesinde olmuştur. Kanadın içerisinden dışarı çıkarılan bu hortumlar 32 kanallı ESP-32HD minyatür basınç tarayıcı üzerindeki çıkışlara bağlanmaktadır (Şekil 3.16). Basınç tarayıcının referans basınç girişi ise ortam basıncına bağlı durumdadır. Bu cihazın bağlı olduğu bilgisayar aracılığıyla da kanat yüzeyleri üzerine konumlandırılmış uçlardan basınç verisi okunmaktadır.

Ölçülen basınç değeri ortama ait basınç değeri ile kanat yüzeyi üzerindeki basıncın farkını vermektedir. Ortamın basınç değerinin bilinmesiyle birlikte kanat üzerindeki mutlak basınç değerleri hesaplanabilmektedir.

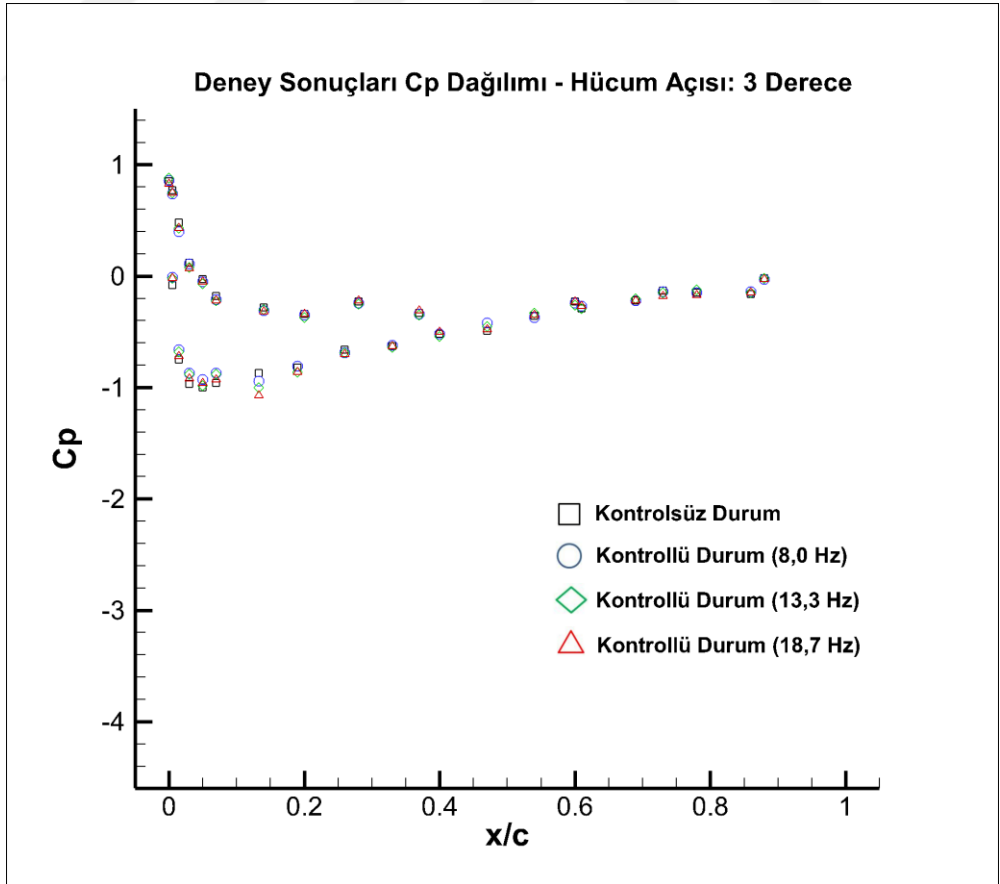
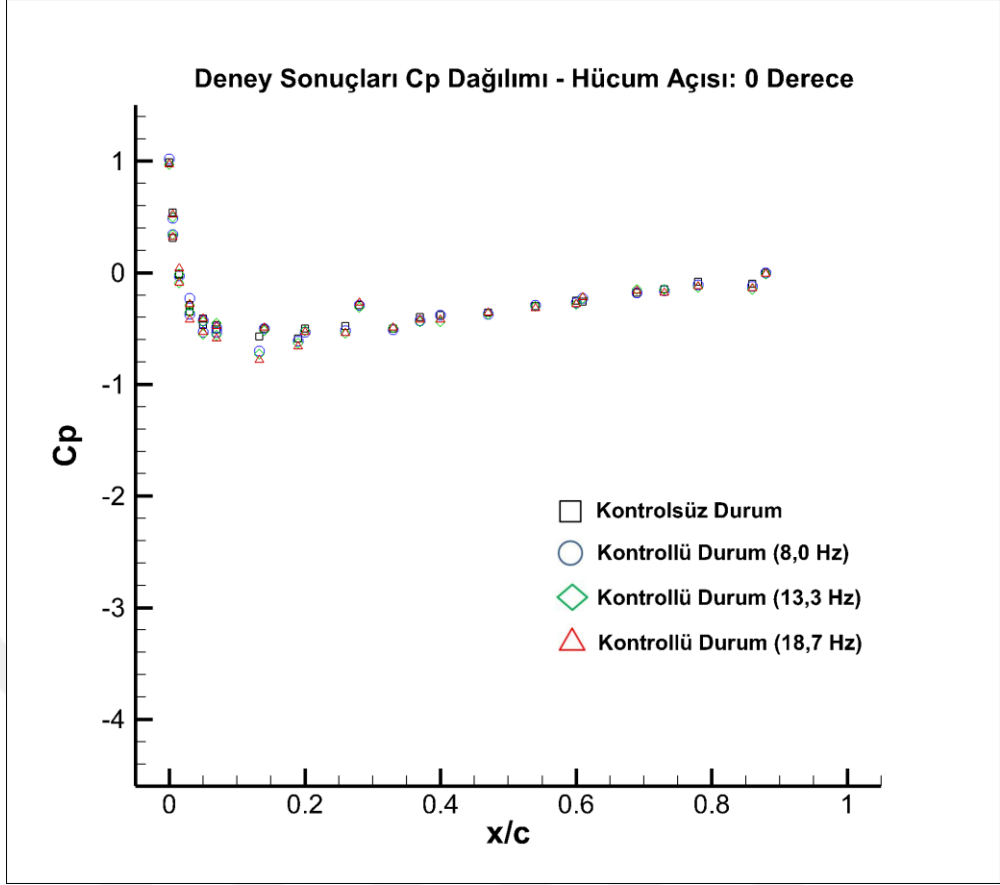


**Şekil 3.16 :** Kanat üzerindeki basınç ölçümlerinin yapıldığı 32 kanallı ESP-32HD minyatür basınç tarayıcı ve Aeroprobe yazılımının kullanıldığı bilgisayar.

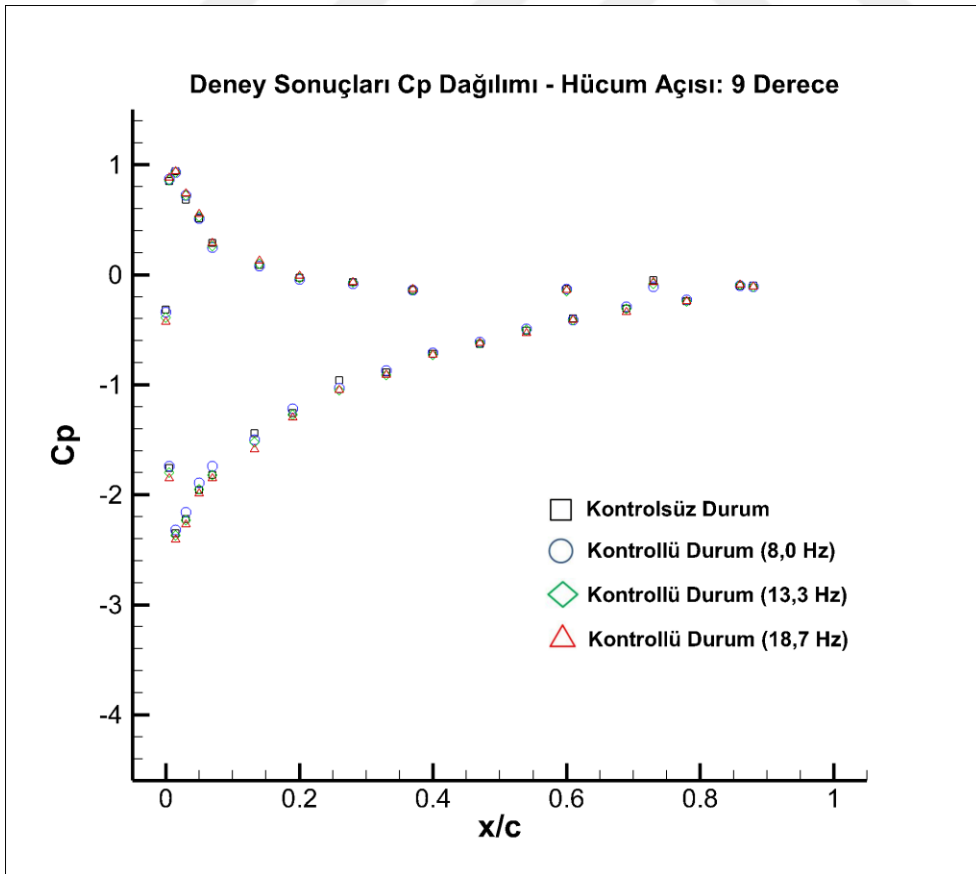
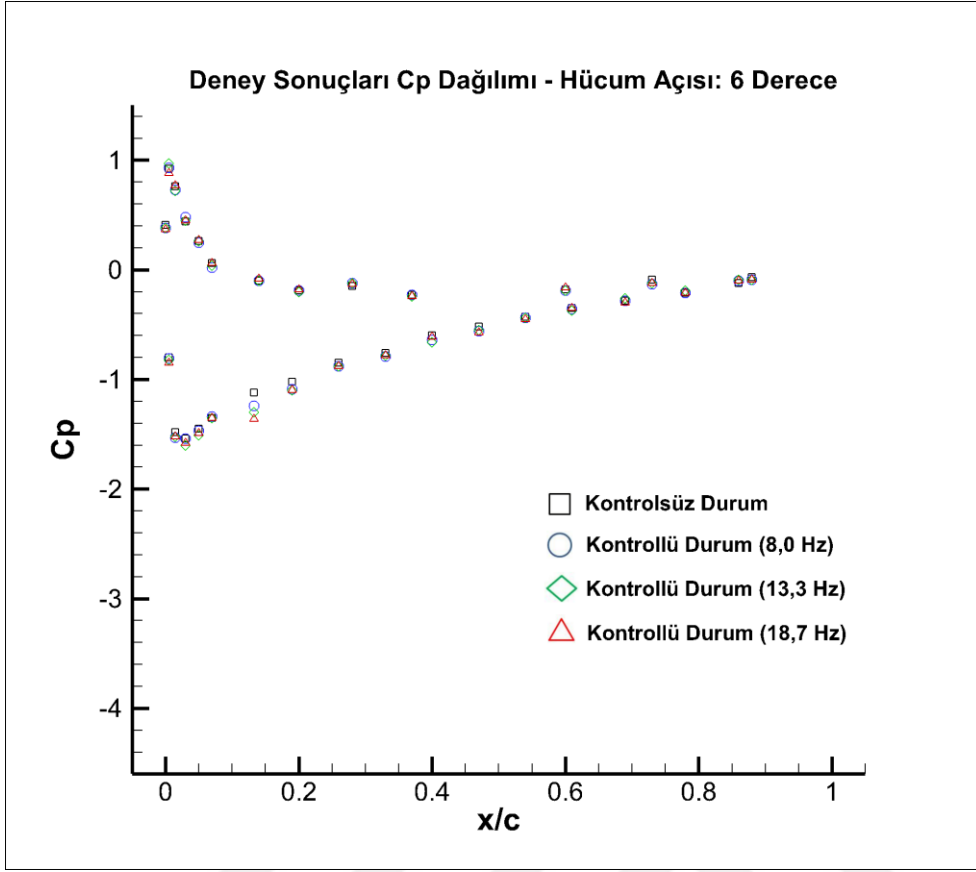
Deneyler sırasında kanat üzerinden elde edilen basınç ölçümlerinin kendi aralarında kıyaslanabilmeleri için boyutsuzlaştırılmaları gerekir. Denklem 3.3'te boyutsuz bir terim olan basınç katsayısının hesaplanması gösterilmektedir.

$$C_p = 2 \frac{p_i - P_\infty}{\rho_h U_\infty^2} \quad (3.3)$$

Basınç katsayısının hesaplanabilmesi, denklemdeki diğer bilinmeyenlerin de ölçümlerinin yapılmasına bağlıdır. Gerçekleştirilen son deneyler için yapılan ölçümlerde dış ortama ait basınç değeri 101285 Pa olarak bulunmuştur. Ortamın serbest akış hızı ise her bir hücum açısında biraz değişmekle birlikte ortalama olarak 10,2 m/s civarında ölçülmüştür. Bununla birlikte havaya ait yoğunluk değeri 292 K sıcaklığında ve deney sırasında ölçülen ortam basıncı değerinde 1,2084 kg/m<sup>3</sup> olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda Re değeri de yaklaşık 200000 değerine ulaşmaktadır. Böylece tüm bu değerler denkleme dahil edilmiş ve incelenen her bir durum için kanat üzerindeki basınç katsayıları çıkarılmıştır. Şekil 3.17'de 0-20 derece arasındaki 9 farklı hücum açısı değeri için C<sub>p</sub>-x grafikleri gösterilmiştir. Grafiklerde NACA0015 profiline ait kontrolsüz durum ve 3 farklı aktüatör frekansı için akış kontrollü duruma ait sonuçlar gösterilmektedir.

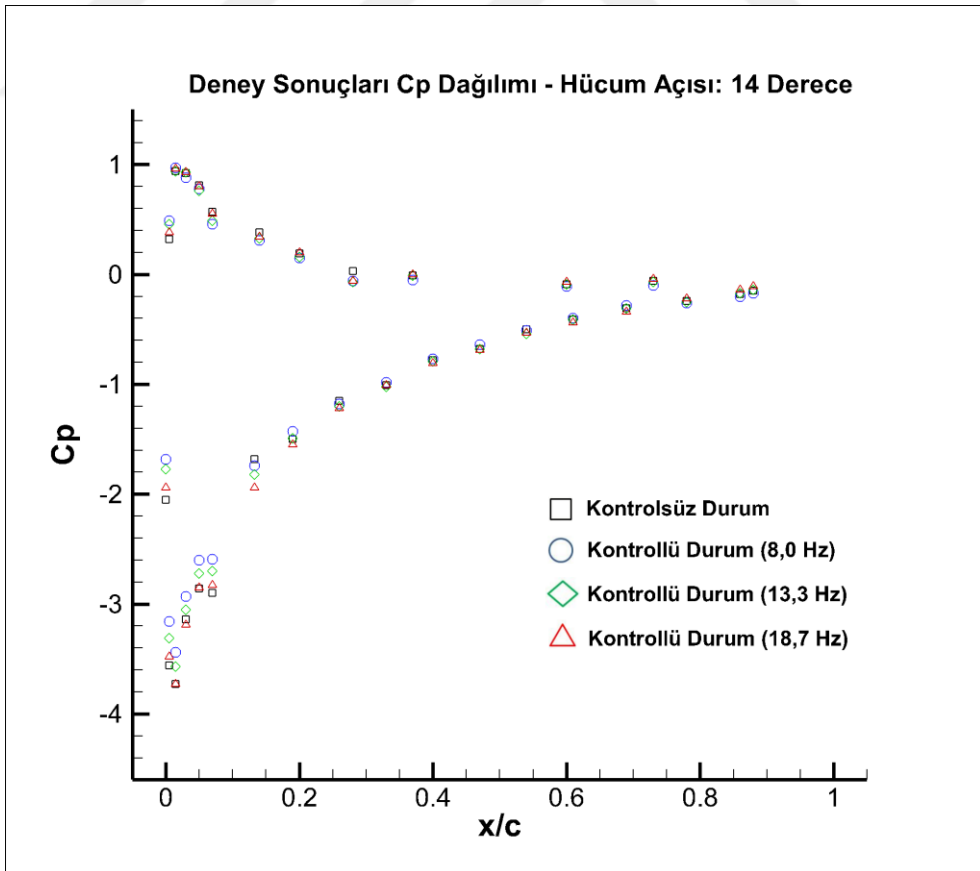
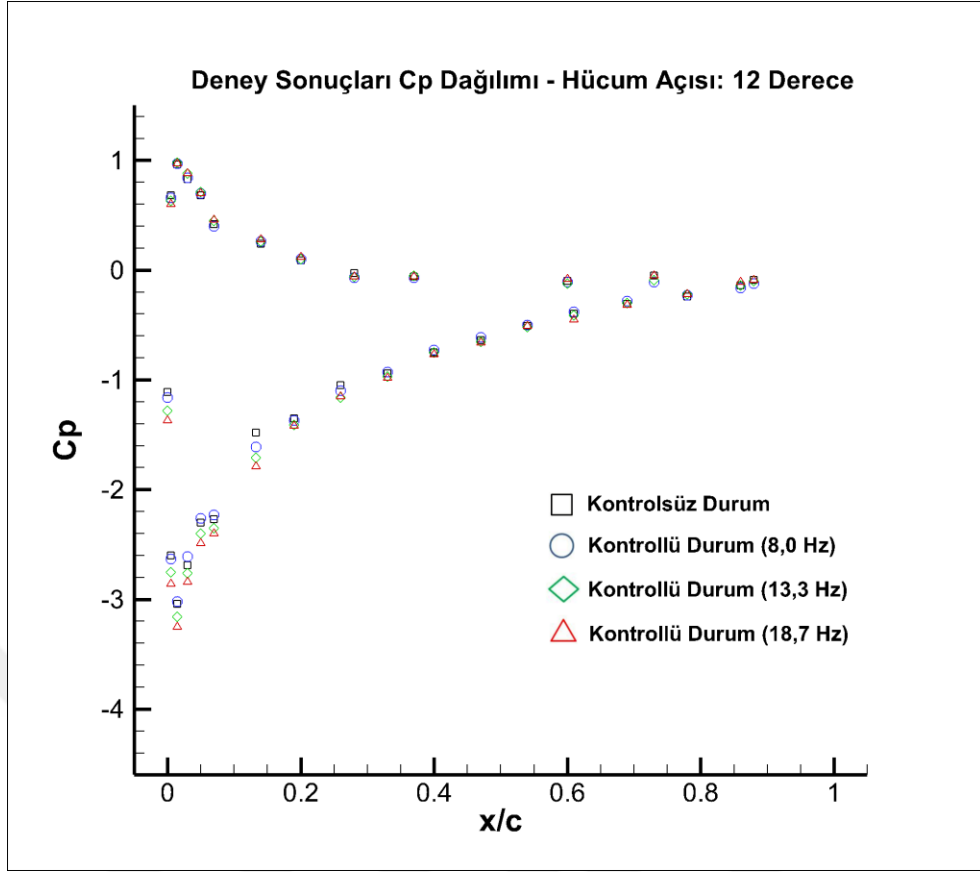


**Şekil 3.17** : Gerçekleştirilen deneylerde elde edilen kanat etrafındaki  $C_p$  dağılımları.

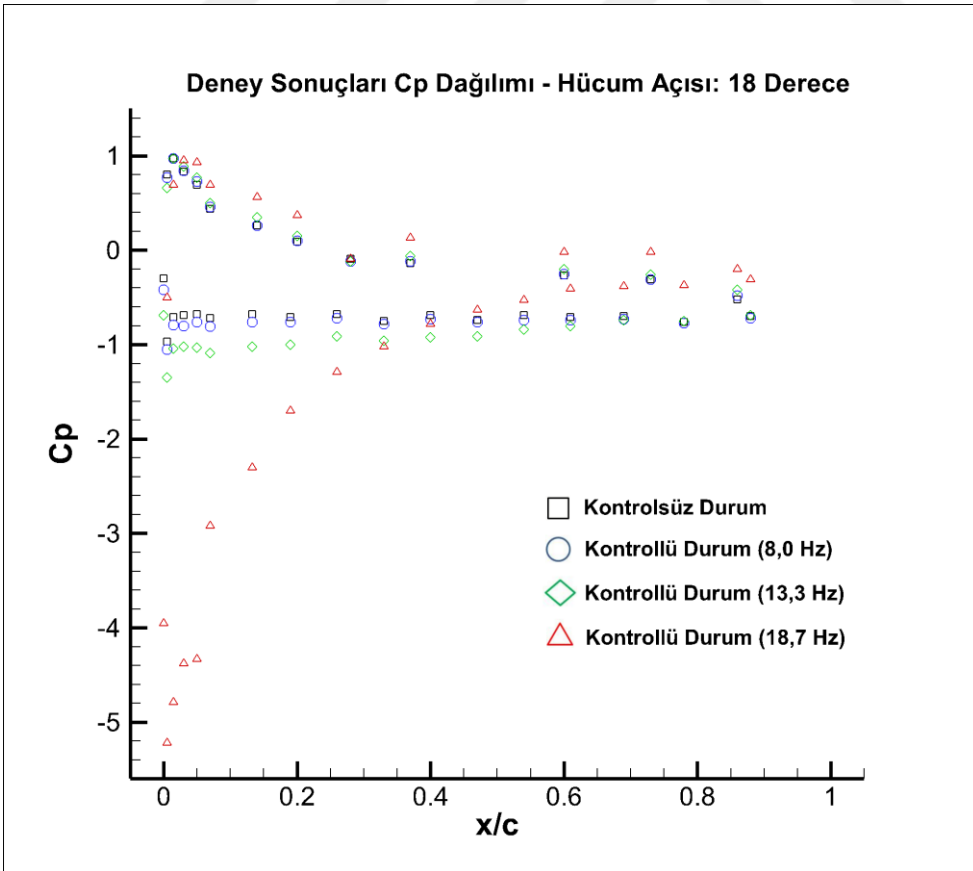
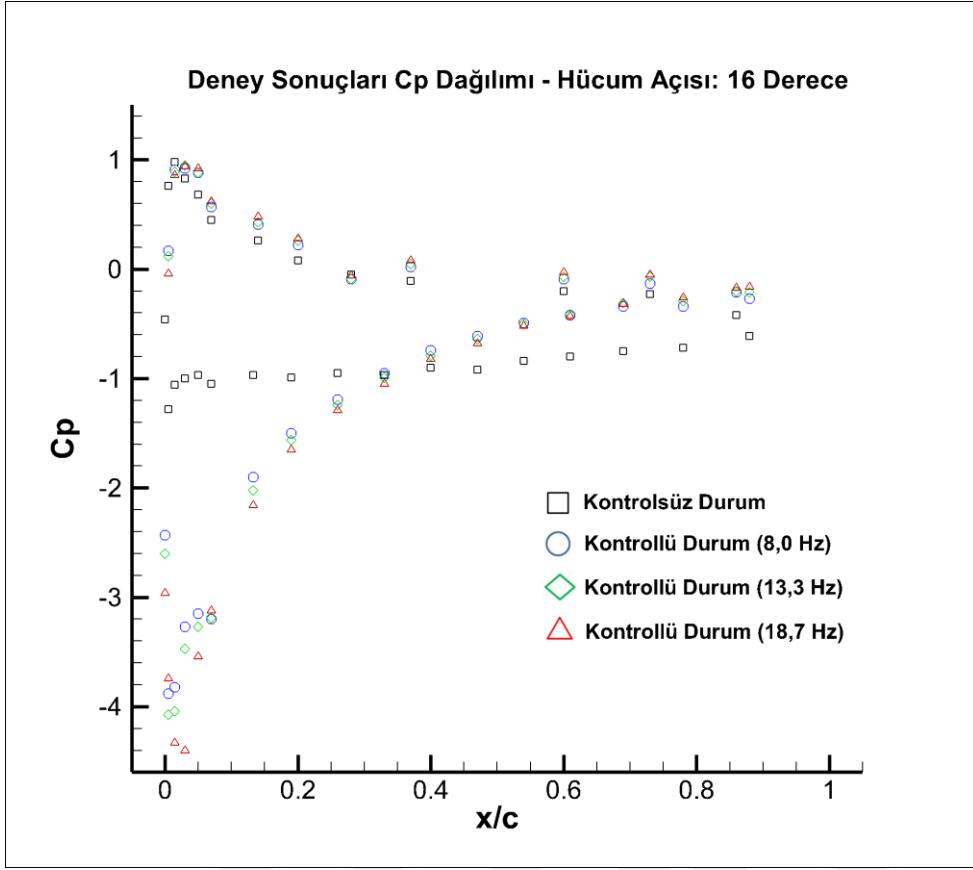


**Şekil 3.17 (devam) :** Gerçekleştirilen deneylerde elde edilen kanat etrafındaki  $C_p$  dağılımları.

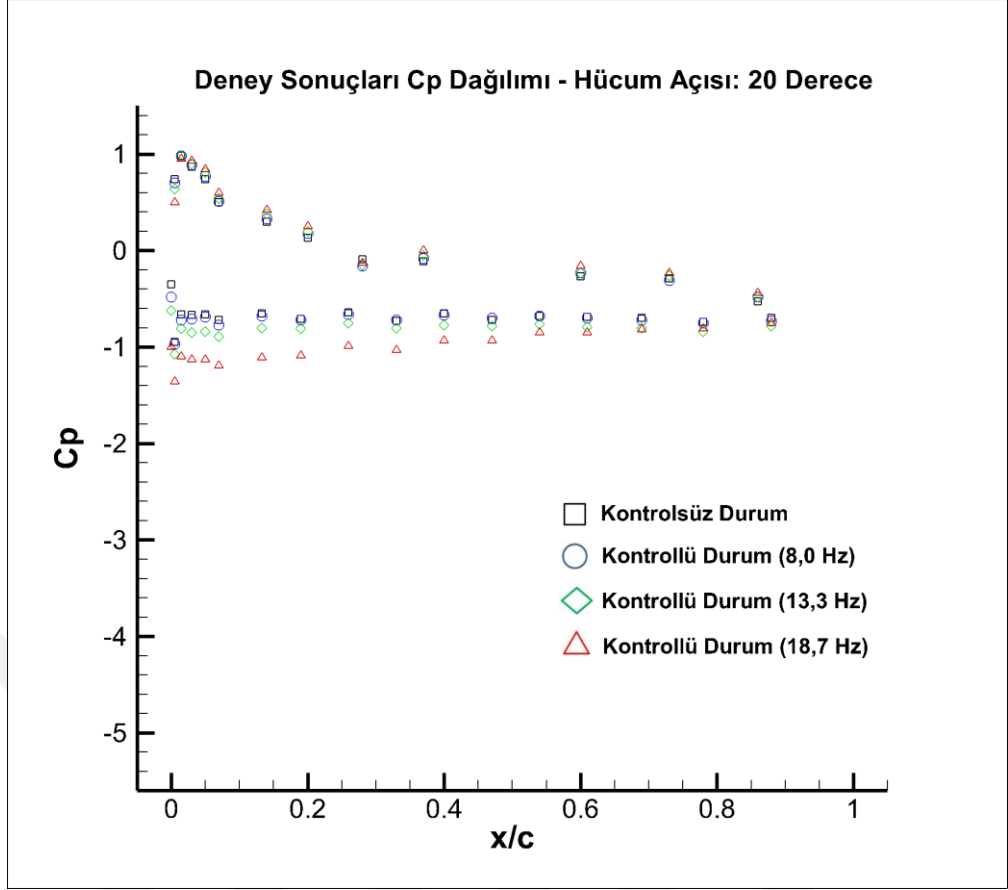




**Şekil 3.17 (devam) :** Gerçekleştirilen deneylerde elde edilen kanat etrafındaki  $C_p$  dağılımları.



**Şekil 3.17 (devam)** : Gerçekleştirilen deneylerde elde edilen kanat etrafındaki  $C_p$  dağılımları.



**Şekil 3.17 (devam) :** Gerçekleştirilen deneylerde elde edilen kanat etrafındaki  $C_p$  dağılımları.

Basınç katsayısının veter eksenine boyunca değişimini gösteren yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde farklı hücum açıları için farklı değerlendirmelerin yapılması gerekliliği ortaya çıkar. 9 dereceye kadar olan düşük hücum açıları genellikle kontrolsüz durum ile farklı frekanslardaki kontrollü durumlar arasında fazla bir fark olmadığı görülebilir. Yalnızca jet çıkışlarının olduğu bölgeye yakın ölçüm noktalarında bir fark olduğu söylenebilir. Bununla birlikte 0 derecelik hücum açısı için sonuçlar incelendiğinde, kontrolsüz duruma ait basınç dağılımında beklendiği gibi oldukça simetrik sonuçlar görülmekte, ancak kontrollü durumda jet etkisi ile bu simetrimin az da olsa bozulduğu görülebilmektedir. Grafiklerde hücum açısının artmasıyla birlikte, yani 12 derecelik hücum açısının üzerine çıkılmasıyla birlikte, akış ayrılmalarının etkisi görülmeye başlar. Bu durum özellikle vakum kenarının girişi boyunca oluşan basınç değişimi üzerinde etkisini gösterir. Kanat kontrolünün etkisi sayesinde vakum kenarının girişi üzerindeki basınç katsayısı değerleri, aktüatör frekansına bağlı olarak değişmekle birlikte, daha düşük noktalara getirilebilir. Böylece kanadın taşıma katsayısı gibi değerlerinde artışlar görülür; devamında da

akış ayrılmalarının kontrollü bir hale getirilmesi ile birlikte tutunma kaybının geciktirilmesi mümkün olur.

Grafiklerde kontrolsüz kanat profilinin 16 derecelik hücum açısında "tutunma kaybı" durumuna düştüğü görülmektedir. Bu durum, kanadın vakum kenarı üzerindeki akış ayrılmasının başlamasına ve kanat üzerinde zamana bağlı olarak öngörülemeyen bir basınç değişiminin oluşmasına ve basınç-hız dalgalanmalarına karşılık gelmektedir. Böyle bir durumda kanadın taşıma katsayısı düşmekte ve sürüklenme katsayısı yükselmektedir. Sonuç olarak birçok uygulamada istenmeyen bir durum ortaya çıkmaktadır. Basınç dağılımı grafiklerinde bu durumun belirtisi olarak vakum kenarı üzerindeki basınç katsayılarının artışı gösterilebilir. Ortaya çıkan bu sonucun açıklaması olarak kanat üzerindeki akış ayrılmalarının ve girdapların hücum kenarına kadar yayıldığı tespiti yapılır. Bununla birlikte grafikler incelendiğinde, kanadın kontrollü hale getirilmesi sonrasında tutunma kaybı halinin geciktirildiği belirtilebilir. Geciktirmenin büyüklüğü ise aktüatör frekansına göre değişmektedir. 8 Hz ve 13,3 Hz frekans değerine sahip jet aktüatörlü kanatlarda 18 dereceye kadar tutunma kaybı durumu oluşmazken, 18,7 Hz frekansa sahip jet aktüatörlü kanatta tutunma kaybı 20 derecelik hücum açısına kadar ötelenmiştir. Böylece kanadın performans değerleri arttırılmış ve kanadın kullanılabileceği hücum açısı değerleri yükseltilmiştir.

### **3.2.3 Kanat profiline ait kuvvet karakteristiklerinin elde edilmesi**

Kanat etrafındaki akış kontrol uygulamalarının en temel amaçlarından biri kuvvet karakteristiklerinin iyileştirilmesidir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda da kanada ait taşıma ve sürüklenme katsayılarının sonuçlarının akış kontrolü ile nasıl geliştiğinin gösterilmesi önemlidir. Bahsedilen kavramları kısaca açıklamak gerekirse, ilk olarak bu katsayıların bir geometrik cismin aerodinamik özelliklerini belirten katsayılar olduğu söylenmelidir. Kuvvet karakteristikleri, akışın etkisiyle kanat ya da herhangi bir cisim üzerinde oluşan akış kuvvetlerinin farklı yönlerde oluşturduğu aerodinamik karakteristikleri tanımlar. Buna göre taşıma katsayısı ( $C_L$ ) akışa göre dik yönde oluşan kuvvet katsayısını ifade ederken, sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ) akışa paralel yöndeki kuvvet katsayısını ifade etmektedir. Bununla birlikte bu katsayıları daha iyi açıklayabilmek için kanat uygulamalarından örnek vermek gerekirse; taşıma katsayısı uçağın yükselmesini ve havada kalmasını sağlayan

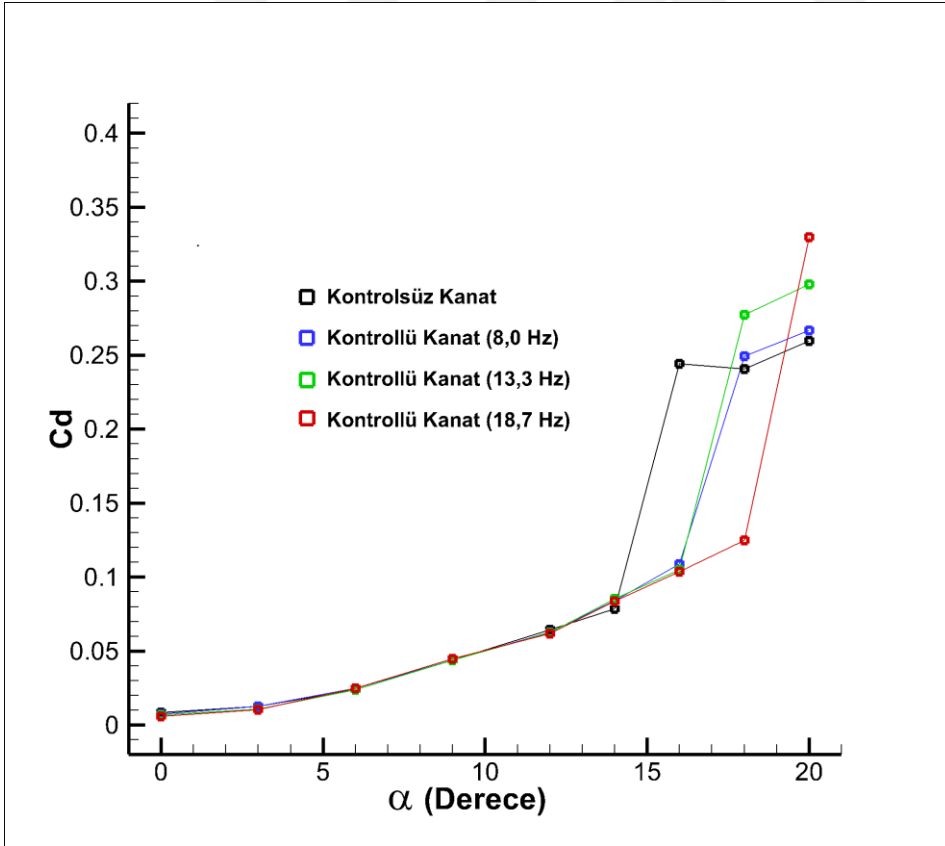
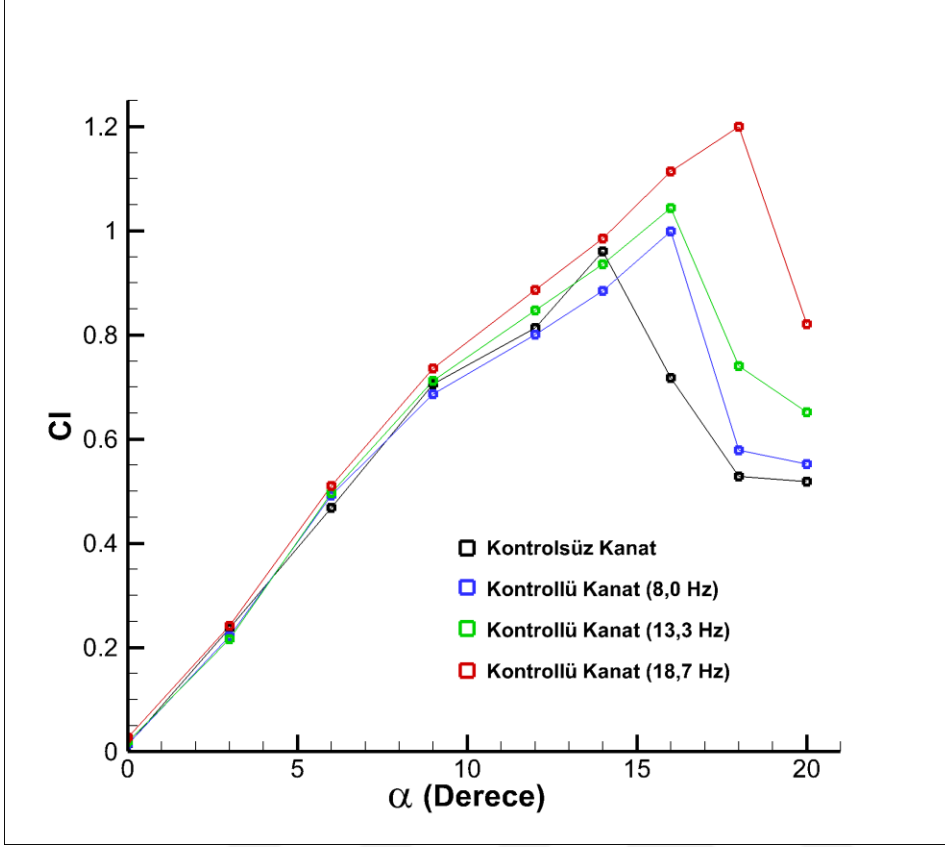
kuvveti, sürüklenme katsayısı ise uçağın gidişine engelleyici yönde oluşan kanat üzerindeki akış direnç kuvvetini oluşturmaktadır.

Yapılan deneylerde kuvvet karakteristiklerinin tespit edilmesi için ilk olarak kuvvet sensörünün kullanımı denenmiş olsa da, ortaya çıkan çeşitli problemlerden dolayı bu ölçümler tam olarak gerçekleştirilememiştir. Bahsedilen problemlerden biri kuvvet sensörünün istenen örnekleme sayısında veri toplayamamasıdır. Diğeri ise tek bir kuvvet sensörünün sisteme entegre edilmesi ile sistemin gerekli rijitliği sağlayamaması ve jet aktüatörün çalışmasıyla birlikte kanat üzerinde ciddi oranda titreşim oluşmasıdır. Tüm bu problemlerden dolayı kuvvet sensörü kullanımından vazgeçilmiştir. Bununla birlikte kuvvet karakteristiklerinin hesaplanması için farklı bir yöntem kullanılmıştır. 3.4 ve 3.5 numaralı denklemlerde bu yöntemde kullanılan ve kuvvet karakteristiklerine ait tanımlamaları gösteren eşitlikler verilmiştir.

$$C_L = \frac{\int_S (P_\infty - P_i) \sin(\theta) ds}{\frac{1}{2} \rho_h U_\infty^2 C} \quad (3.4)$$

$$C_D = \frac{\int_S (P_\infty - P_i) \cos(\theta) ds}{\frac{1}{2} \rho_h U_\infty^2 C} \quad (3.5)$$

Kanat üzerinden elde edilen basınç değerleri, basınç prizlerinin arasındaki alanlara eşit dağıldığı kabulü yapılarak kuvvet hesapları içerisinde kullanılmıştır. Böylece kanat etrafındaki kuvvet karakteristikleri bu yaklaşımla birlikte gerçeğe yakın olarak tespit edilmiştir. Burada elde edilen sonucu gerçek değerinden uzaklaştıran en önemli kısım ise kanadın kuyruk tarafına yakın noktalarından basınç verisi alınmış olmasıdır. Buna rağmen bahsedilen problemin sonucu çok fazla değiştirmeyeceği umulmaktadır. Şekil 3.18'de hücum açısının değişimine göre kanat üzerindeki kuvvet karakteristiklerinin değişimi gösterilmiştir. Sonuçlar kontrolsüz ve kontrollü kanat için elde edilerek kıyaslanmaktadır. Buna göre grafiklerde görüldüğü gibi 14 derecelik hücum açısına kadar akış kontrolünün ciddi bir etkisi görülmemektedir. Hatta bazı hücum açılarında düşük frekanslı kontrolün kanadın taşıma ve sürüklenme katsayısını olumsuz yönde etkilediği de belirtilebilir. Ancak 16 ve 18 derecelik hücum açılarında gelindiğinde, kontrolsüz kanat üzerinde meydana gelen tutunma kaybından kaynaklı performans düşüşlerinin akış kontrollü kanatlarda ortadan kalktığı görülmektedir. Özellikle de 18,7 Hz frekansa sahip akış kontrollü kanadın 20 dereceye kadar olan tüm durumlarda yüksek oranda bir katkı sağladığı söylenebilir.



Şekil 3.18 : Gerçekleştirilen deneylerde kontrolsüz ve kontrollü kanada ait kuvvet karakteristiklerinin gösterimi.

Grafikler incelendiğinde kontrolsüz kanat üzerinde 14 derecelik hücum açısına kadar taşıma kuvvetleri artışa devam ederken sürüklenme katsayıları bu açığa kadar düzeyli bir şekilde yükselmektedir. Ancak bu açının geçilmesiyle birlikte taşıma katsayısı hızlı bir şekilde düşerken sürüklenme katsayısı da aynı hızda yükselmiştir. Diğer taraftan farklı frekanslardaki kontrollü modellerde de benzer durumlar yaşanmış, ancak bunlar farklı hücum açılarındaki gerçekleşmiştir. Buna göre 8,0 ve 13,3 Hz frekansa sahip modellerde bu açı 16 dereceyi görürken, 18,7 Hz frekansa sahip kontrollü modelde bu açı 18 dereceye kadar yükselmiştir.

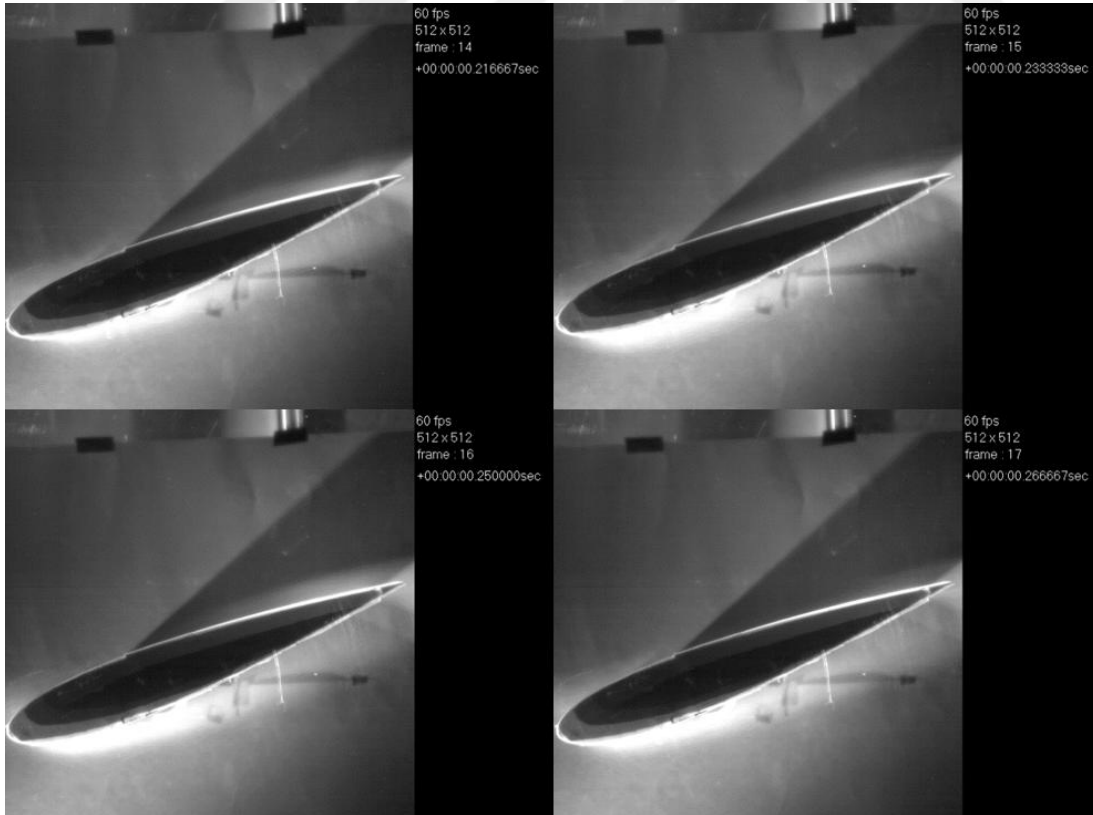
Kullanılan aktif kontrol yönteminin  $Re=200000$  değeri için NACA0015 kanat profili üzerine olan etkisi, kuvvet katsayılarının değişimi üzerinden incelendiğinde bazı kritik sayısal veriler göze çarpmaktadır. Buna göre 18,7 Hz frekansa sahip aktüatörün kullanıldığı kontrollü modelde taşıma katsayısının değeri kontrolsüz durumda ulaşılan en yüksek taşıma katsayısına göre %25 artmıştır. Bununla birlikte yine aynı frekansta 16 ve 18 derecelik hücum açılarındaki sürüklenme katsayısı değerleri yaklaşık %50 oranında azalmıştır.

#### **3.2.4 Akış kontrolünün dumanla görüntülenmesi**

Gerçekleştirilen deneylerde ölçümlerle elde edilen sayısal verilerin haricinde akışla görüntüleme de yapılmıştır. Dumanla görüntüleme tekniği kullanılarak yapılan deneyler 18 derecelik hücum açısında gerçekleştirilmiştir. Akışın kanat etrafındaki hareketine ait görüntülerin elde edilmesi amacıyla bir duman üretici ile birlikte bir de hızlı çekim kamera kullanılmıştır. Duman üretici tünel girişindeki uygun bir yere, duman izi kanat üzerine denk gelecek şekilde sabitlenmiştir. Görüntü almak üzere kullanılacak olan hızlı kamera deney odası içerisinde akıştan etkilenmeyen üst tavana monte edilmiş ve kanat profilini görecektir şekilde konumlandırılmıştır. Belirlenen hücum açısında kontrolsüz kanat profilinin üzerindeki akışın koptuğu ve düzensiz girdapların oluştuğu "tutunma kaybı" durumuna düştüğü önceki deney sonuçlarından gözlenmiştir. Bununla birlikte 18.7 Hz'lik frekansa sahip çift yarıkli jet aktüatörlü kanat profilinde ise "tutunma kaybı" durumunun gözükmediği ve kanat etrafındaki akışın düzenli olduğu yine aynı deney sonuçlarından görülmektedir. Dumanla görüntülemenin temel amacı da bu sonuçların bir de görsel olarak sunulabilmesidir.

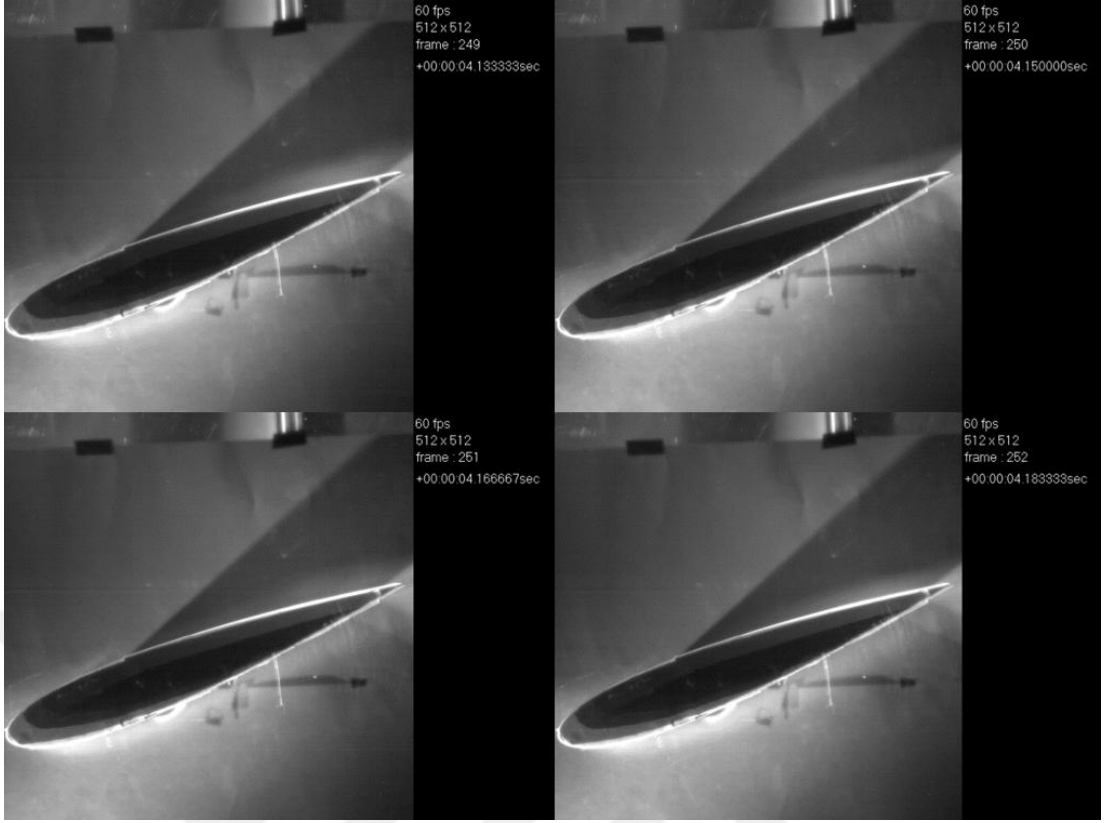
Dumanla görüntülemeyle alınacak görüntülerin kalitesinde tünelin akış hızının büyüklüğü olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Duman çizgilerinin görüntülenmesinde

oldukça düşük akış hızları gerekmektedir ve yüksek akış hızlarında duman çizgilerinin düzgün bir şekilde görüntülenmesi pek mümkün değildir. Diğer yandan dumanın yüksek yoğunlukta görülebilmesi için duman debisinin yüksek tutulması gerekmektedir. Deneylerde her ne kadar duman debisinin akış için yeterli seviyeye çekilmesi mümkünse de akış hızının yüksek olması sebebiyle duman yoğunluğu belli bir seviyeye kadar elde edilebilmiştir. Kontrollü ve kontrolsüz kanatlar için yapılan deneylere ait görüntüler Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de gösterilmiştir. Bu görüntüler 60 fps'lik çekim hızıyla görüntü alan kameranın yaklaşık 4,25 saniye boyunca aldığı 256 görüntü içerisinde 4 karesinin gösterimi şeklindedir. Sonuç olarak görüntülerde tutunma kaybının kontrolsüz kanat üzerindeki etkisi hücum kenarından itibaren görülebilmektedir. Özellikle vakum kenarının girişinde oluşan duman dağılımının farklı karelere gidildikçe değiştiği, böylece kanat üzerinde akış dalgalanmalarının yaşandığı belirtilebilir. Diğer taraftan kontrollü kanat profilinin üzerinde daha düzenli bir akış rejimi olduğu söylenebilir. Burada kanadın üzerindeki duman akışının kanat üzerine daha yakın durduğu ve akış dalgalanmalarının çok düşük boyutlarda olduğu görülmektedir.



**Şekil 3.19 :** Rüzgar tüneli içerisinde kontrolsüz kanada ait dumanla görüntüleme sonuçları.





**Şekil 3.20** : Rüzgar tüneli içerisinde kontrollü kanada ait dumanla görüntüleme sonuçları.



## 4. SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI

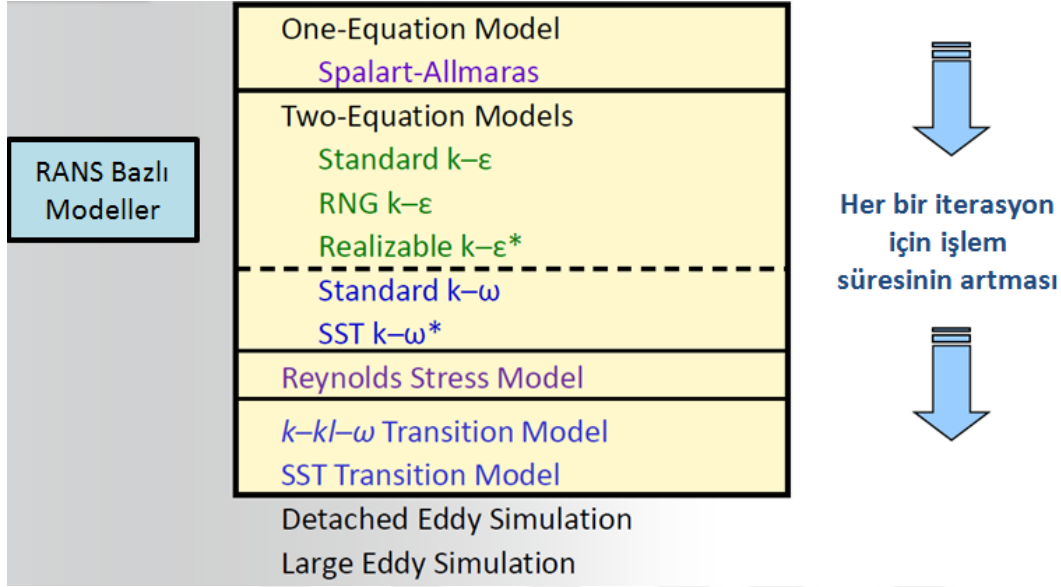
### 4.1 Tez Öncesi Yapılan HAD Analiz Çalışmaları

Tez kapsamında deneysel çalışmaları yapılan uygulamanın HAD analizleriyle de incelenmesi, hem sonuçların teyit edilmesi hem de çalışmanın sınırlarının genişletilmesi bakımından önemlidir. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmalara geçmeden önce HAD hakkında temel bilgiler verilecektir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, herhangi bir akış probleminde akışa ait temel denklemlerin sayısal yöntemler yardımı ile çözülerek analiz edildiği bir uygulama alanıdır. HAD içerisinde yapılan işi özetlemek gerekirse ilk olarak akış problemine ait durumun modellenmesiyle başlamak gerekir. Bunun akabinde, kurulan model içerisindeki akışkan alanının ya da hacminin ağ yapısı oluşturulur ve sınır şartları belirlenir. Sonrasında iteratif çözüme gidilecek sayısal çözüm metodu belirlenir ve çözüm işleminin akış alanı içerisindeki her bir ağ elemanında başlatılmasıyla birlikte HAD analizi, iterasyonlarla adım adım sürdürülerek tamamlanır.

HAD ile geliştirilen çözümlerin doğruluğu akış probleminin zorluğuna göre değişmektedir. Laminer akış şartlarının geçerli olduğu bir akış ortamı için yapılan çözüm ile türbülanslı akış şartlarının geçerli olduğu bir akış ortamı için yapılan çözümün doğruluk dereceleri aynı değildir. Buradaki doğruluğun oranı HAD içerisinde kullanılan denklemlerin gerçeğe yakınlığı ile alakalıdır. Özellikle de türbülans durumu ile ilgili oluşturulan denklemler bazı eksik yönler sahip olabilmektedir. Zaman içerisinde bu eksiklerin giderilebilmesi adına birçok farklı türbülans modeli geliştirilmiştir ve geliştirilmeye de devam etmektedir. Şu anda ANSYS Fluent firması tarafından kullanılmakta olan bazı türbülans modelleri Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Burada verilen modeller incelendiğinde, yukarıdan aşağıya doğru gidildikçe artan denklem sayısı ile birlikte çözüm sürelerinin de arttığı görülür. Bununla birlikte yine aynı yönde gidildikçe, bazı uygulamalarda değişse bile, genellikle çözüme ait doğruluğun da arttığı söylenebilir. Ancak yine de herhangi bir uygulamada hangi yöntemin daha iyi sonuç vereceğini kesin olarak söylemek pek

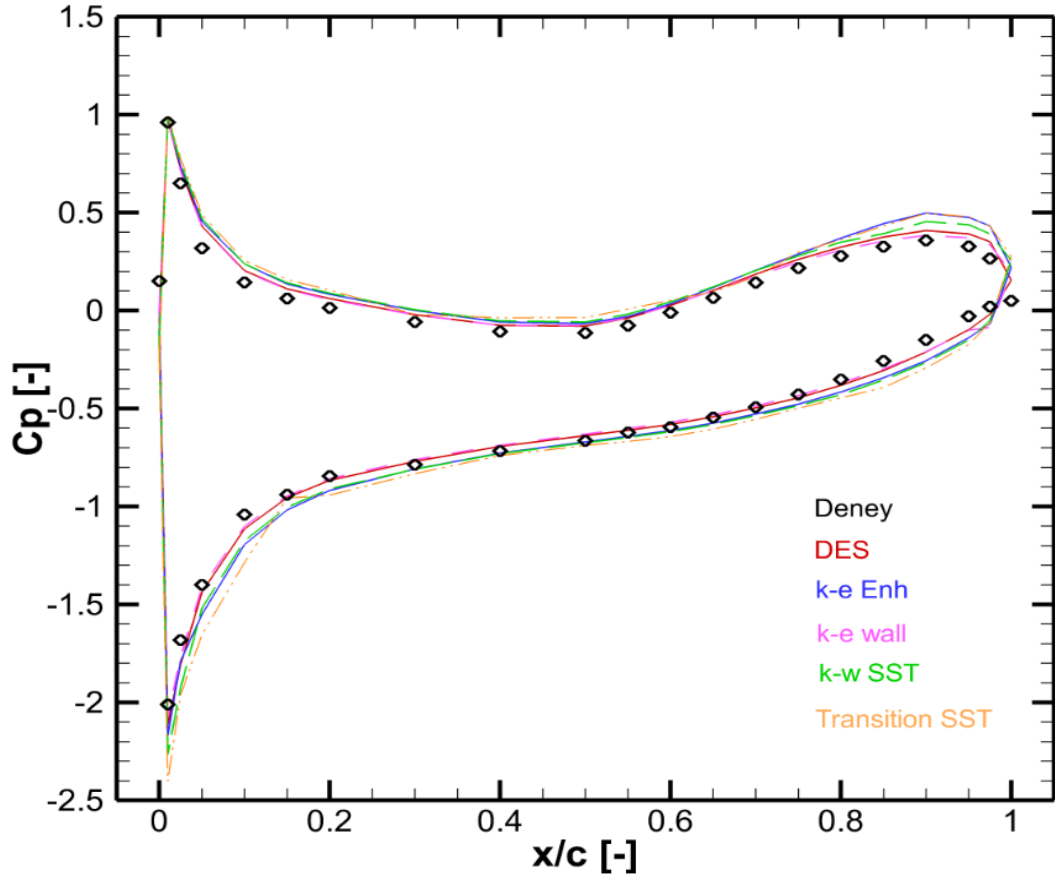
mümkün olmamaktadır. Literatürdeki birçok HAD analizi uygulamasında da bu durumu onaylar şekilde birbirinden farklı türbülans modelleri kullanılarak gerçekleştirilen HAD analizleri deney sonuçlarıyla karşılaştırılmakta ve en uygun türbülans modelinin tespitine çalışılmaktadır. Bundan dolayı bu tez kapsamında yapılacak HAD çalışmalarında da benzer bir yöntem izlenecektir.



**Şekil 4.1** : ANSYS Fluent programı içerisinde kullanılmakta olan türbülans modelleri (ANSYS Inc, 2014).

Tezde gerçekleştirilmesi planlanan kanat etrafındaki akış uygulamasına ait HAD analiz çalışmalarının benzerleri tez öncesi çalışmalarda da yapılmıştır. Literatürdeki çeşitli uygulama örneklerinin tekrarlanmasıyla kanat etrafındaki akışa ait bir çok çalışmada farklı türbülans modelleri kullanımlarının etkisi araştırılmıştır. Buna göre ilk olarak yapılan çalışmada, Nakayama (1985) tarafından yapılan deney sistemi kullanılarak HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve çeşitli türbülans modelleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Deneylerde kullanılan %14 kalınlıklı süper-kritik bir kanat profili üzerinde 4 derecelik hücum açısı ile akış oluşturulmuş ve farklı modellerin kullanımı ile HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2'de bu çalışmadan elde edilen farklı türbülans modellerine ait  $C_p$  dağılımları gösterilmektedir. Buna göre hücum açısının 4 derece olduğu durumda, yani akış ayrılmalarının çok fazla görülmediği bir hücum açısında çoğu türbülans modelinin benzer sonuçlar gösterdiği görülmektedir. Buna rağmen grafik üzerinde de görüldüğü gibi DES içeren türbülans modeli ile elde edilen dağılımın deney sonuçlarına daha yakın olduğu gözle çapmaktadır. DES türbülans modeli içerisinde RANS ve LES modelleri birlikte yer almakla birlikte bunların kullanıldığı alanlar farklıdır. Buna göre RANS modeli

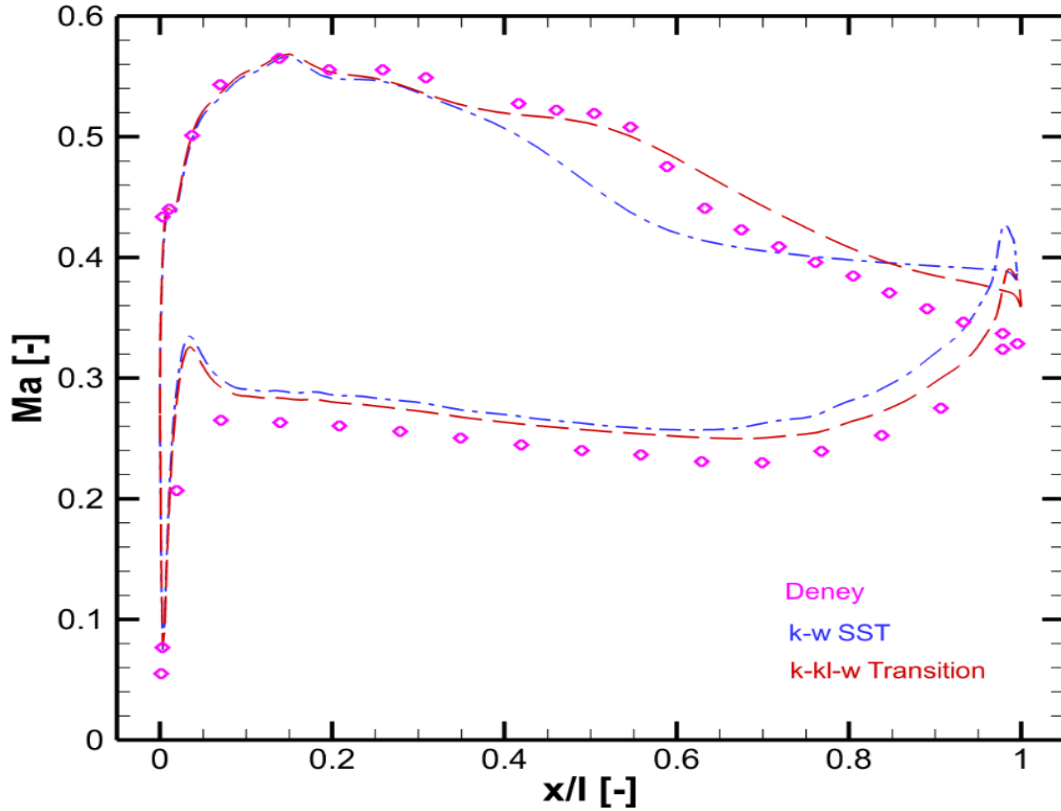
akışın ayrılmadığı ve girdapların görülmediği akış alanlarında kullanılırken LES modeli akış ayrılmasının görüldüğü ve türbülans yoğunluğunun fazla olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Normal şartlarda LES için analiz şartlarının 3B ortamda olması gerekmektedir. Bunun sebebi LES içerisinde kullanılan sayısal çözücülerin 3B yapıya uygun olmasıdır. Bu sayede 3B türbülans oluşumları bu modelle tespit edilebilmekte ve gerçek sonuçlara çok yakın değerler elde edilebilmektedir. Tüm bunlara rağmen DES modelinin 2B analizler içerisinde kullanımı, LES modelinin kullanımı fiziksel yapıyı tam olarak yansıtmaya bile mümkündür. Dahası buradan elde edilen sonuçların bir çok türbülans modeline kıyasla gerçeğe daha yakın olduğu söylenebilir. Grafik üzerinde özellikle girdapların yoğunlaşarak akış problemini zorlaştırdığı kaçış kenarında, DES modelinin diğer türbülans modellerine kıyasla gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği belirtilmelidir.



**Şekil 4.2 :** 4 derece hücum açısına sahip %14 kalınlıklı süper-kritik bir kanat profilinin deney ve HAD analizi sonuçları (Nakayama, 1985).

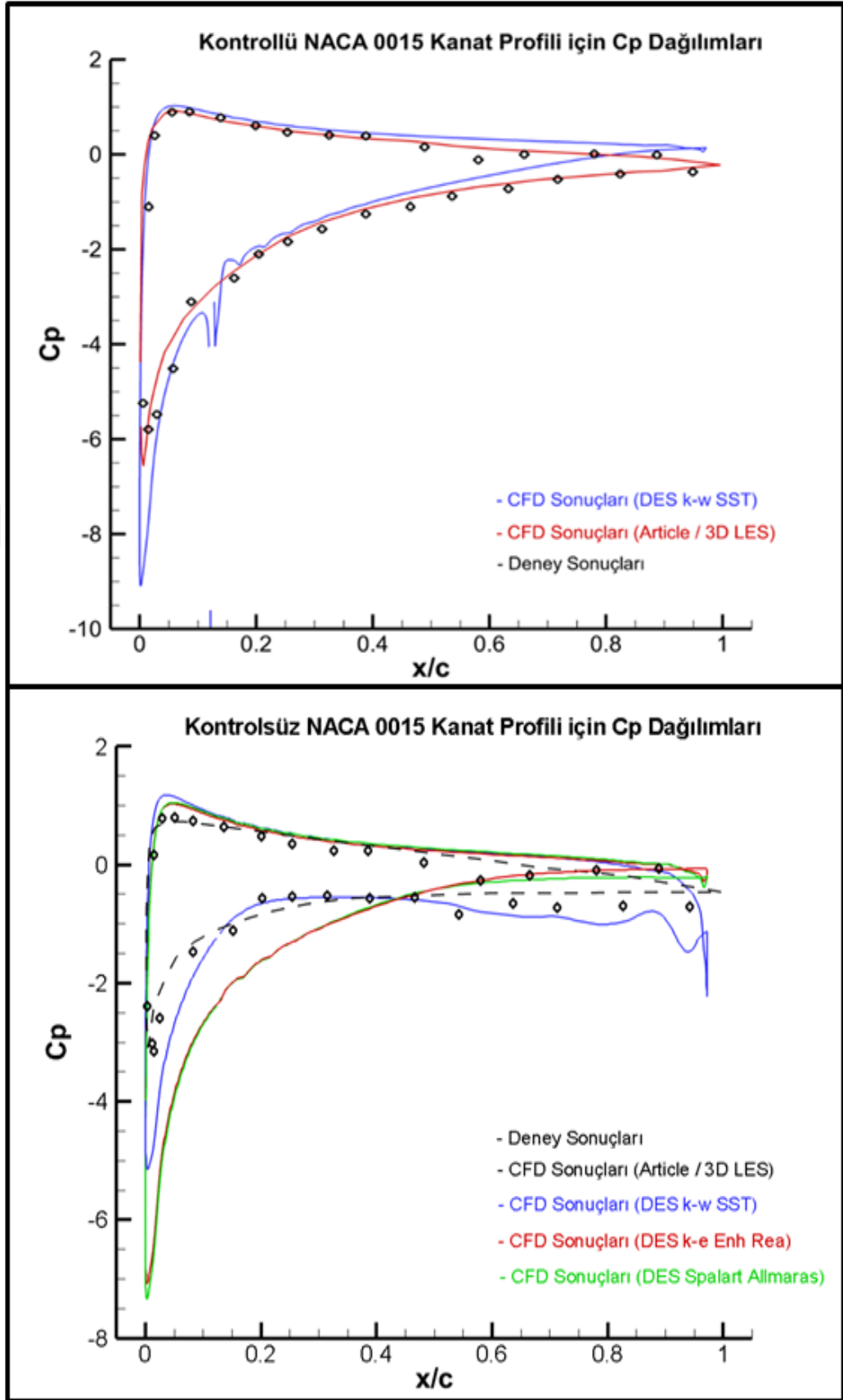
Tez öncesi yapılan çalışmalardan bir diğeri de Kurz ve diğ., (2016) tarafından yapılan ve kaskat kanat profilinin kullanıldığı çalışmadır. Bu çalışma kapsamında farklı türbülans modelleri kullanılarak gerçekleştirilen HAD analizlerinin deney

sonuçlarıyla kıyaslaması yapılmıştır. Şekil 4.3'te sonuçlara ait grafik verilmiştir. Buna göre grafikte iki farklı RANS tabanlı türbülans modeli için gerçekleştirilen HAD analiz sonuçlarıyla deney sonuçları beraber gösterilmektedir. Grafik yorumlandığında "k-kl-w Transition" modeli ile yapılan analizlerin kanat üzerinden akış ayrılmasının başladığı noktalardan itibaren deney sonuçlarına daha yakın gittiği, bunun öncesinde ise k-w SST ile benzer sonuçlar gösterdiği belirtilebilir. Buradan çıkarılan sonuç ise bu modelin akışa ait laminer-türbülans geçiş bölgesinde daha başarılı bir çözüme sahip olduğudur.



Şekil 4.3 : Kaskat kanat profili üzerinde deney ve HAD analizi sonuçları (Kurz ve diğ., 2016).

KontROLSÜZ kanatlarla ilgili yapılan çalışmaların yanı sıra akış kontrollü kanatlarla ilgili yapılan çalışmalardan da bahsedilmelidir. Buna göre You ve Moin (2008) tarafından yapılan çalışmalar örnek alınarak benzer çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmada deneylerle ve üç boyutlu HAD analizleriyle elde edilen sonuçlar burada DES kullanılan iki boyutlu HAD analizleri sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Hem kontROLSÜZ kanat durumu için hem de kontrollü kanat durumu için yapılan analizlerin önceki çalışmaya ait sonuçlarla kıyaslanması Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4 : Akış kontrollü ve kontrolsüz NACA0015 profili üzerindeki  $C_p$  dağılımı için deney ve HAD analiz sonuçları (You ve Moin, 2008).

Grafiklerden görüldüğü üzere kontrollü ve kontrolsüz kanat profili üzerinde yapılan 2B HAD analizleri, genel olarak deney ve 3B HAD analizi sonuçlarıyla yakın değerlere sahiptir. Özellikle DES k-w SST türbülans modelinin diğer 2B modellere göre akış ayrılmalarının etkisini daha iyi tespit ettiği düşünülmektedir. Bununla birlikte bu modelin eksik yönü olarak kanadın vakum kenarının giriş kısmındaki basınç katsayılarını daha düşük hesaplaması gösterilebilir. Grafiklerde bu bölgede yapılan analizlerin gerçek sonuçların bir miktar uzağında kaldığı görülmektedir.

Sonuç olarak yapılan bu çalışmalardan da görüldüğü üzere türbülans modellerinin doğru kullanımı için uygulama bazlı düşünmek ve karar almak gerekmektedir. Özellikle zorlu akış şartlarında her modelin vermiş olduğu cevap değişmekte ve böyle durumlarda bazı modeller gerçeğe daha yakın sonuçlar verebilmektedir. Tüm bunlar göz önüne alındığında, tez kapsamında yapılacak HAD analiz çalışmalarında DES modelinin kullanılması ve bu model içerisinde en uygun olan türbülans modelinin seçimi için çalışma yapılması kararlaştırılmıştır.

#### **4.2 HAD Analizleri için Çözüm Ağının ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi**

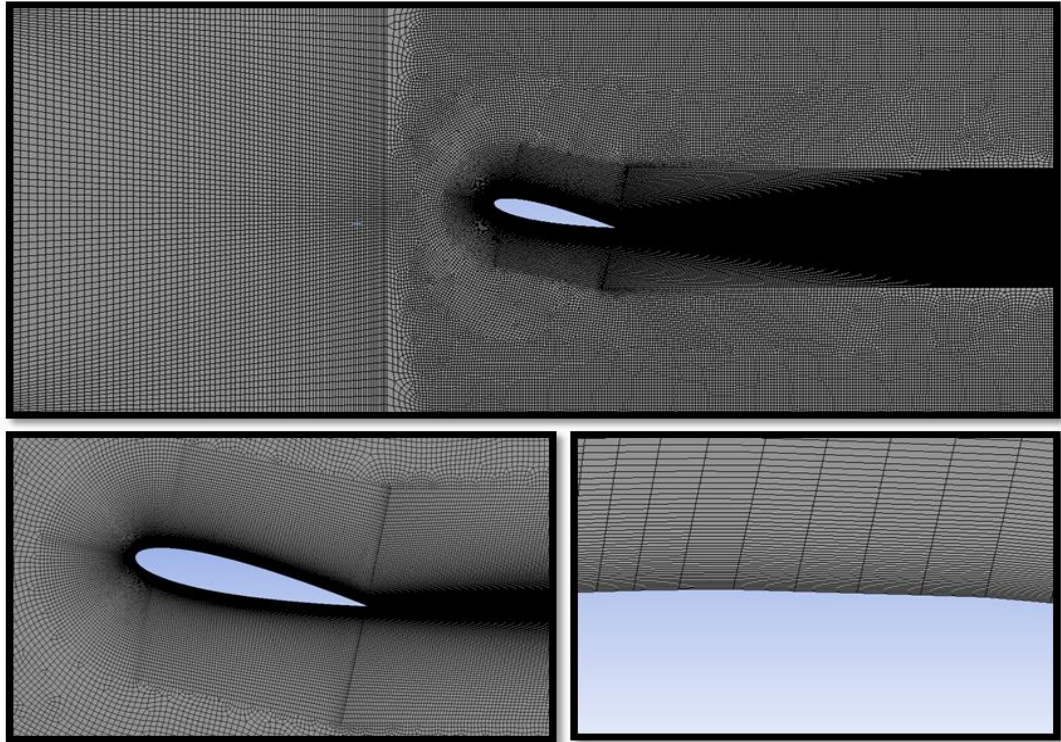
Tez kapsamında tasarlanan çift yarıkli jet aktüatörlü kanadın HAD analizlerini gerçekleştirmeden önce burada kullanılacak türbülans modelinin ve çözüm ağı sıklığının belirlenmesi için kontrolsüz NACA0015 kanat profilinin HAD analizlerinin yapılması uygun görülmüştür. Tez öncesi yapılan çalışmalardan da görüldüğü üzere farklı türbülans modellerinin kullanımında çeşitli akış koşulları için farklı sonuçlar elde edilmektedir. Özellikle sınır tabakadan akış ayrılması gibi zorlu durumlarda, ayrılma noktasının tespiti her model için değişmektedir. Dahası ayrılma sonrasında oluşan girdapların ve düzensiz akışın çözümü de bu modeller için farklılık göstermektedir. Bu tez kapsamında yapılması planlanan yüksek hücum açılı kanat etrafındaki akış uygulamalarında da buna benzer durumlarla karşılaşılması beklenmektedir. Bundan dolayı analizlerde kullanılacak türbülans modelinin gerçek sonuçlara en yakın değeri veren model olması istenmektedir. Sonuç olarak, tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ile NACA0015 profili için benzer şartlara sahip literatür çalışmalarına ait sonuçların elde edilen HAD analizi sonuçlarıyla kıyaslanması ve bu sonuçlara göre uygun türbülans modelinin belirlenmesi gerekmektedir. Bununla birlikte ilk etapta gerçekleştirilecek analizler için uygun çözüm ağı eleman sayısının belirlenmesi; türbülans modelinin tespiti sonrasında ise



ağ yapısındaki eleman sayısının yeterliliğinin araştırılması amaçlanmaktadır. Böylece jet aktüatörlü kanat için yapılacak HAD analizleri, uygun sayıda ağ elemanı ve uygun türbülans modeliyle gerçekleştirilecektir.

HAD analizlerinde kullanılacak birçok türbülans modeli arasından en uygun olanının belirlenmesi için öncelikle bazı kısıtlamalara gidilmesi gerekmektedir. İlk olarak belirlenen şart analizlerin 2B olarak gerçekleştirilmesidir. Bunun sebebi hem 3B analizlerin çözüm sürelerinin oldukça uzun olması hem de tasarlanan modelin 2B analiz modeline uygun bir yapıda olmasıdır. Bu aşamadan sonra türbülans modelleri arasında bir kısıtlama daha yapılarak DES modeline bağlı türbülans modellerinden birinin kullanılmasına karar verilmiştir. Bunun sebebi ise DES modelinin içerisindeki LES çözücüsü ile akış ayrılmasının olduğu kısımlarda oldukça doğru sonuçlara ulaşabilmesidir. DES içerisindeki RANS modelleri arasında yapılacak seçimde ise akış ayrılmasının yerinin doğru tespit edilmesi önemli olacaktır.

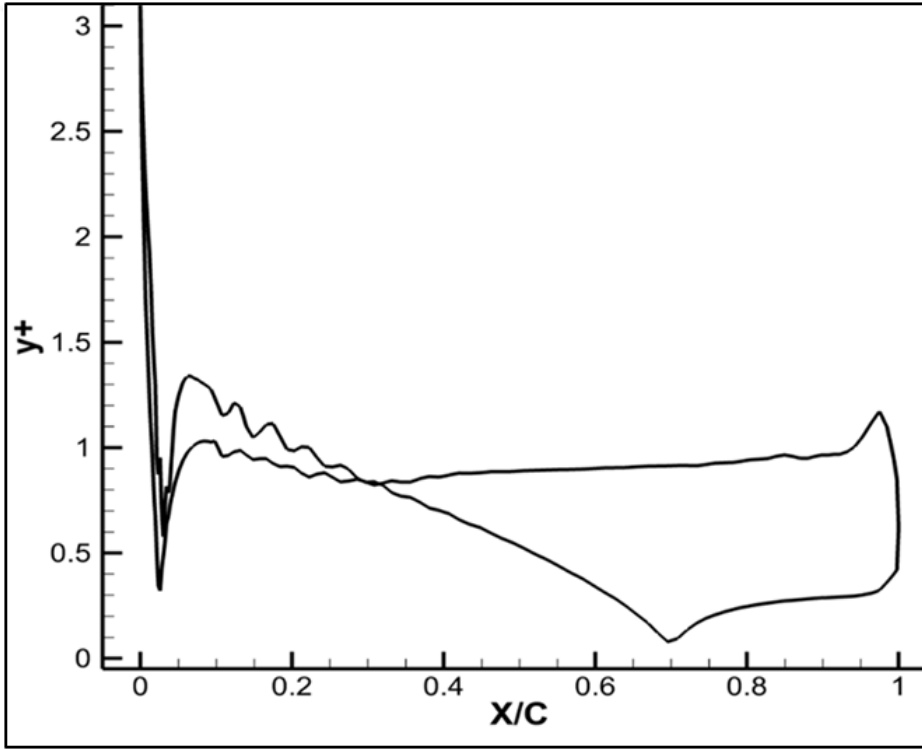
0-20 derece arasındaki 9 farklı hücum açısında gerçekleştirilecek olan HAD analizlerine başlamadan önce modele ait ağ yapısının oluşturulması gerekmektedir. Deneysel çalışma şartları ve sınırları göz önüne alınarak hazırlanan çözüm ağı yapısı Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.5** : Kontrolsüz NACA0015 kanat modeli için oluşturulan çözüm ağı yapısı.

Çözüm ağı içerisinde kullanılan eleman sayısı, daha önceki çalışmalardan elde edilen tecrübeyle yaklaşık 100 bin olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte çözüm ağı yapısı basınç ve hız değişimlerinin yüksek olduğu noktalarda yoğunlaştırılmıştır. Özellikle kanat üzerindeki sınır tabaka bölgesinde oldukça yoğun bir ağ yapısı kullanılmıştır. Buradaki yoğunluğun nedeni, belirlenen türbülans modellerinin sınır tabaka bölgesindeki ayrılmaları uygun bir şekilde tespit edebilmelerinin sağlanmasıdır. Bunun için denklem 4.1'de tanımlanan  $y^+$  katsayısının 1 civarında tutulması gerekmektedir (ANSYS Inc, 2014). Hazırlanan çözüm ağı içerisinde kanat profili yüzeyindeki  $y^+$  dağılımı Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

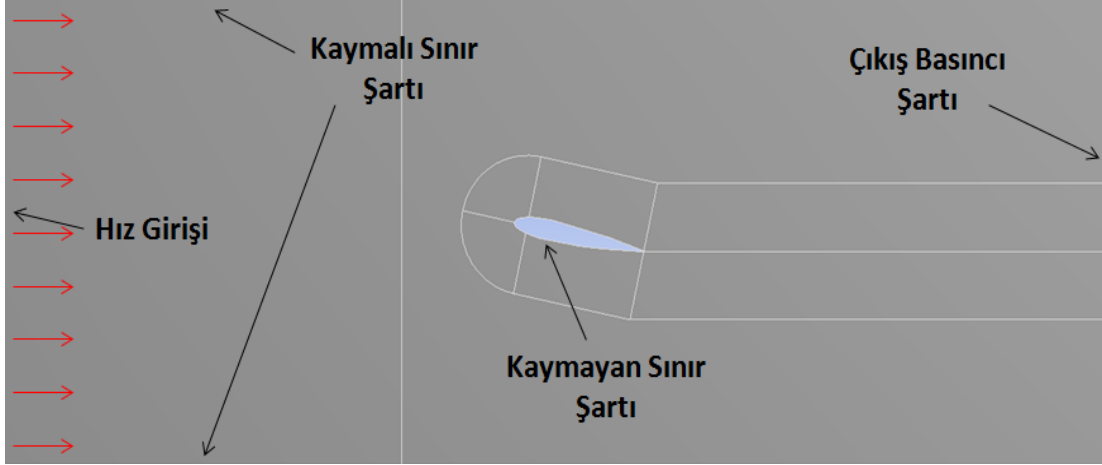
$$y^+ = \frac{\rho U \tau y_s}{\mu} \quad (4.1)$$



**Şekil 4.6 :** 12 derecelik hücum açısına sahip kontrolsüz kanadın analizi sırasında oluşan  $y^+$  dağılımı.

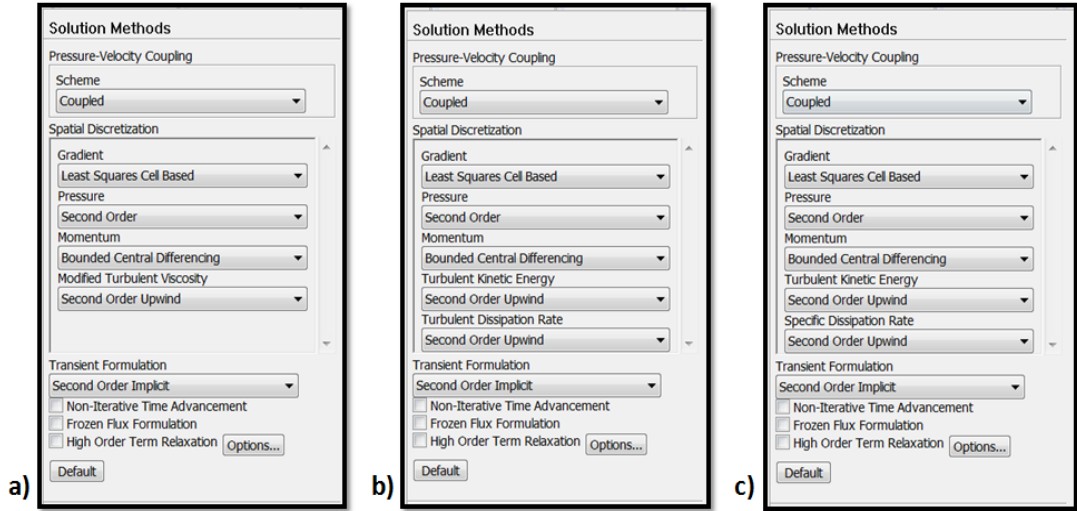
HAD analizleri için hazırlanan modellerde kanadın rüzgâr tüneline göre açısı, hücum açısına göre değiştiği için her bir hücum açısında farklı bir model ve ağ yapısı oluşturulmuştur. Bununla birlikte ağ yapısı elemanlarının yaklaşık sayısı ve modelin sınır koşulları aynı tutulmuştur. Şekil 4.7'de modelde belirlenen sınır koşulları gösterilmiştir. Buna göre tünelin duvar yüzeyleri üzerindeki sınır tabaka oluşumu ihmal edilirken kanat üzerindeki yüzeylerde bu ihmal tercih edilmemiştir. Bunun sebebi tünel duvarlarının, üzerinde oluşması beklenen sınır tabaka yüksekliğine

kıyasla kanada yeterince uzak bir konumda bulunması ve HAD analizi çözümlerine harcanan sürenin olabildiğince kısaltılmak istenmesidir.



**Şekil 4.7 :** Kontrolsüz NACA0015 kanat modeli için oluşturulan sınır koşulları.

Ağ yapısı ve sınır koşullarının hazırlanması sonrasında HAD analizlerinde kullanılacak sayısal çözüm yöntemlerinin belirlenmesine geçilmiştir. Buna göre zamana bağlı olarak çözdürülmesi planlanan analizlere ait seçimler Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Burada belirtilen çözüm yöntemleri, her bir türbülans modeli için olabildiğince birbirine yakın tutulmuştur.



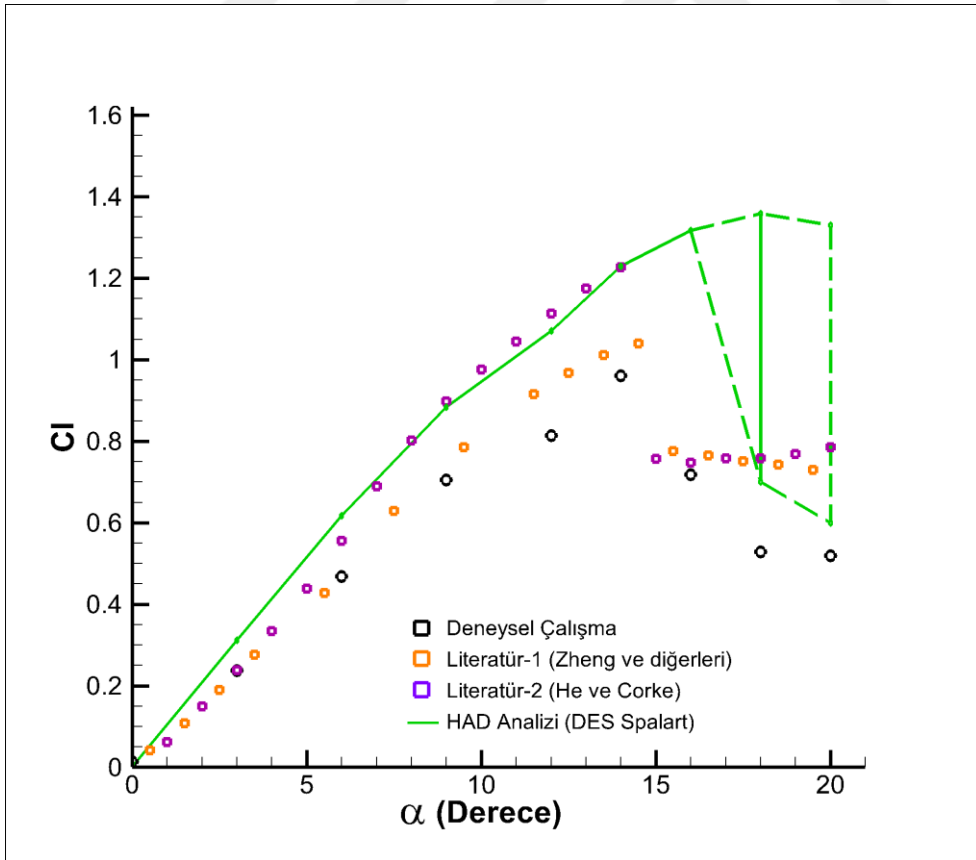
**Şekil 4.8 :** HAD analizleri içerisinde kullanılan sayısal çözüm metotları: a) DES / Spalart-Allmaras b) DES / k-e Rea. Enh. c) DES / k-w SST.

HAD analizlerinde verilen sınır şartları daha önceden gerçekleştirilen deneylerdeki sınır şartlarından alınmıştır. Analizlerde kullanılan zaman adımının büyüklüğü analiz içerisinde ve farklı hücum açılarına sahip modellerde farklılık göstermekle birlikte yaklaşık olarak 0.0001 sn civarındadır. Ayrıca analizler genellikle 1-2 saniye

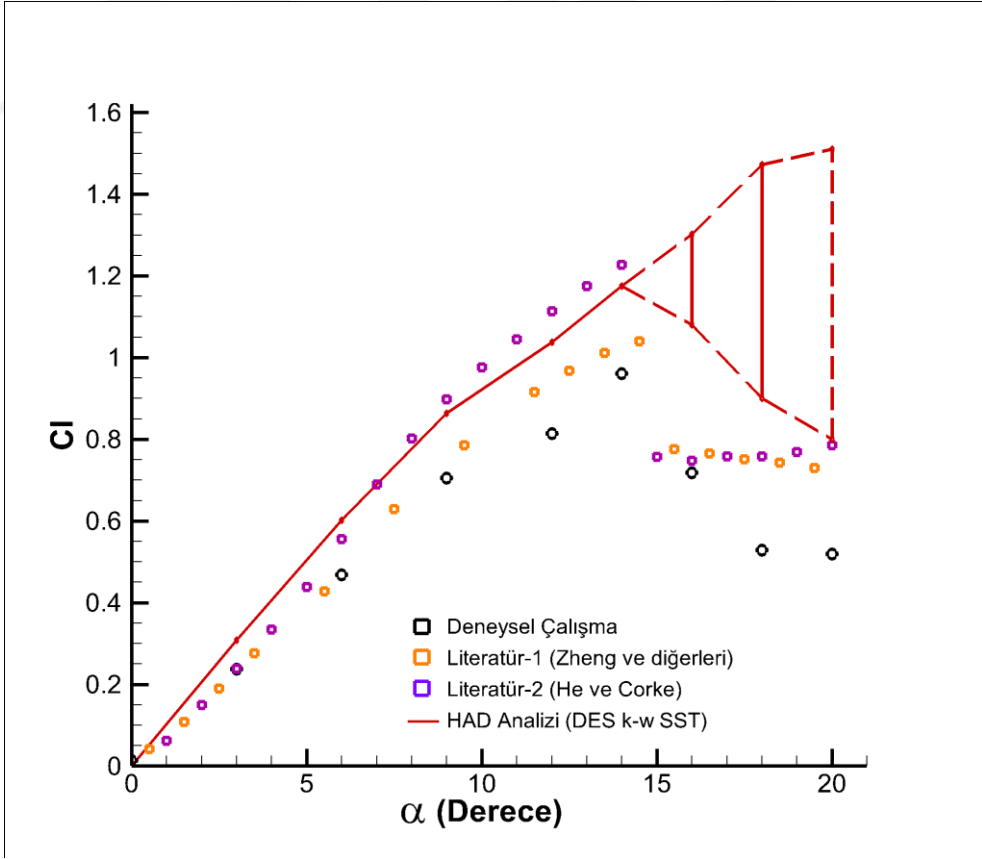
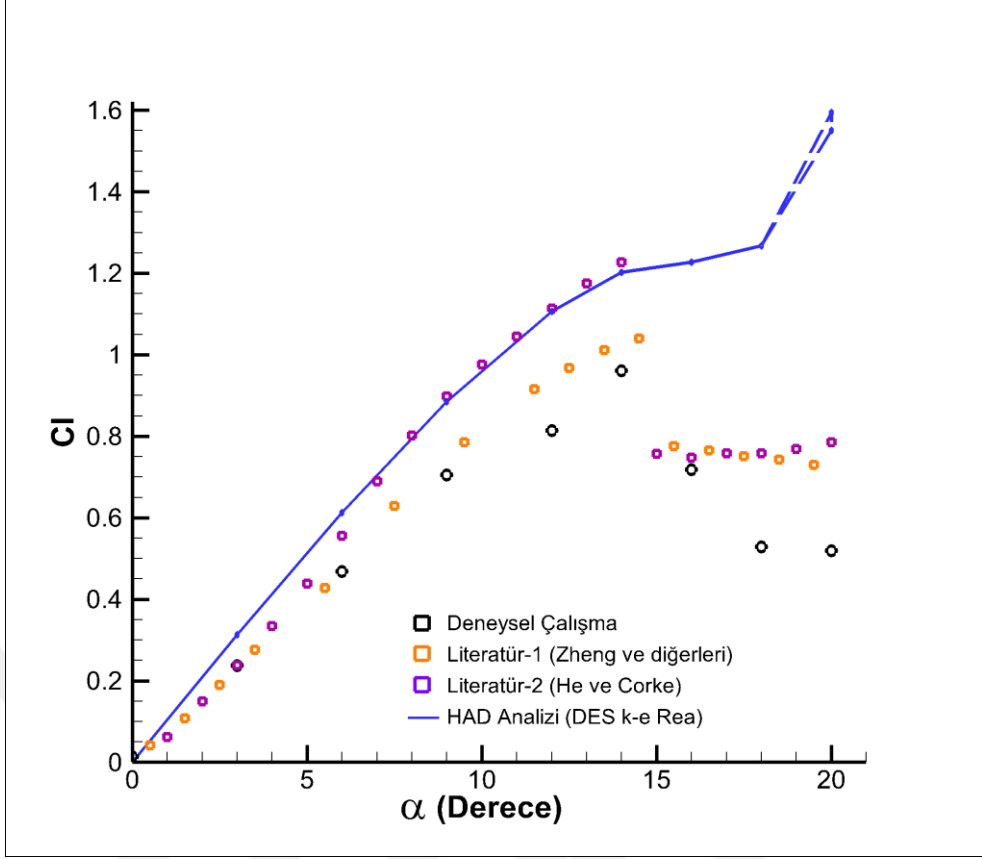
arasında değişen zaman aralığında ve akışın belli bir düzene oturmasıyla birlikte tamamlanmıştır.

#### 4.3 HAD Analizlerinde Kullanılacak Türbülans Modelinin Belirlenmesi

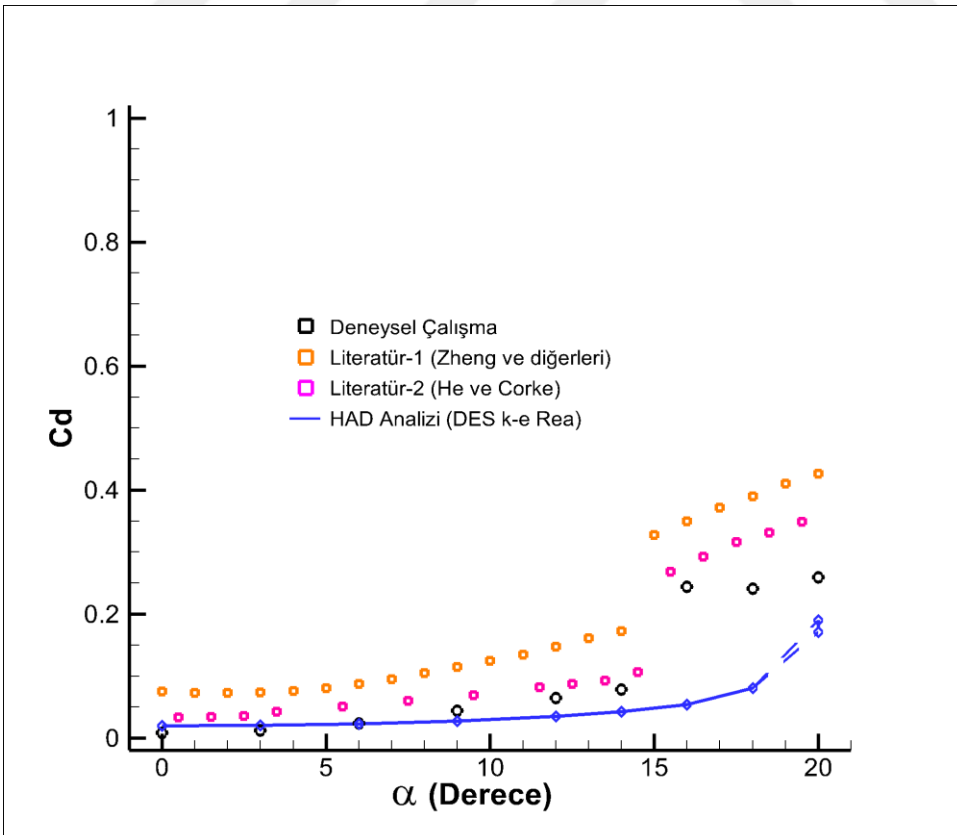
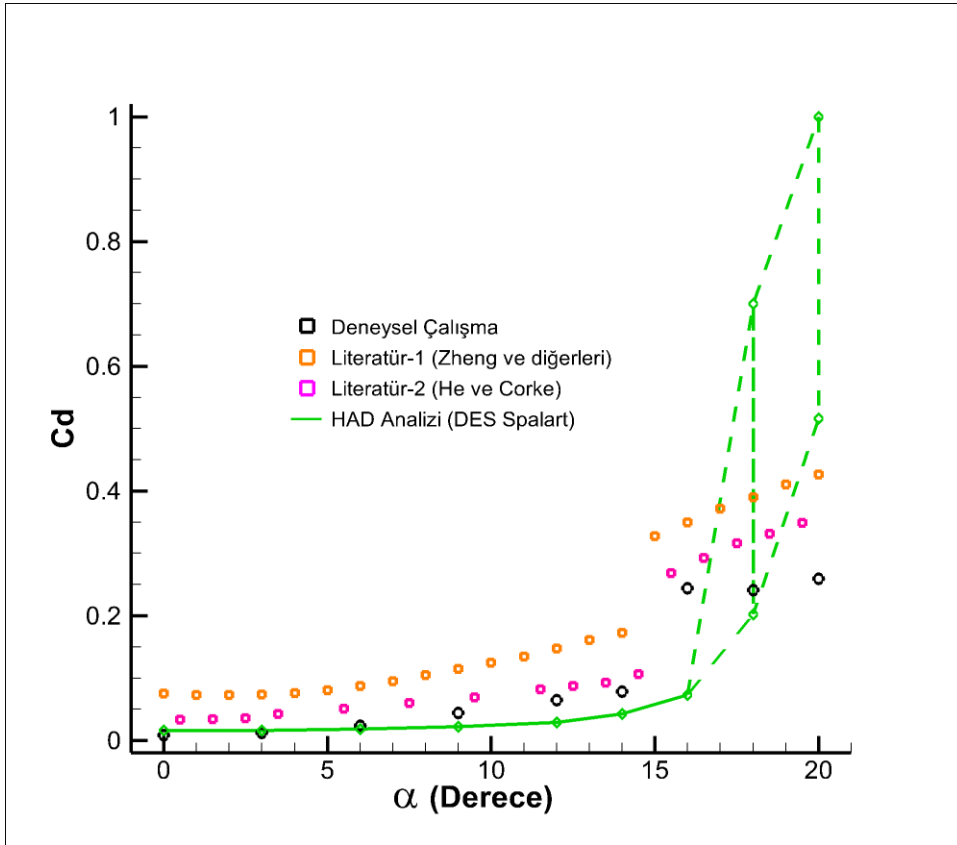
Kontrolsüz NACA0015 kanat profili üzerinde farklı türbülans modelleriyle gerçekleştirilen HAD analizlerinde elde edilen  $C_l$  ve  $C_d$  değerleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi DES türbülans modeli içerisinde hem LES çözücüsü hem de bir RANS çözücüsü bulunmaktadır. Burada RANS modeli için farklı seçenekler söz konusudur. Tez çalışmalarının gerçekleştirildiği ANSYS Fluent yazılımında DES içerisinde çalıştırılabilen 3 farklı RANS modeli bulunmaktadır. Bunlar "Realizable k-epsilon", "SST k-omega " ve "Spalart-Allmaras" türbülans modelleridir. Bu modeller kullanılarak yapılan HAD analizleri 0-20 derece arasındaki 9 farklı hücum açısında gerçekleştirilerek deney ve literatür sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Literatürdeki çalışmalar benzer Re sayılarındaki NACA0015 kanat profili deney sonuçlarına dayandırılmaktadır.



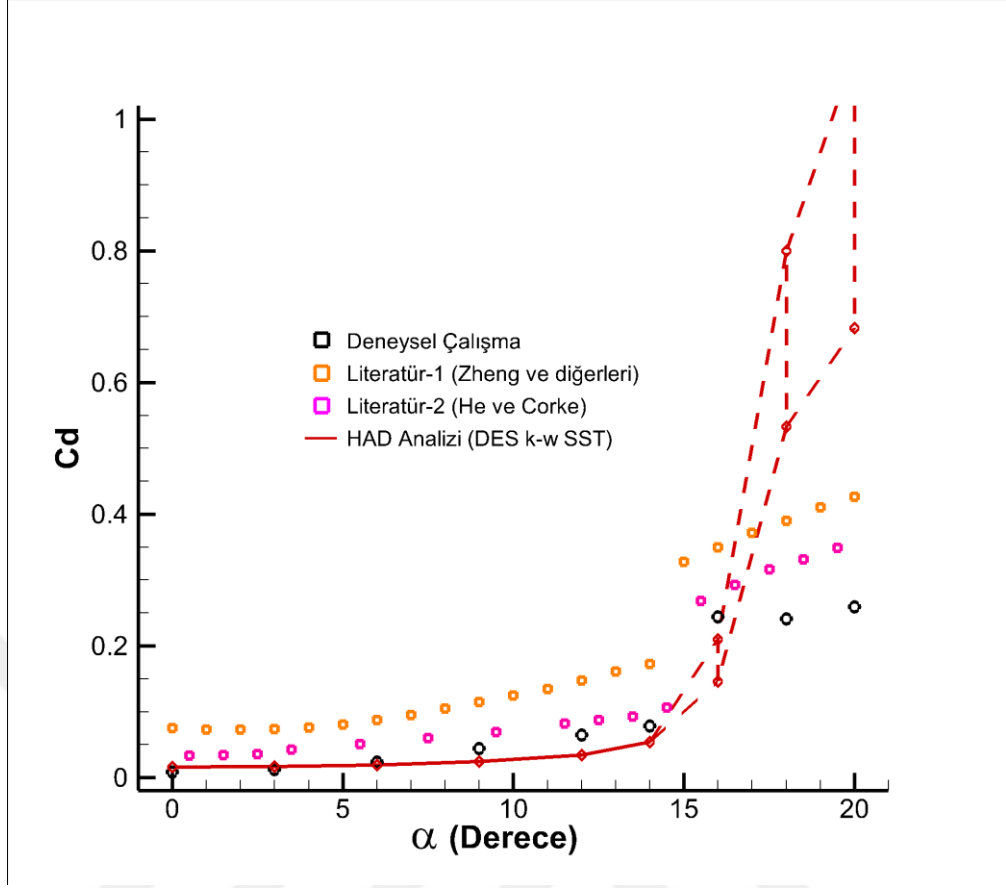
Şekil 4.9 : Taşıma katsayısı açısından HAD analizleri ile deney ve literatür sonuçlarının kıyaslanması (He ve Corke, 2009; Zheng ve diğ, 2018).



**Şekil 4.9 (devam) :** Taşıma katsayısı açısından HAD analizleri ile deney ve literatür sonuçlarının kıyaslanması (He ve Corke, 2009; Zheng ve diğ, 2018).



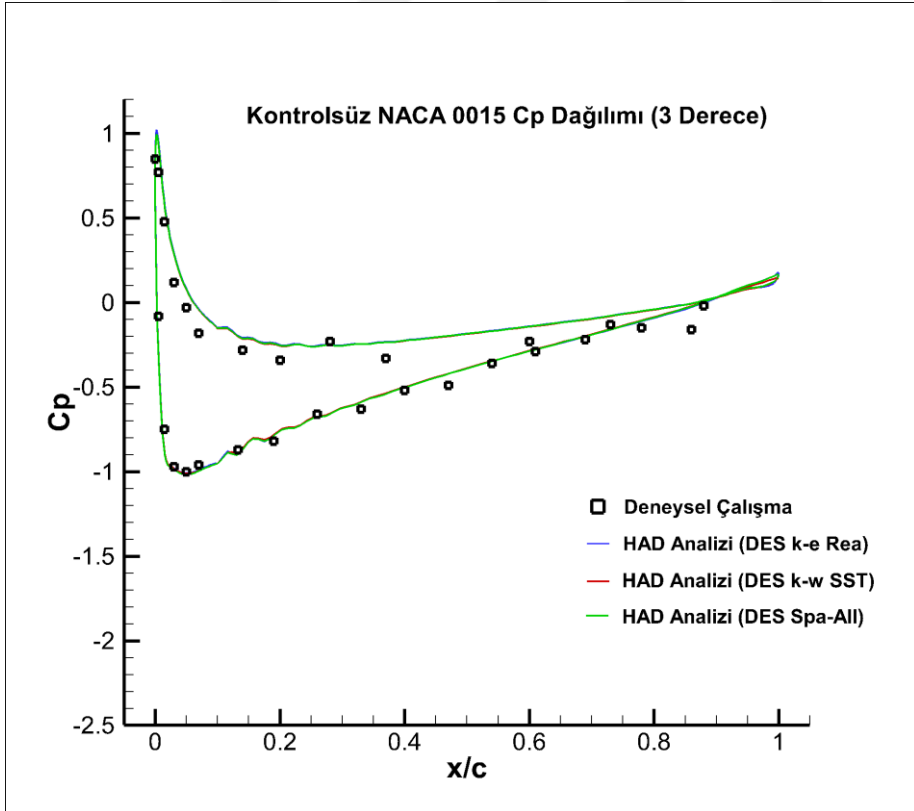
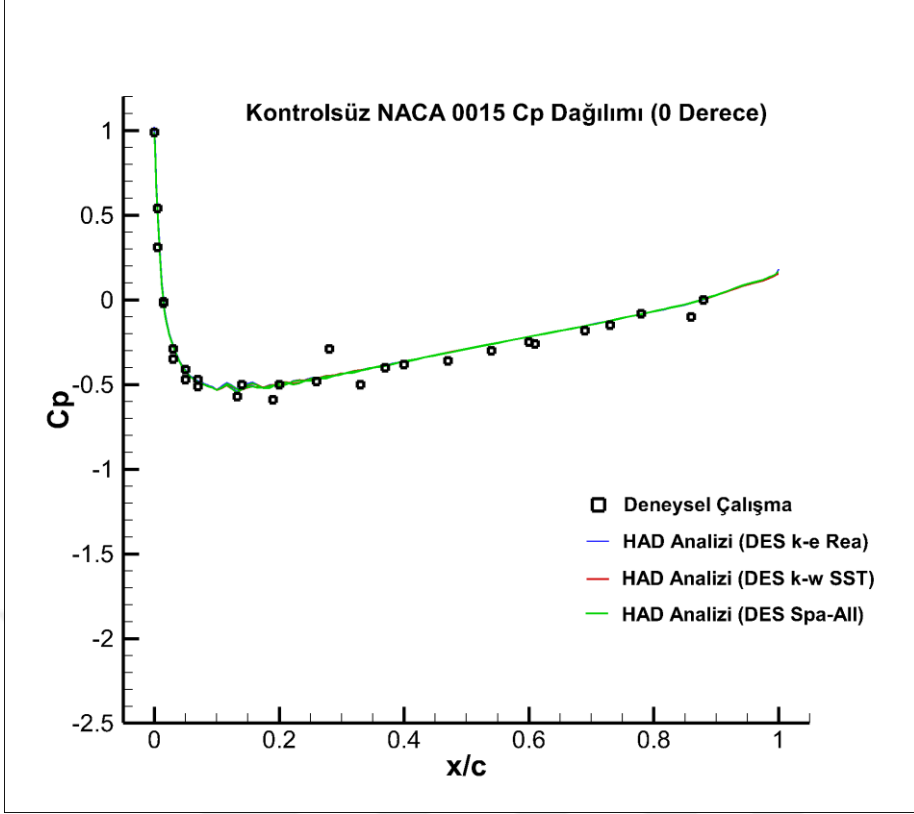
Şekil 4.10 : Sürüklenme katsayısı açısından HAD analizleri ile deney ve literatür sonuçlarının kıyaslanması (He ve Corke, 2009; Zheng ve diğ., 2018).



**Şekil 4.10 (devam) :** Sürüklenme katsayısı açısından HAD analizleri ile deney ve literatür sonuçlarının kıyaslanması (He ve Corke, 2009; Zheng ve diğ., 2018).

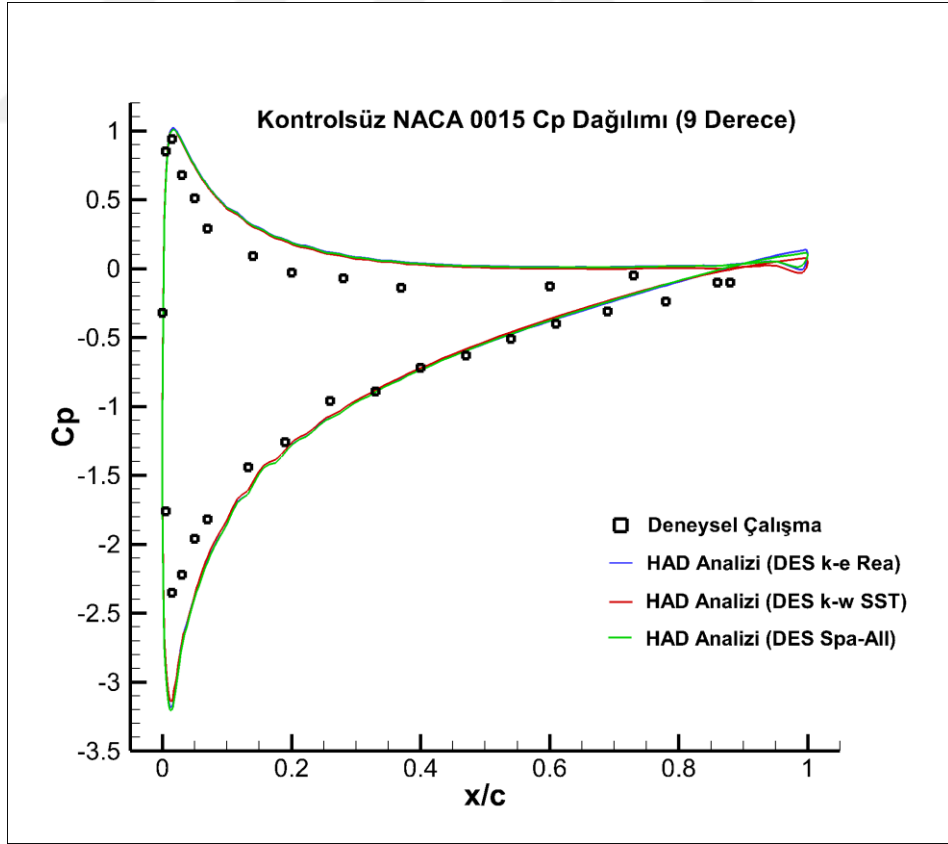
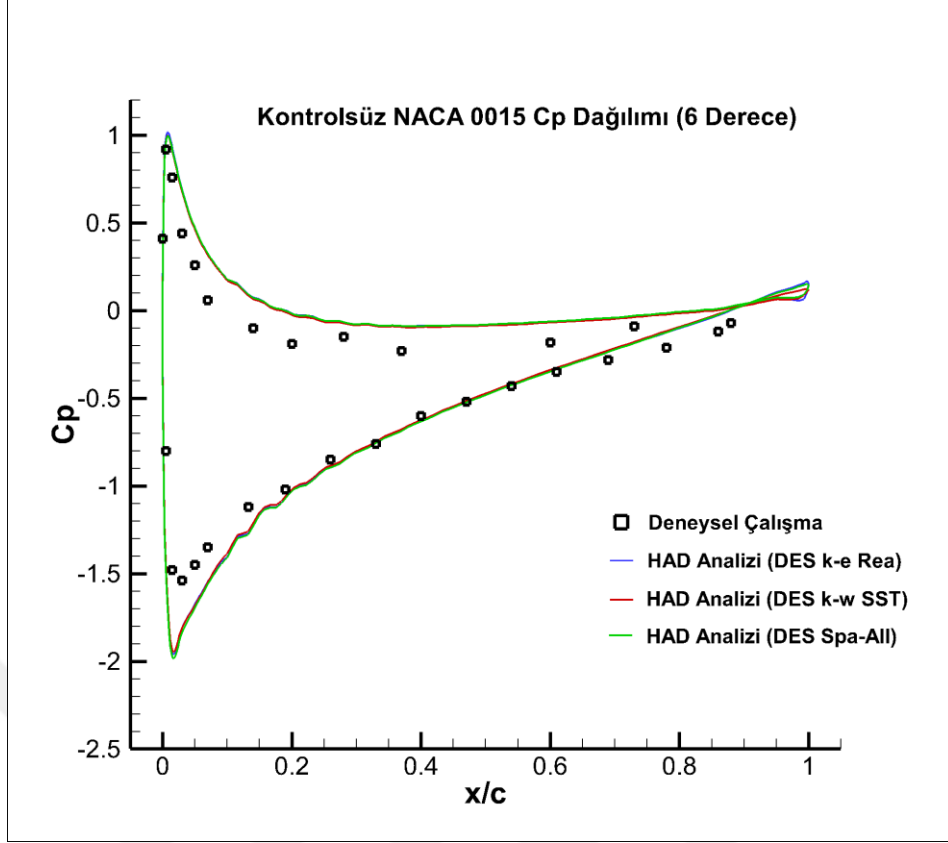
Deney ve HAD analiz sonuçlarını içeren grafikler incelendiğinde, sonuçlar arasında bazı farklar olduğu görülmektedir. Buna göre deneylerde elde edilen değerler ile literatürde tespit edilen benzer şartlardaki iki deneysel çalışmanın sonuçları arasındaki farklar, yüksek hücum açlarına doğru gidildikçe artmaktadır. Bunun sebebi kullanılan tünel boyutlarından kaynaklı blokaj faktöründeki farklar olabileceği gibi, deney sistemleri içerisinde yer alan kusur ve hatalar da olabilir. Bununla birlikte HAD analiz sonuçları kendi içerisinde incelendiğinde, düşük hücum açılarında elde edilen sonuçlar birbirlerine oldukça yakın gözükmeyle birlikte hücum açısının artması sonrası türbülans modellerinin verdiği sonuçlar değişmektedir. Burada deney ve literatür çalışmalarına en yakın sonuçlar k-w SST modeli kullanılan DES modeliyle elde edilmiştir. Özellikle bu modelin tutunma kaybı için hücum açısını en yakın şekilde tahmin eden model olduğu söylenebilir.

HAD analizleri ile deneyler arasında yapılan kuvvet karakteristikleri kıyasının yanı sıra kanat üzerindeki  $C_p$  dağılımları da kıyaslanmıştır. Buna göre Şekil 4.11'de HAD analizleri ile deneylere ait sonuçlar aynı grafikler üzerinde gösterilmektedir.

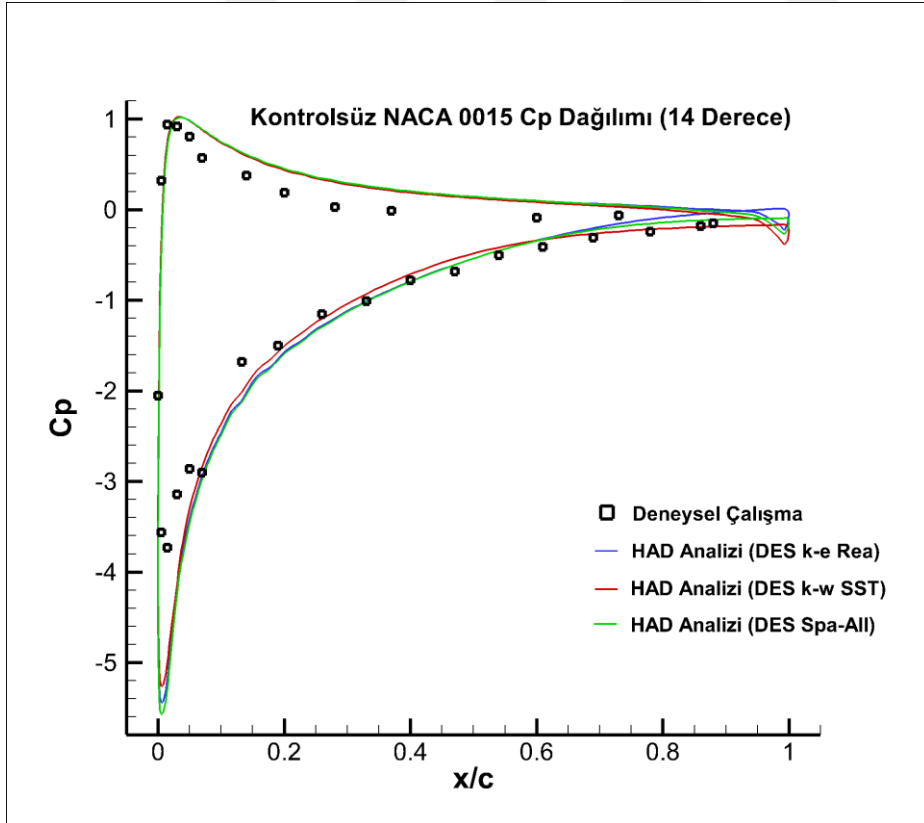
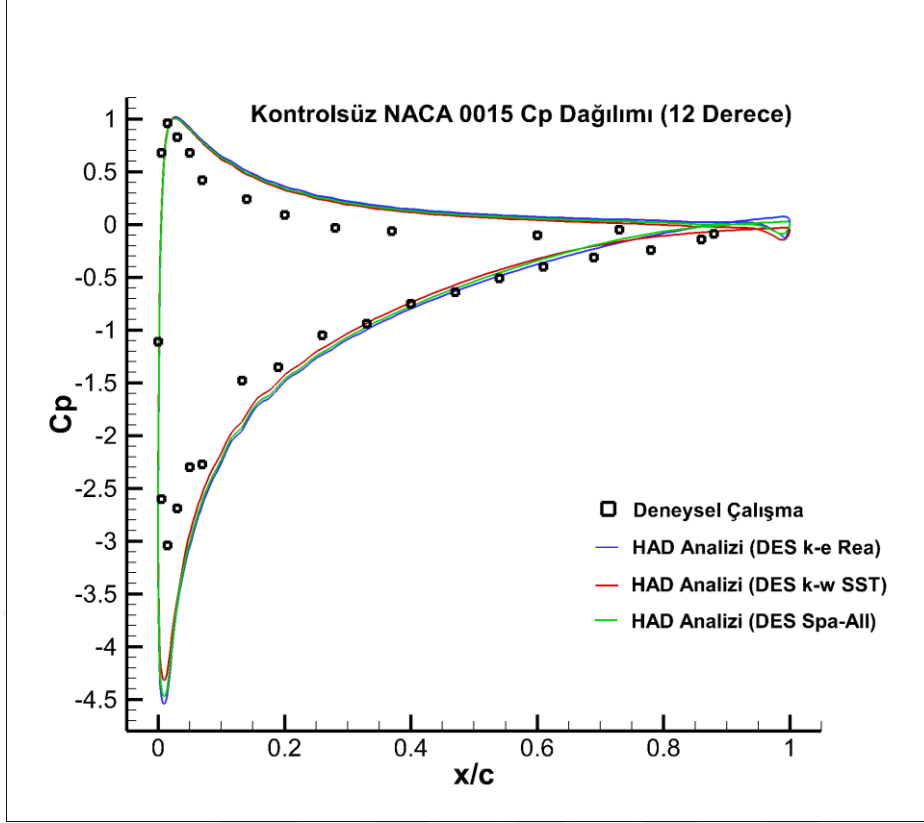


**Şekil 4.11 :** Kanat üzeri  $C_p$  dağılımı için HAD analizleri ile deney sonuçlarının kıyaslanması.

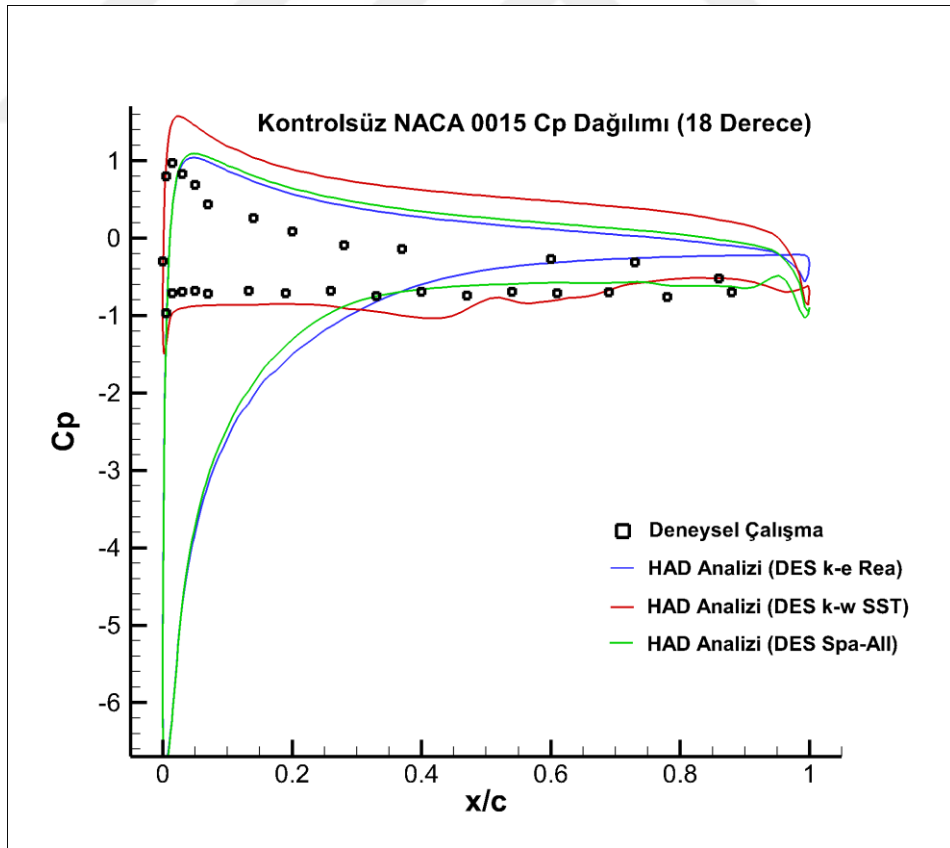
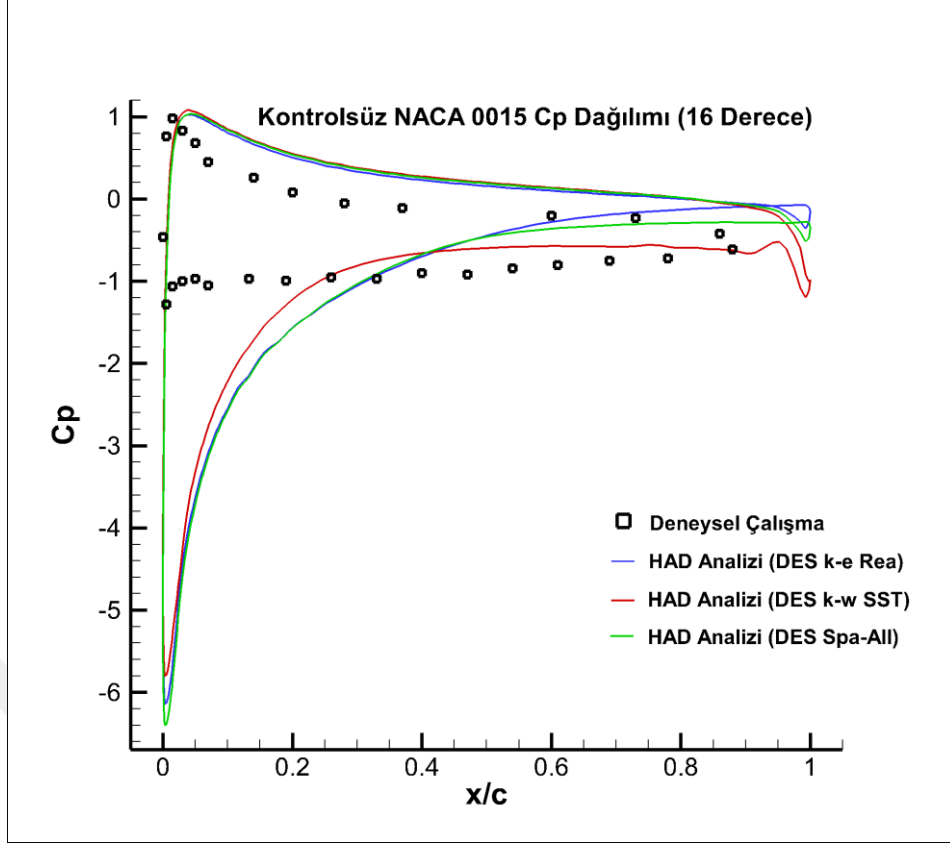




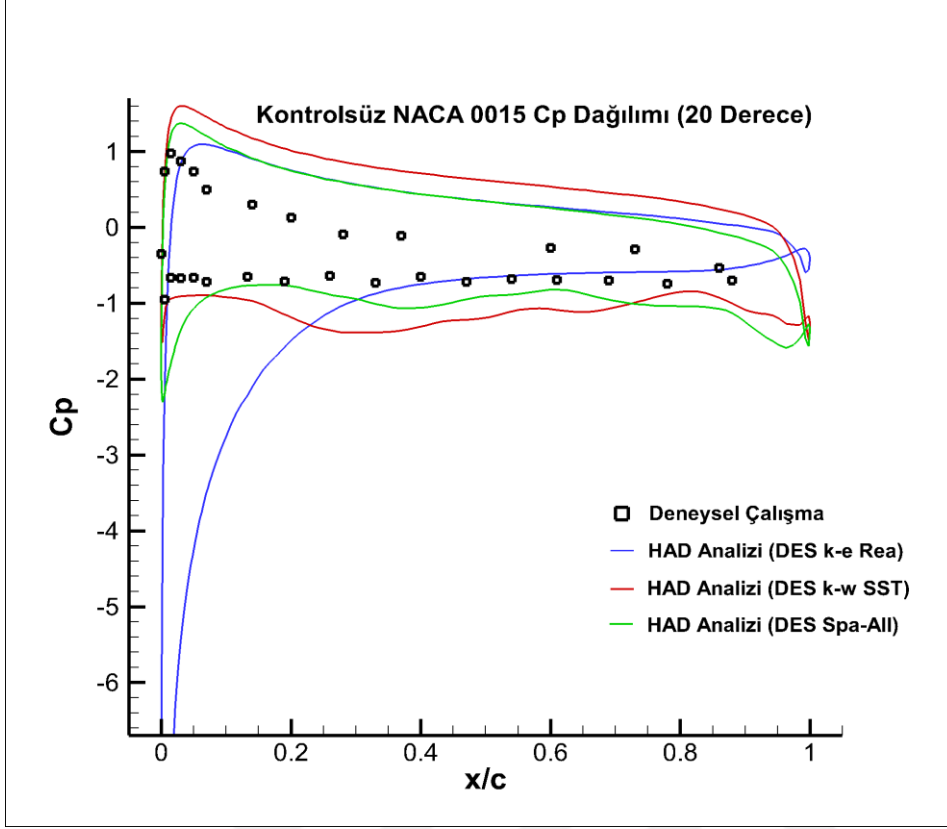
**Şekil 4.11 (devam) :** Kanat üzeri  $C_p$  dağılımı için HAD analizleri ile deney sonuçlarının kıyaslanması.



**Şekil 4.11 (devam) :** Kanat üzeri  $C_p$  dağılımı için HAD analizleri ile deney sonuçlarının kıyaslanması.



**Şekil 4.11 (devam) :** Kanat üzeri  $C_p$  dağılımı için HAD analizleri ile deney sonuçlarının kıyaslanması.



**Şekil 4.11 (devam) :** Kanat üzeri  $C_p$  dağılımı için HAD analizleri ile deney sonuçlarının kıyaslanması.

Farklı türbülans modelleri ile gerçekleştirilen HAD analizlerinin kanat etrafındaki  $C_p$  dağılım sonuçları deney sonuçlarıyla birlikte incelendiğinde, iki çalışmadaki sonuçların değişen hücum açısına göre farklılık gösterdiği söylenebilir. Özellikle 12 derecelik hücum açısına kadar olan kısımda türbülans modellerinin vermiş olduğu sonuçlar birbirine çok yakın durmaktadır. Bununla birlikte bu açıya kadar olan grafikler incelendiğinde, HAD analizleri ile deney sonuçları arasındaki farkın artan hücum açısına göre büyüdüğü görülebilir. Kanadın basınç kenarı ile vakum kenarının giriş bölgesinde bu farkın daha fazla olduğu söylenebilir. Hücum açısındaki artışlarla birlikte bahsedilen bölgelerdeki farklar da artmaktadır. Bununla birlikte 16 dereceye kadar olan kısımda kanadın vakum kenarında ve kuyruk çevresindeki sonuçlar türbülans modellerine göre değişmeye başlamıştır. Bu açıdan sonra kanat üzerinde oluşmaya başlayan tutunma kaybı durumunun deneysel çalışmalardaki karşılığına en yakın cevabı k-w SST içeren DES modelinin verdiği görülmüştür. Özellikle 18 derecelik hücum açısında ortaya çıkan sonuçlarla birlikte bu modelin çoğu hücum açısında daha başarılı sonuçlar elde ettiği söylenebilir. Böylece deneylerle en yakın sonuçları veren bu modelin sonraki analizlerde kullanılmasına karar verilmiştir.

#### 4.4 HAD Analizlerinde Kullanılacak Çözüm Ağı Sıklığının Belirlenmesi

HAD analizlerinde kullanılacak türbülans modelinin belirlenmesi sonrasında, çözüm ağı sıklığının analiz sonuçlarına olan etkisi incelenmiştir. Buna göre ilk etapta yaklaşık 100 bin ağ elemanı üzerinden gerçekleştirilen ve DES / k-w SST modeli kullanılan analizler, daha düşük sayıda ağ elemanı kullanılarak tekrar edilmiştir. Çözüm ağı eleman sayısının azaltılması  $y^+$  değerinin sabit tutulması ve ağ yapısı içerisindeki elemanların alan içerisine dağılım oranının değişmemesi şartlarıyla azaltılmıştır. Bu değişiklikler ile birlikte yapılan analizler sonrası elde edilen kuvvet karakteristiklerinin değerleri ve en sık çözüm ağı sonuçlarına göre ortaya çıkan değişim miktarı Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Burada 0 derece hücum açısındaki taşıma katsayılarının değişim oranı yazılmamıştır. Bunun sebebi elde edilen değerler arasındaki farkın sayısal olarak çok düşük olmasına rağmen, oransal açıdan bakıldığında anlamsız şekilde büyük gözükmesidir. Bu durum sayısal değerlerin sifıra yakın olması nedeniyle oluştuğu için aradaki farkı yansıtan oranlar tabloya yazılmamıştır.

**Çizelge 4.1** : Ağ yapısındaki eleman sayısının değişimine göre  $C_1$  katsayıları.

Hücum Açısı	Çözüm Ağı Eleman Sayısına Göre $C_1$ Değerleri			
	100000	75000	50000	25000
0	0,00095	0,00019	0,00055	0,00062
3	0,30806	0,30566 (-%0,78)	0,28575 (-%7,24)	0,28252 (-%8,29)
6	0,60176	0,59677 (-%0,83)	0,56941 (-%5,38)	0,56328 (-%6,39)
9	0,86382	0,85288 (-%1,27)	0,83162 (-%3,73)	0,82111 (-%4,94)
12	1,03749	1,03591 (-%0,15)	1,05132 (+%1,33)	1,06122 (+%2,29)
14	1,17537	1,14618 (-%2,48)	1,11425 (-%5,20)	1,06794 (-%9,14)

**Çizelge 4.2 :** Ağ yapısındaki eleman sayısının değişimine göre  $C_d$  katsayıları.

<b>Hücum Açısı</b>	<b>Çözüm Ağı Eleman Sayısına Göre <math>C_d</math> Değerleri</b>			
	<b>100000</b>	<b>75000</b>	<b>50000</b>	<b>25000</b>
<b>0</b>	0,01591	0,01593 (-%0,13)	0,01595 (-%0,25)	0,01593 (-%0,13)
<b>3</b>	0,01659	0,01662 (-%0,18)	0,01658 (+%0,06)	0,01659 (+%0,00)
<b>6</b>	0,01894	0,01883 (+%0,58)	0,01873 (+%1,11)	0,01880 (+%0,74)
<b>9</b>	0,02438	0,02418 (-%0,82)	0,02377 (-%2,50)	0,02386 (+%2,13)
<b>12</b>	0,03415	0,03390 (+%0,73)	0,03461 (-%1,35)	0,03554 (-%4,07)
<b>14</b>	0,05381	0,05113 (+%4,98)	0,04927 (+%8,44)	0,04725 (+%12,19)

Sonuçlar incelendiğinde 75 bin elemana sahip model ile 100 bin elemana sahip model arasındaki farkın  $C_l$  sonuçları için %3'ün,  $C_d$  sonuçları için %5'in altında olduğu belirtilebilir. Bu fark göz ardı edilebilir düzeydedir ve 75 bin elemana sahip modelin analizlerde kullanılması yeterli gözükmemektedir. Ağ yapısı eleman sayısının az olması işlem yükünü azalttığı için analiz sürelerini de kısaltmaktadır. Bu sebeple bundan sonraki adımda gerçekleştirilecek jet aktüatörlü kanat analizlerinde genel yapı için 75 bin ağ elemanına sahip ağ yapısının esas alınması kararlaştırılmıştır. Buna göre akış alanı içerisinde kanat çevresinin dışında kalan bölgelerde, belirlenen ağ eleman sayısı için bu bölgelerde kullanılan ağ eleman sıklığının aynı şekilde kullanılması düşünülmektedir. Bununla birlikte jet aktüatörün çalışma durumunda ortaya çıkan jet akışının oluşturacağı hız bölgelerinin, kanat etrafındaki basınç değişimini arttırması beklenmektedir. Bu durumda kanat çevresi için kontrolsüz kanat profilinde kullanılan ağ yapısının yeterli doğruluğu veremeyebileceği ve buradaki ağ yapısının sıklaştırılması gerektiği düşünülmektedir. Sonuç olarak kontrolsüz modelde kullanılan 75 bin elemana sahip ağ yapısının genel olarak kontrollü kanat modelinde de kullanılması, ancak kanat çevresindeki ağ sıklığının daha da arttırılması planlanmaktadır.

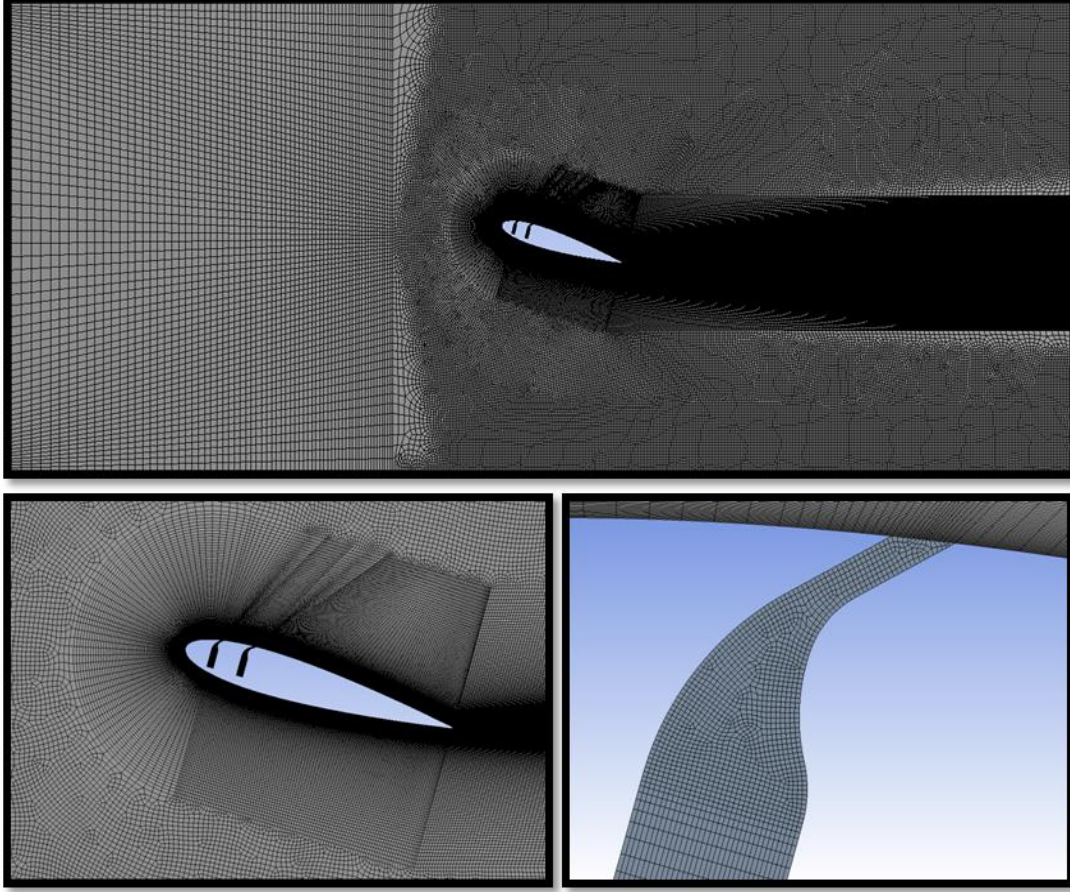
## 4.5 Jet Aktüatörlü Kanat için HAD Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

### 4.5.1 Jet aktüatörlü kanat için çözüm ağının oluşturulması

KontROLSÜZ kanat için yapılan HAD analizlerinin tamamlanması sonrasında jet aktüatörlü kanat analizi için ağ yapısının oluşturulması çalışması başlamıştır. Akış kontrollü analizlerde çözüm süresinin oldukça uzun olması ve jet aktüatörün kanat performansına olan etkisinin, deneylerde görüldüğü üzere, düşük hücum açılarında çok yüksek olmaması sebebiyle analizlerin 16 ve 18 derecelik hücum açılarında gerçekleştirilmesi kararlaştırılmıştır. Buna göre iki hücum açısında 3 farklı aktüatör frekansı için 6 farklı analiz oluşturulmuştur. Analizler k-w SST içeren DES türbülans modeli ile yapılmış ve buradaki ağ yapısı kontrollsüz analizlerde kullanılan ağ yapısına referansla oluşturulmuştur.

Kontrollü kanat profili analizleri için oluşturulan ağ yapısı Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Burada kontrollsüz kanat için hazırlanan ağ yapısına ek olarak, jet aktüatörün piston odası için yeni bir ağ yapısı oluşturulmuş ve jetin çıkış yarıkları çevresindeki ağ elemanlarının sıklığı arttırılmıştır. Piston odası içerisinde hazırlanan ağ yapısının yarık çıkışına yakın bölgelerde yoğunlaştığı şekil üzerinde görülmektedir. Bununla birlikte kanat etrafındaki ağ yapısının eleman sayısında da ciddi bir arttırmaya gidilmiştir. Ağ yapısının eleman sayısında gerçekleştirilen artışların sebebi jet çıkışında ve çevresinde oluşacak girdapların daha doğru bir şekilde çözümlenmesinin sağlanmasıdır. Böylece kanadın tutunma kaybı durumuna geçip geçmeyeceği gibi zor bir problemin çözümünde de daha düzgün bir model ortaya koyulmaktadır. Diğer taraftan kanat çevresindeki ağ yapısının aksine çözüm geometrisinin birçok bölümünde önceki ağ yapısı birebir kullanılmıştır. Böylece akış şartlarının çok fazla değişmediği bu alanlarda uygun sayıda eleman sayısı kullanılmış ve gereksiz şekilde oluşabilecek zaman kaybının önüne geçilmiştir.

Kontrollü kanat için hazırlanan modelin ağ yapısı eleman sayısı yaklaşık olarak 150 bin civarındadır. Bununla birlikte bu modelde de kanat yüzeyindeki  $y^+$  değerleri kontrollsüz kanat modelinde olduğu gibi 1 civarında tutulmuştur. Böylece DES içerisinde çözdürülen k-w SST türbülans modeli için uygun bir sınır tabaka ağ yapısı oluşturulmuştur.

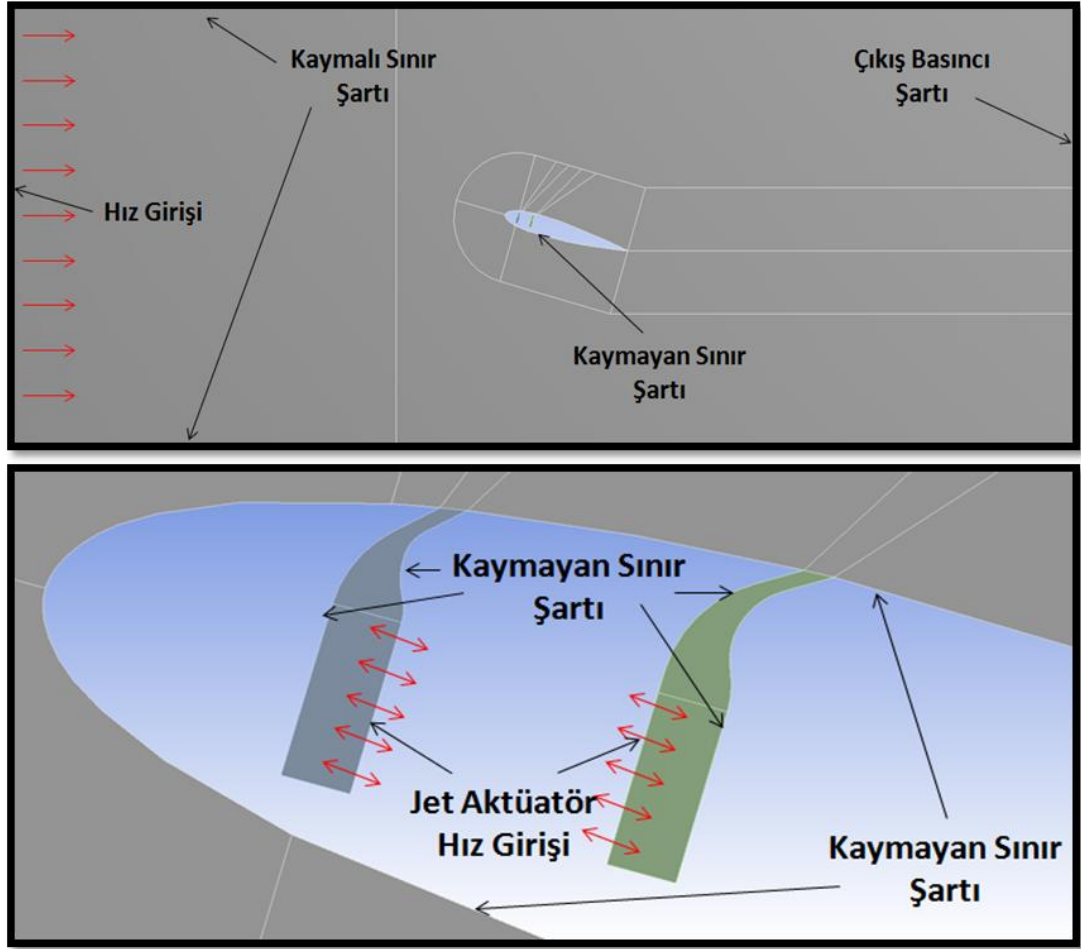


**Şekil 4.12 :** Çift yarıklı jet aktüatörlü NACA0015 kanat modeli için oluşturulan çözüm ağı yapısı.

#### **4.5.2 Jet aktüatörlü kanat için HAD analizi sınır şartlarının belirlenmesi**

Jet aktüatörlü model için ağı yapısının oluşturulmasından sonra sınır şartlarının belirlenmesi aşamasına geçilmiştir. Sınır şartlarının genel olarak daha önceden kontrolsüz kanatta uygulandığı şekliyle korunduğu söylenebilmekle birlikte jet aktüatörün çıkış kısmına yeni sınır şartlarının eklendiği söylenebilir. Burada aktüatör odasındaki piston yüzeyi Montazer ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi hareketli ağı yapısı ile modellenmemiş, ancak You ve Moin (2008) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi hız giriş sınır şartı olarak belirlenmiştir. Bunun temel sebebi ise çözüm için harcanan sürenin azaltılmasıdır. Ayrıca bahsedilen literatür çalışmalarında da görüldüğü üzere, piston yüzeyi üzerine hız giriş şartının verilmesi durumunda elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla oldukça yakın olduğu söylenebilir. Şekil 4.13'te jet aktüatörlü aktif kontrol yöntemine sahip NACA0015 kanat profilinin tünel içerisindeki sınır şartları gösterilmektedir.





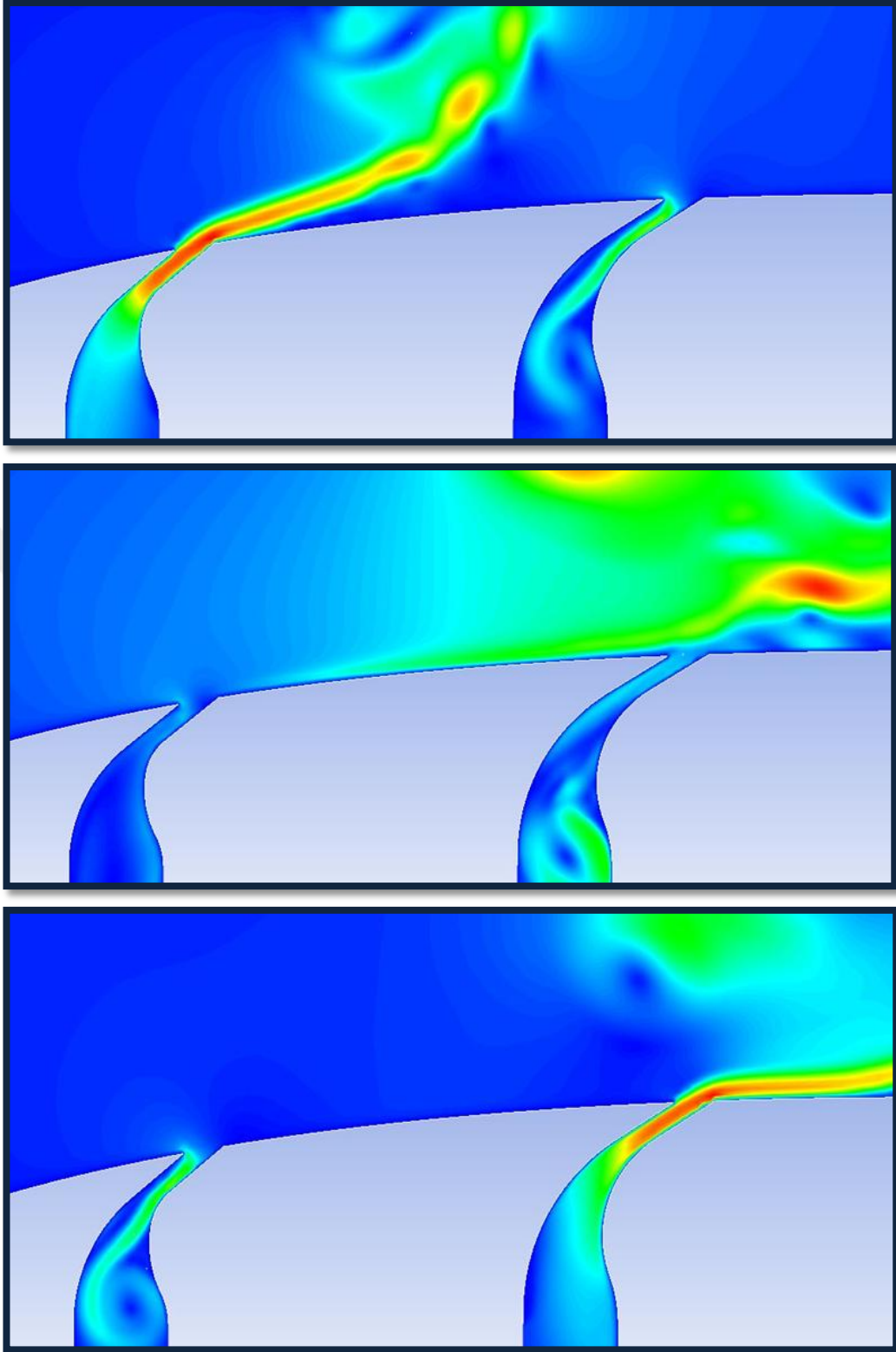
**Şekil 4.13** : Çift yarıkli jet aktüatörlü NACA0015 kanat modeli için oluşturulan sınır koşulları.

Deneylerde kullanılmak üzere tasarlanan kanat içerisindeki jet aktüatöre ait yarık çıkış hızı değerleri deneysel çalışmalar içerisinde gösterilmiştir. Hız değerlerinin yarık çıkışındaki farklı noktalardan gelen verilerin ortalaması olarak elde edilmesi ile jet çıkış hızına ait bir fonksiyonun oluşturulması mümkün olmuştur. Ancak yarık çıkışı için elde edilen değerlerin HAD analizlerinde kullanılabilmesi için piston yüzeyi üzerine aktarılması gerekmektedir. Bu dönüşüm için piston uzunluğunun yarık çıkışı genişliğine oranı kullanılmalıdır. Böylece daha önceki bölümde denklem 3.2 olarak tespit edilen yarık çıkış hızına ait zamana bağlı fonksiyon, her iki piston üzerinde farklı şekillerde olmak üzere, hız sınır şartı olarak kullanılmak üzere dönüştürülmüştür. Denklem 4.2 ve denklem 4.3'te verilen fonksiyonlar ön ve arka piston üzerinde jet aktüatörü temsilen kullanılacak hız sınır şartlarını göstermektedir. Aralarındaki faz farkı ise sistemin çalışması sırasında iki yarık çıkışının zıt çalışma durumunu temsil etmektedir. Böylece bir piston yüzeyinde basma işlemi gerçekleştirilirken diğesinde emme işlemi gerçekleştirilebilecektir.

$$U_1(f, t) = \frac{U_{\infty} f}{1000} (3,7 \sin(2\pi f t) - 0,4 \cos(2\pi f t) - 1,7 \cos(2\pi f t)^2 + 1,7) \quad (4.2)$$

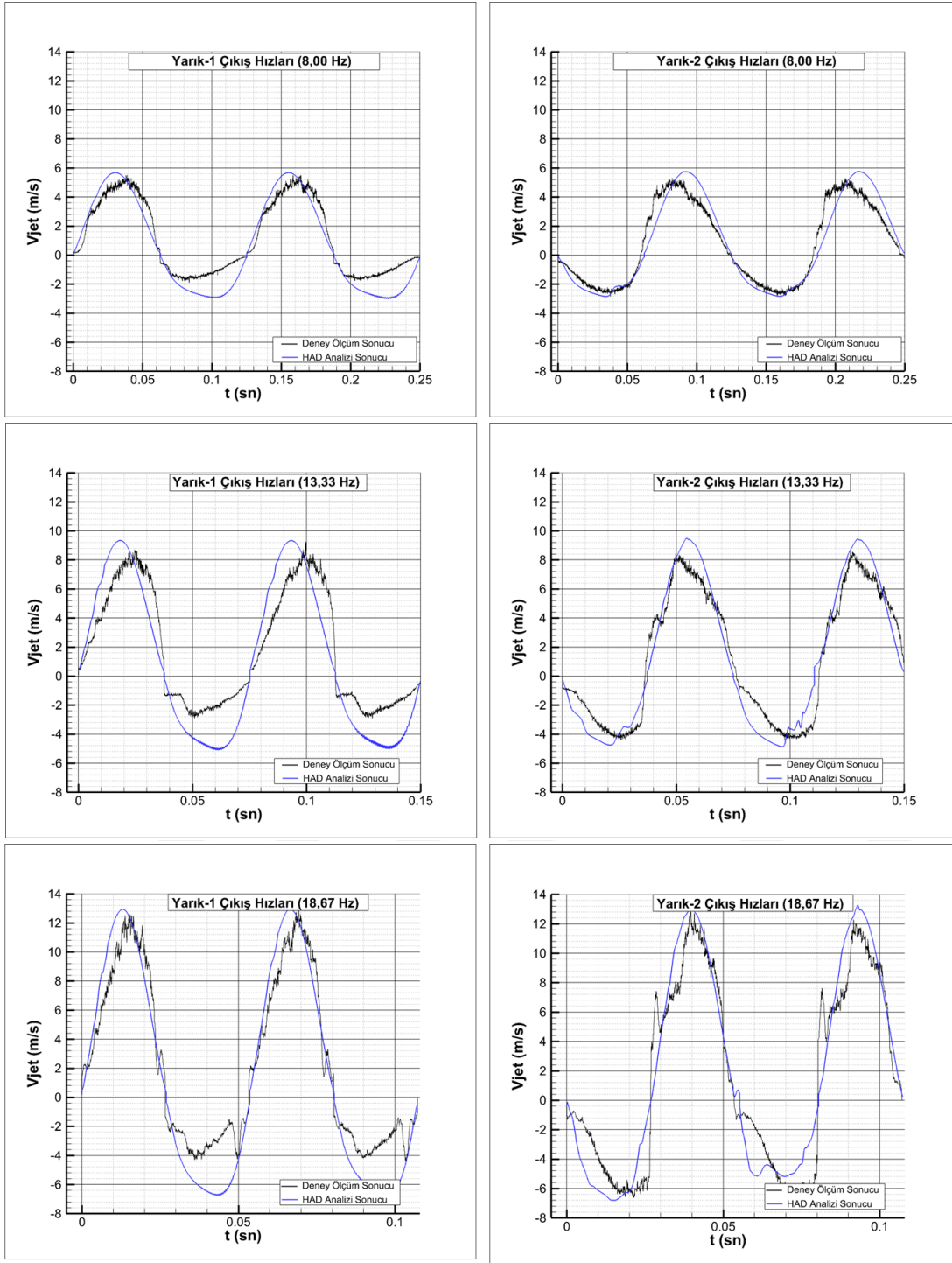
$$U_2(f, t) = \frac{U_{\infty} f}{1000} (3,7 \sin(2\pi f (t - \frac{1}{2f})) - 0,4 \cos(2\pi f (t - \frac{1}{2f})) - 1,7 \cos(2\pi f (t - \frac{1}{2f}))^2 + 1,7) \quad (4.3)$$

Kanat içerisindeki jet sınır şartı için zamana bağlı hız değerlerini veren bu fonksiyonlar, ANSYS Fluent programında bulunan UDF komutu ile okunacak şekilde kodlanmıştır. Hazırlanan kod üzerinde her iki fonksiyon da bulunmakta ve farklı sınır şartları olarak ayrılmaktadır. Jet aktüatörün piston yüzeylerini modelleyen bu fonksiyonların kontrollü kanat analizlerinde kullanılmasından önce, deneylerde elde edilen jet çıkış hızı ölçümleriyle kıyaslanması ve çıkan sonuçların gerçeğe yakınlığının teyit edilmesi gerekir. Bu nedenle yarık çıkış hızlarının ölçüldüğü deneylerde olduğu gibi kanat etrafında akışın olmadığı bir ortam için kanat içerisindeki jet çalışması modellenmiş ve sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.14'te bu analizlerde elde edilen yarık çıkışındaki emme-basma durumuna ait akışın hız dağılımları gösterilmektedir. Şekilde verilen her görüntü arasındaki süre farkı pistonun periyodunun dörtte biri süresi (T/4) kadardır. Buna göre ilk gösterilen şekilde, pistonun sola doğru hareketi sırasında en yüksek hareket hızına ulaşması anındaki akış hızı dağılımları gösterilmektedir. Bu durumda ilk yarık çıkışında en yüksek basma hızları, ikinci yarık çıkışında ise en yüksek emme hızları oluşmaktadır. İkinci resimde piston sola doğru hareketinin en son noktasına gelmiş ve geri dönüş geçme anındadır. Hazırlanan fonksiyonlarda piston üzerindeki hız sınır şartında buradaki çıkış hızları sıfıra yakın gösterilmektedir. Böylece her iki yarıkta da piston tarafından gelen bir emme-basma durumu yaşanmamaktadır. Son resimde ise pistonun sağa doğru hareketi sırasında ulaştığı en yüksek hızın oluşturduğu akış hızı dağılımı gözükmektedir. Bu durumda ilk yarık çıkışında en yüksek emme hızları, ikinci yarık çıkışında ise en yüksek basma hızları oluşmaktadır. Bu hareketten sonra piston sağa doğru olan hareketini yavaşlayarak tamamlamakta ve yeniden sola doğru yaptığı hareketine başlatmaktadır. Böylece piston hareketinin bir periyodu tamamlanmaktadır. Bununla birlikte bahsedilen tüm bu piston hareketleri, HAD analizi çerçevesindeki çalışmalar içerisinde piston üzerine eklenen hız sınır şartları ile gerçekleştirilmektedir.



**Şekil 4.14 :** Kanat içerisindeki jet aktüatörün çalışması ile yarık çıkışında oluşan hız dağılımları.

Belirlenen fonksiyonun HAD analizleri içerisinde uygulanması ile ortaya çıkan yarık çıkış hızlarının deney sonuçlarıyla kıyaslanması Şekil 4.15'te verilmiştir. Burada 3 farklı frekans değeri için iki yarık çıkışına ait sonuçlar gösterilmektedir.



**Şekil 4.15 :** Yarı çıkışındaki hızların deney ve HAD analizleri için kıyaslaması.

Buna göre sonuçların birbirine yeterince yakın olduğu ve aradaki farkın ihmal edilebileceği söylenebilir. Bununla birlikte her ne kadar HAD analizleri sırasında ölçüm alınan konumlar net olarak bilinse de, deneyler sırasında ölçüm alınan noktaların tam olarak bilinmesi mümkün gözükmemektedir. Bu durumda grafikler üzerinde görülebilen farkın, deneylerde ve HAD analizlerinde kullanılan ölçüm noktaları arasındaki olası farktan kaynaklandığı söylenebilir.

#### 4.5.3 Jet aktüatörlü kanat için HAD analizi sonuçları

HAD analizlerinin gerçekleştirilmesi ile birlikte akış kontrollü kanadın farklı jet frekans değerlerine karşılık  $C_l$  ve  $C_d$  katsayıları elde edilmiştir. Bu değerlerin deney sonuçları ve kontrolsüz NACA0015 kanat profiline ait HAD analizi sonuçları ile kıyaslanması Çizelge 4.3'te gösterilmektedir.

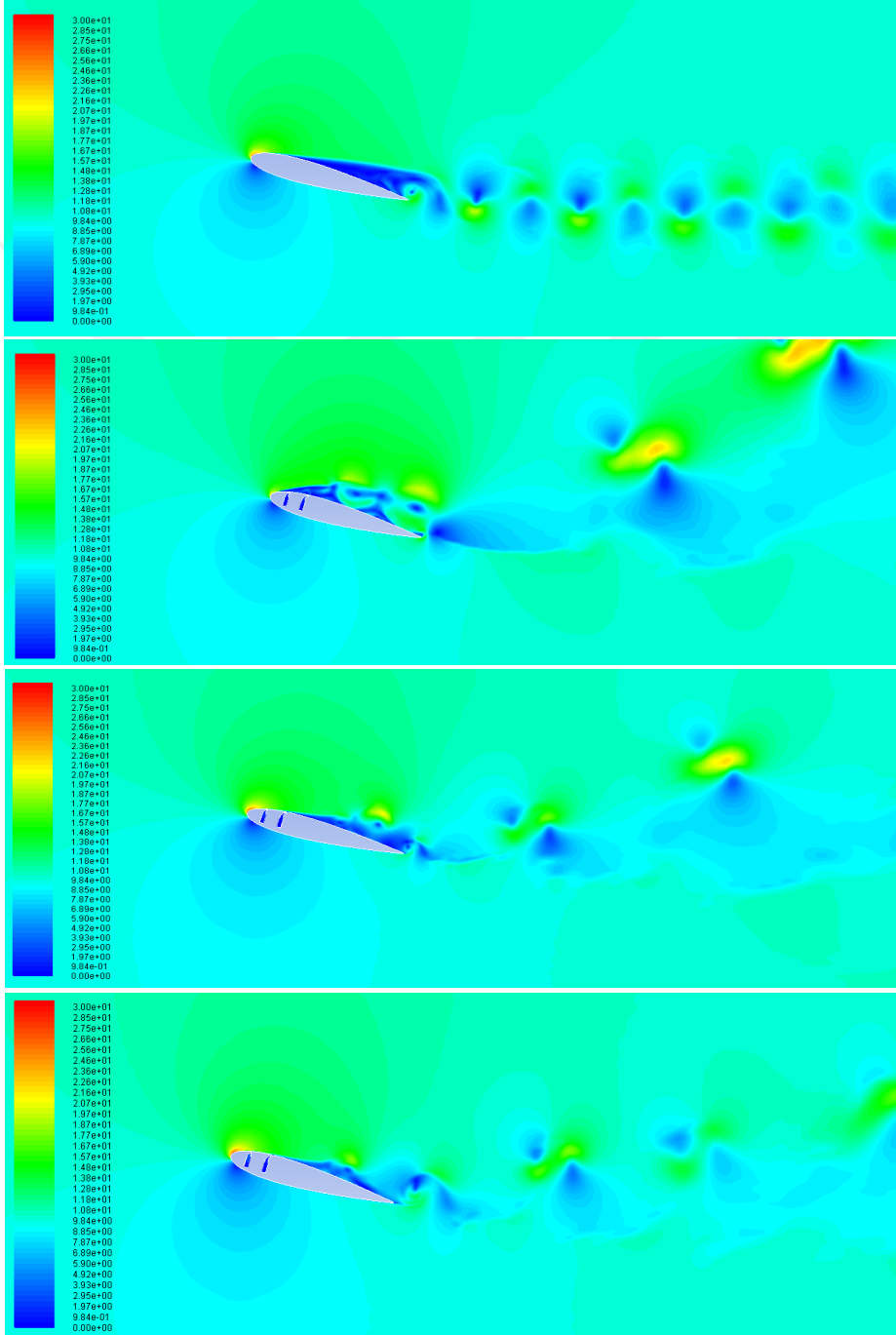
**Çizelge 4.3 :** Kontrollü ve kontrolsüz kanat profillerinin deney ve HAD analizleri arasındaki  $C_l$  ve  $C_d$  katsayıları kıyaslaması.

Deney ve HAD ile Elde Edilen Kuvvet Karakteristikleri		16 Derece		18 Derece	
		$C_l$	$C_d$	$C_l$	$C_d$
Deney	Kontrolsüz	0,7178	0,2441	0,5283	0,2408
	Kontrollü (8.0 Hz)	0,9991	0,1088	0,5784	0,2494
	Kontrollü (13.3 Hz)	1,0434	0,1049	0,7404	0,2774
	Kontrollü (18.7 Hz)	1,1142	0,1036	1,1996	0,1250
HAD	Kontrolsüz	1,3297	0,1469	1,4359	0,5236
	Kontrollü (8.0 Hz)	1,3762	0,1649	1,4086	0,2935
	Kontrollü (13.3 Hz)	1,4784	0,1261	1,4754	0,3476
	Kontrollü (18.7 Hz)	1,4880	0,0950	1,5858	0,1501

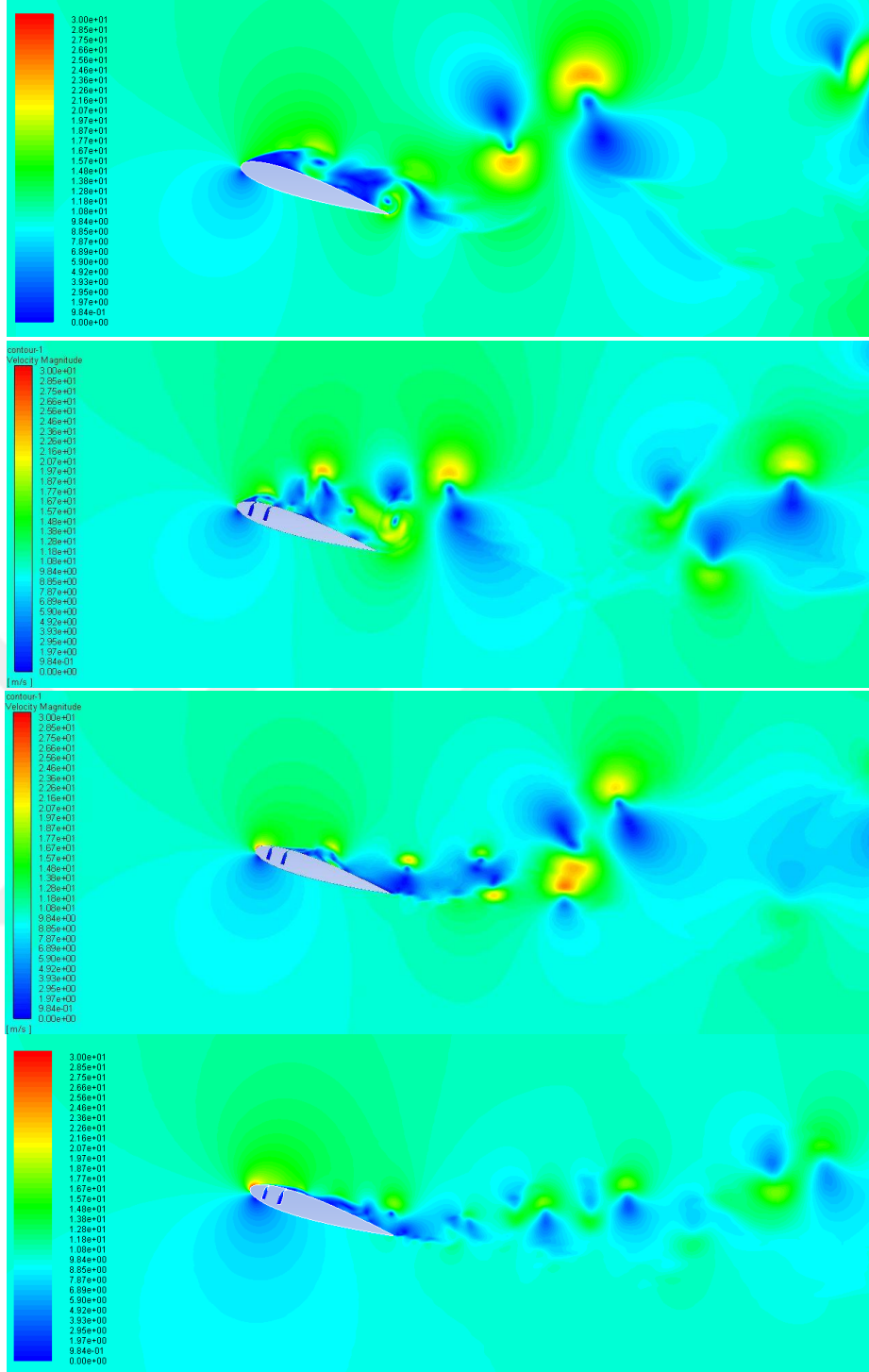
Tablo incelendiğinde hem deney hem de HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar, akış kontrol uygulamasının kanat üzerindeki kaldırma ve sürüklenme katsayısının iyileştirilmesine olan olumlu etkisini göstermektedir. Bununla birlikte HAD analizlerinden elde edilen kaldırma katsayılarının deney sonuçlarından daha yüksek çıktığı görülmektedir. Bu durum düşük hücum açılarında daha düşük seviyelerdeyken yüksek hücum açılarında doğru çıkıldıkça artmıştır. Bunun sebebi ise akış ayrılmasının akış alanı üzerinde oluşturduğu etkinin 2B HAD analizlerinde kullanılan çözücünün hata payını arttırmasıdır. Literatür taraması sırasında incelenen Kitsios ve diğ. (2006) tarafından yapılan çalışmada da görüldüğü gibi kanadın tutunma kaybı durumuna düştüğü yüksek hücum açılarında deneysel ve 3B HAD analizi sonuçlarına göre  $C_L$  değerinde ciddi düşüşler görülürken, 2B HAD analiz sonuçlarında bu düşüşler görülmemektedir. Bu da burada ortaya çıkan sonuçla benzer bir sonucun meydana geldiğini göstermektedir. Ancak tüm bunlara rağmen sabit bir hücum açısı içerisinde inceleme yapıldığında, hem deney hem de HAD sonuçlarındaki  $C_L$  değerinin akış kontrolünün etkisinin artmasıyla birlikte yükseldiği,

$C_d$  değerinin ise akış kontrolünün etkisinin artmasıyla birlikte azaldığı söylenbilir. Böylece akış kontrolünün olumlu etkisi her iki yöntemle de teyit edilmiştir.

HAD analizleri ile birlikte kontrollü ve kontrolsüz kanat çevresindeki akışın durumu da incelenmiştir. Buna göre Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de 16 ve 18 derecelik hücum açılarında kanadın aktif kontrol durumunda yapılan değişiklere karşılık kanat etrafındaki ve kanat çıkışındaki akış hızı dağılımlarının anlık gösterimi verilmiştir.



**Şekil 4.16 :** Aktif akış kontrolünün uygulanma durumuna göre 16 derecelik hücum açısında akış alanında oluşan hız dağılımları (Baştan sona: Kontrolsüz, Kontrollü-8,0 Hz, Kontrollü-13,3 Hz, Kontrollü-18,7 Hz).

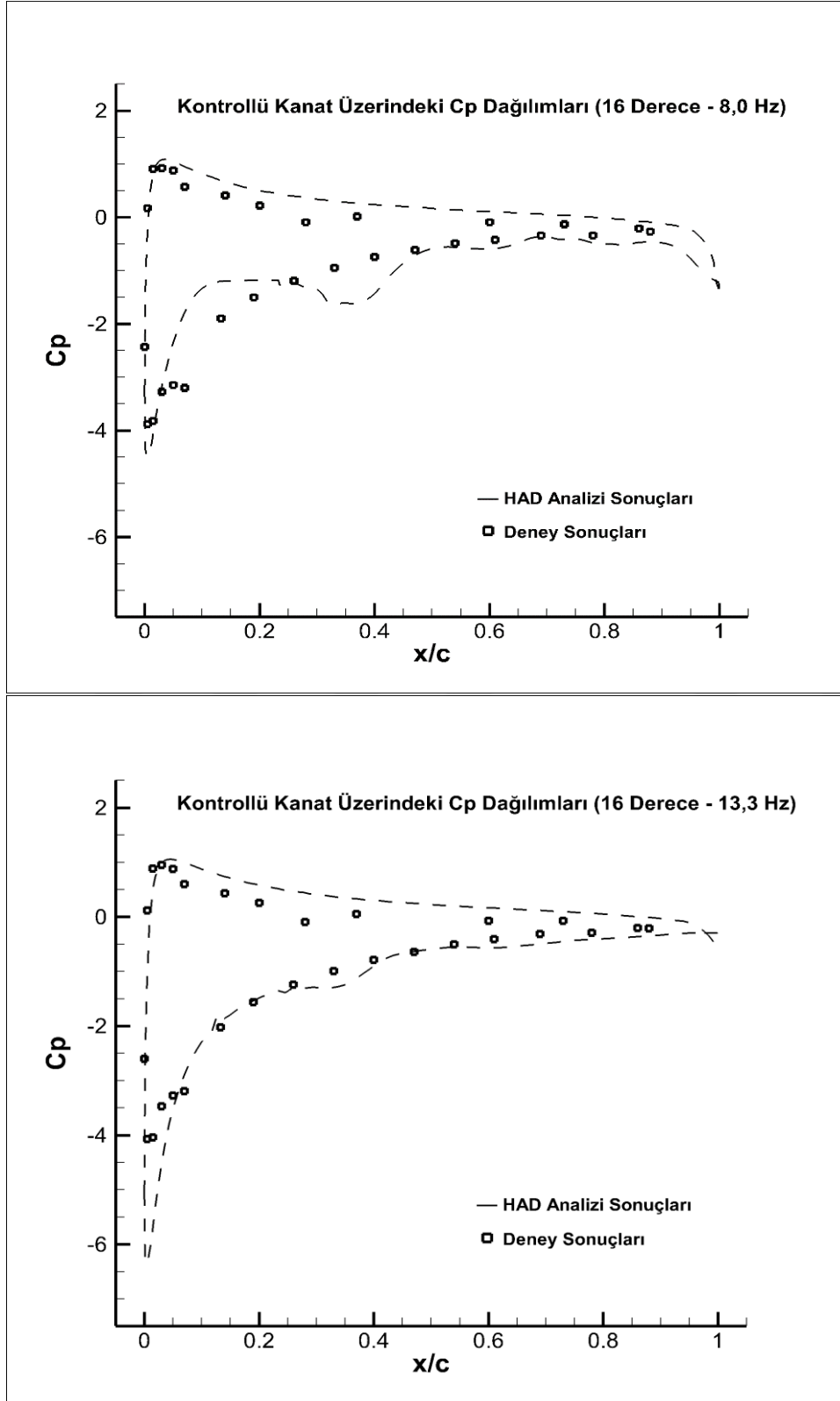


**Şekil 4.17 :** Aktif akış kontrolünün uygulanma durumuna göre 16 derecelik hücum açısında akış alanında oluşan hız dağılımları (Baştan sona: Kontrolsüz, Kontrollü-8,0 Hz, Kontrollü-13,3 Hz, Kontrollü-18,7 Hz).

Akış alanındaki hız dağılımlarından görüldüğü üzere, akış kontrolünün frekansı arttıkça kanat etrafındaki akış daha düzenli bir hale gelmekte ve tutunma kaybı durumu geciktirilmektedir. Kanadın iz bölgesi içerisinde oluşan girdap boyutları ile kanat üzerindeki hız dağılımı incelendiğinde bahsedilen durum görülebilmektedir.

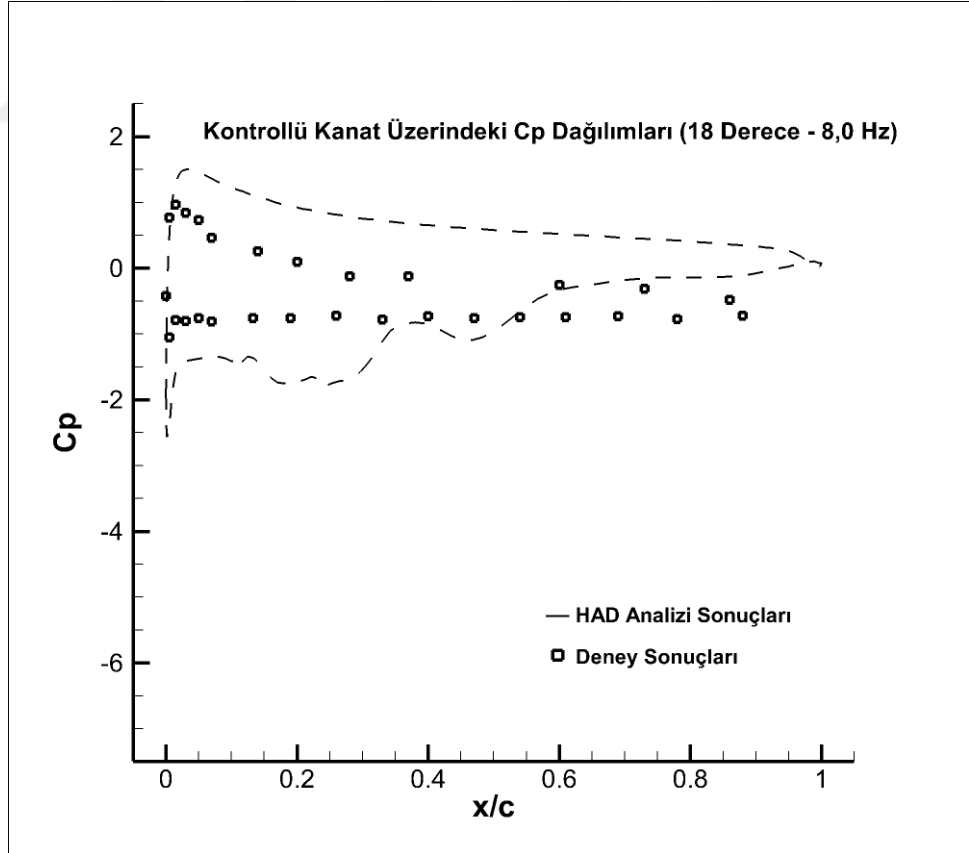
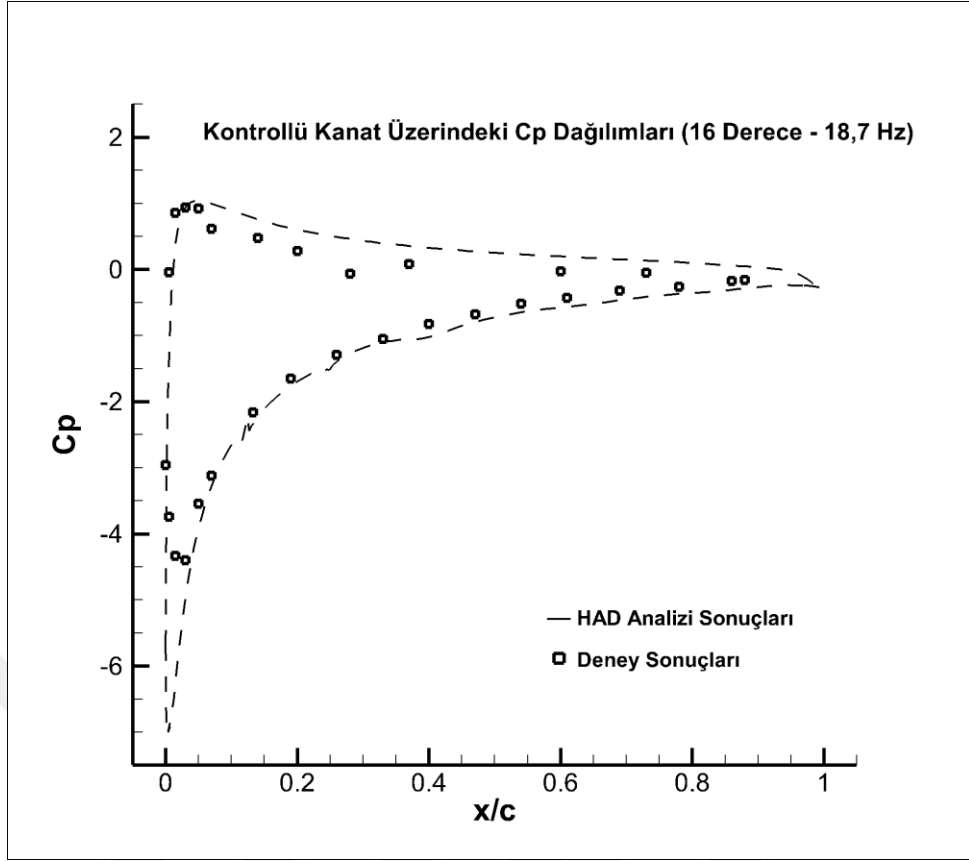


Kontrollü kanat profili için yapılan HAD analizlerinde kuvvet katsayılarının elde edilmesi ile birlikte kanat etrafındaki  $C_p$  katsayıları da çıkarılmıştır. Bu değerlerin deney sonuçlarıyla kıyaslanarak gösterildiği grafikler Şekil 4.18'de verilmiştir.

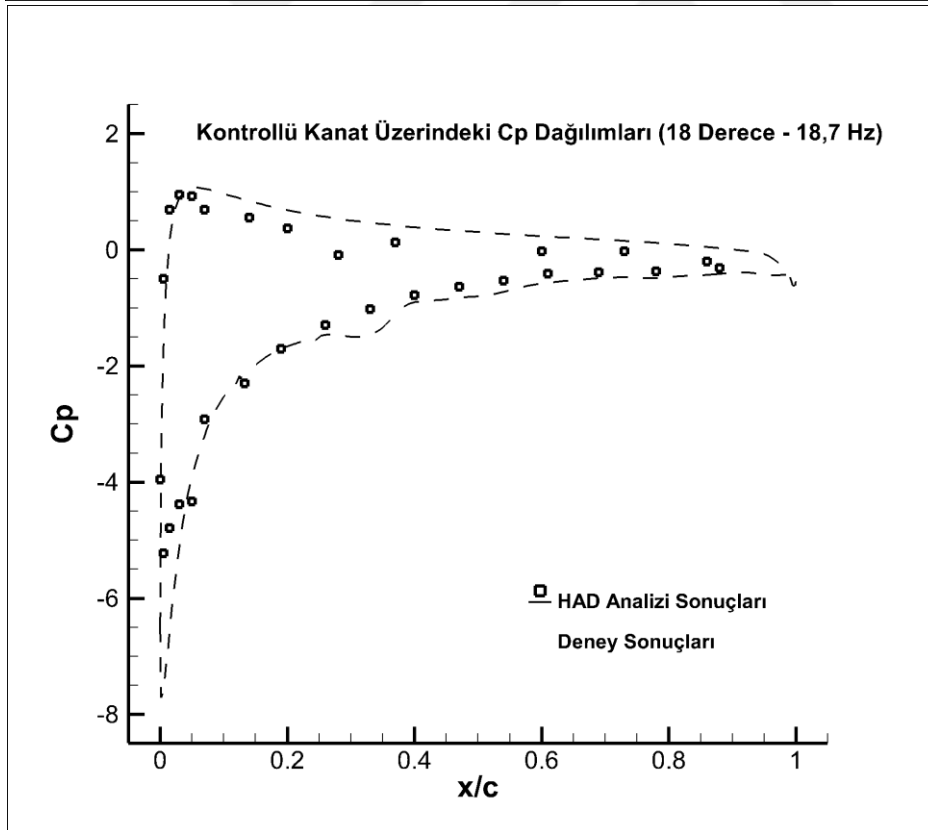
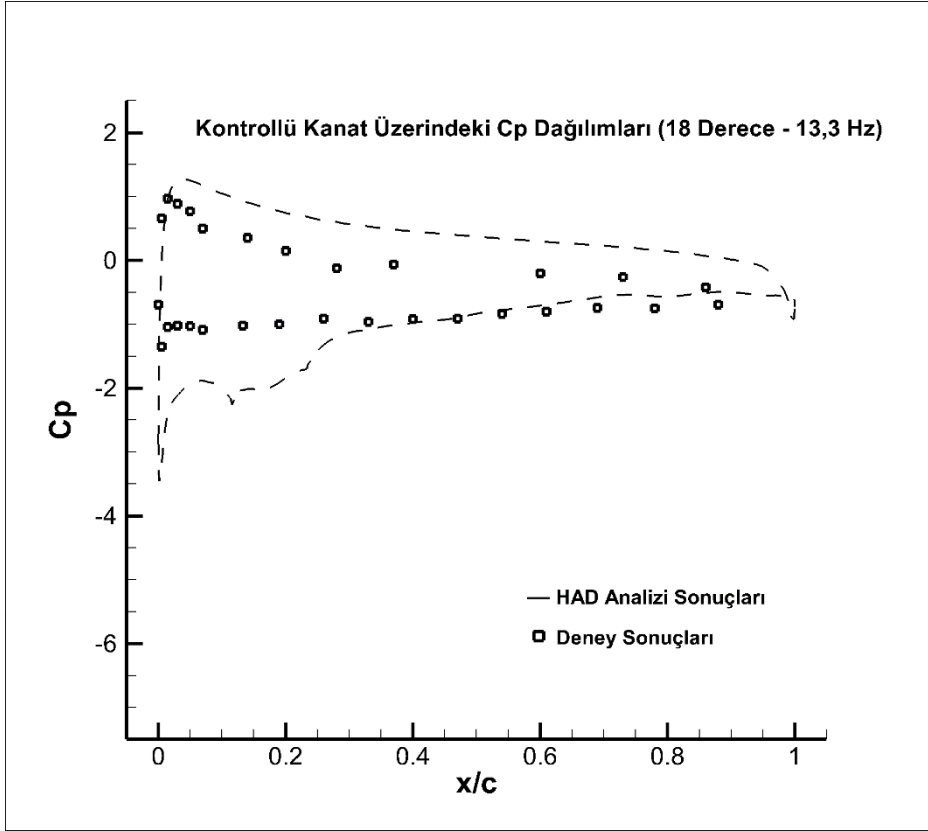


Şekil 4.18 : Kontrollü kanat üzerindeki  $C_p$  değerleri için deney ve HAD analiz sonuçlarının kıyaslanması.



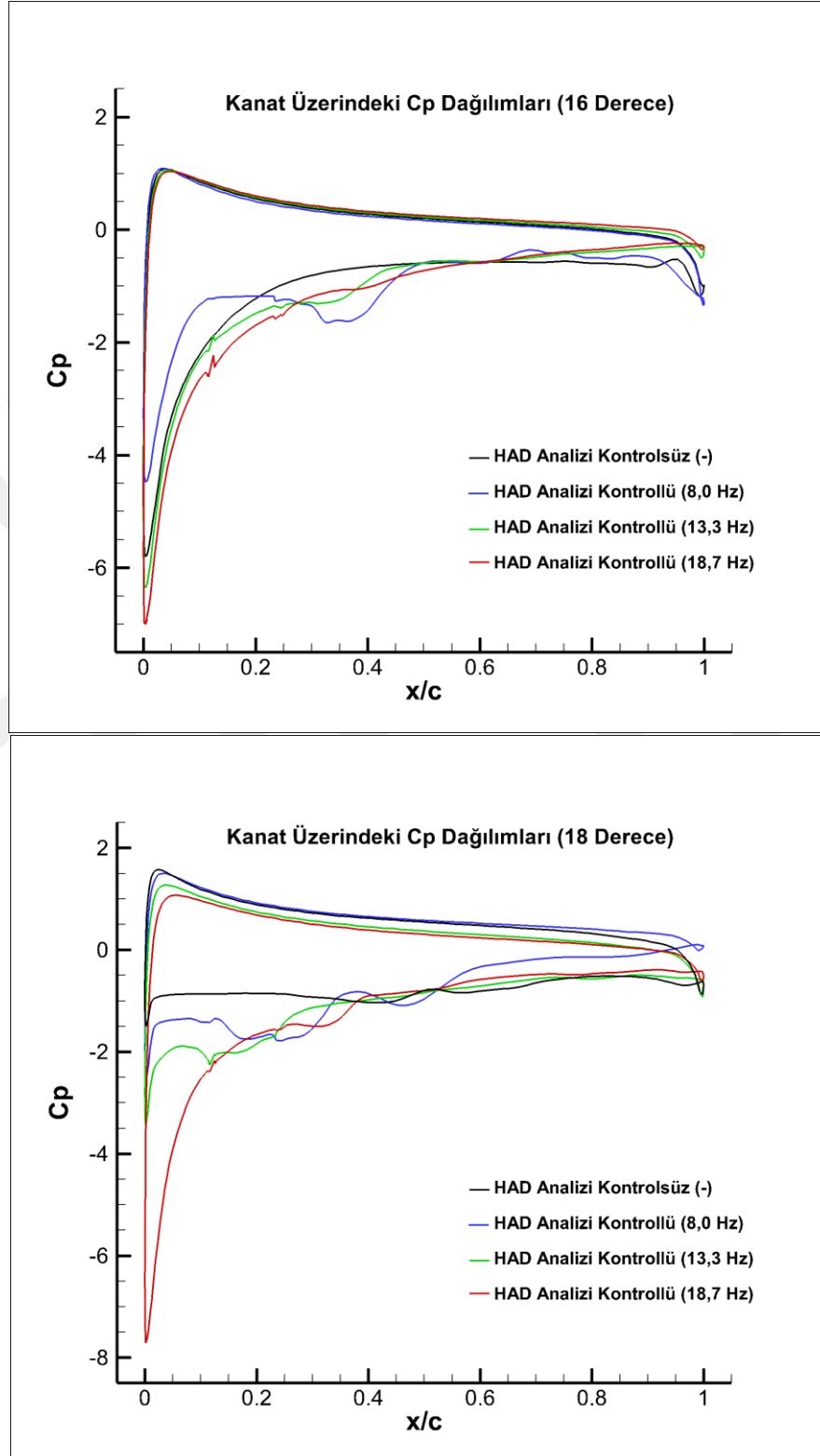


**Şekil 4.18 (devam):** Kontrollü kanat üzerindeki  $C_p$  değerleri için deney ve HAD analiz sonuçlarının kıyaslanması.



**Şekil 4.18 (devam):** Kontrollü kanat üzerindeki  $C_p$  değerleri için deney ve HAD analiz sonuçlarının kıyaslanması.

HAD analizleri sonrasında elde edilen kontrollü ve kontrolsüz kanat üzerindeki  $C_p$  dağılımlarına ait kıyaslama Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde aktif akış kontrolünün kanat üzerindeki  $C_p$  dağılımına olan etkisi görülebilmektedir.



Şekil 4.19 : HAD analizleriyle elde edilen  $C_p$  dağılımlarının kanadın kontrollü ve kontrolsüz durumuna göre kıyaslanması.

Kanat etrafındaki  $C_p$  dağılımlarına ait şekiller incelendiğinde sonuçların genel olarak deney sonuçlarıyla paralel gittiği belirtilebilir. Akışın tutunma kaybı durumuna düşmediği durumlarda bu paralellik daha bariz bir şekilde görülse de, akışın ön kenardan kopmaya başlayarak kanat üzerindeki basınç dalgalanmalarını oluşturduğu tutunma kaybı sırasında da bu benzerlik daha düşük oranda da olsa gözükmektedir. Bu durumda akışın karakteristiği hem deney sonuçlarında hem de HAD analizi sonuçlarında benzer bir şekilde sürekli olarak değişken haldedir. Özellikle vakum kenarı girişindeki basınç dağılımının değeri yükselmiştir ve bu kenar boyunca basınç değerleri pek değişmemektedir. Bununla birlikte akışın kontrol altında daha düzenli bir yönelim sergilediği durumlarda sonuçlar birbirine oldukça yakın gözükmektedir. Özellikle 18,7 Hz frekansa sahip kontrollü modelin sonuçları arasındaki benzerlikten söz etmek mümkündür.

Akış kontrol durumuna göre hazırlanan grafiklerde, hücum açısındaki değişime göre her frekans değerindeki kontrollü durumlar ile kontrolsüz durum arasındaki farklar gösterilmektedir. Buna göre akış kontrol uygulamasında yer alan aktüatör frekansının artışı ile birlikte kanat çevresindeki akışın geliştiği söylenebilir. Aradaki farklar özellikle vakum kenarı girişi ile kuyruk tarafında yoğunlaşmakta ve buralarda akış kontrolünün olumlu etkisi açık bir şekilde görülebilmektedir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında çift yarık çıkışlı jet aktüatör ile kontrol edilen aktif akış kontrollü NACA0015 kanat profilinin deneysel ve sayısal çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, tasarlanan aktif kontrol sisteminin kanadın taşıma katsayısının arttırılmasına, sürüklenme katsayısının azaltılmasına ve kanat üzerinde oluşan akış ayrılmalarının geciktirilmesine olan etkisinin incelenmesidir. Diğer bir deyişle, tasarlanan jet aktüatör sisteminin akış kontrol uygulamalarında uygulanabilirliğinin birkaç açıdan yönlerden incelenmesi amaçlanmaktadır. Bununla birlikte aktüatör frekansındaki (ya da yarık çıkış hızı değerindeki) değişimin akış kontrolüne olan etkisi ile kullanılan türbülans modelinin ve ağ yapısı eleman sayısının HAD analiz sonuçlarına olan etkisi de bu çalışmanın diğer hedefleri olarak belirtilebilirler.

Tez çalışmasından elde edilen sonuçların bazıları daha önceki bölümlerde bahsedilmiş olsa da burada tekrardan belirtilecektir. Buna göre sonuçları şu şekilde özetlemek mümkündür:

- Hem deneysel hem de sayısal çalışmaların sonuçları, kullanılan aktif akış kontrol yönteminin kanat performansına olan olumlu etkisini göstermektedir.
- Deneysel çalışmalarda gerçekleştirilen yarık çıkış hızı ölçümlerinde beklenen sinüzoidal hız eğrisi oluşmamıştır. Burada özellikle emme hareketi sırasında bir hız düşümü görülmektedir. Bunun sebebi olarak kanat içerisinde oluşan kaçaklardan şüphelenilmektedir.
- Deney sonuçlarından hesaplanan verilere göre, 18,7 Hz frekansa sahip kanat kontrol yönteminin kontrolsüz modele göre kanat taşıma katsayılarını yaklaşık %20 oranında arttırdığı söylenebilir.
- Yarık çıkış hızlarının tepe noktaları incelendiğinde basma hızı, beklenen hız değerinin yaklaşık %87'sine ulaşabilmektedir. Bu durum piston ile hareket yüzeyi arasındaki boşluklardan kaynaklanmış olmalıdır.

- Deneyselde elde edilen kanat üzeri basınç dağılımları incelendiğinde, kontrolsüz kanadın  $16^\circ$  de düştüğü tutunma kaybı durumuna 18.7 Hz frekansa sahip jet aktüatörlü kanat  $20^\circ$  de düşmektedir. Bu durum akış kontrolü ile tutunma kaybının yaklaşık olarak  $4^\circ$  ertelendiğini göstermektedir.
- Deneysel çalışmalarda elde edilen kuvvet karakteristikleri ile literatürdeki benzer çalışmalar arasında bazı farklar görülmektedir. Burada taşıma ve sürüklenme katsayılarının literatürdeki sonuçlara göre daha düşük olduğu belirtilebilir. Bunun sebebi olarak kuvvet karakteristiklerinin hesaplanması sırasında kullanılan basınç ölçümlerinin kanadın firar kenarında alınamamış olması ve bu durumun hesaplarda bir miktar hataya sebep olması söylenebilir.
- HAD analizlerinde farklı türbülans modellerinin kullanılması sırasında düşük hücum açılarında oldukça benzer sonuçlar görülürken, hücum açısının artmasıyla birlikte aradaki farklar artmıştır. Bu durumun sebebi olarak akışın düzensizleşmesiyle birlikte akış probleminin zorlaşması ve buna karşılık türbülans modellerinin aynı probleme farklı çözüm yöntemleri getirmesi neden olmaktadır.
- HAD analizlerinden elde edilen kanat etrafındaki  $C_p$  dağılımları deney sonuçlarından elde edilen dağılımlara benzer yönelimler göstermektedir. Bununla birlikte artan hücum açısıyla birlikte genel olarak deney ve HAD sonuçları arasındaki fark artmıştır.
- Gerçekleştirilen sayısal çalışmalar ile birlikte elde edilen  $C_d$  katsayısının deneylerdeki sonuçlara benzer şekilde tutunma kaybının görüldüğü durumlarda hızla yükseldiği söylenebilir.
- Çözüm ağı elemanlarının sayısının yeterliliğinin incelenmesi için yapılan analizlerde yüksek hücum açılarındaki hata oranlarının düşük açılara kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir.
- Yarık çıkış hızları için türetilen fonksiyonun piston üzerine sınır şartı olarak tanımlanması sonrasında yapılan analizlerden elde edilen yarık çıkış hızları ile deney verileri arasında bazı farklar gözükmemektedir. Özellikle ilk yarığın emme işlemi sırasında deneylerden elde edilen sonuçlar HAD analiz sonuçlarına kıyasla daha düşüktür. HAD analizi sırasında elde edilen

görsellerden, yarık içerisine yapılan emme akış hareketi sırasında yarık üzerindeki hız dağılımının basma sırasındaki kadar düzgün olmadığı bilinmektedir. Ayrıca deneylerde yarık çıkış hızları için ölçüm alınan noktaların hassas bir şekilde bilinmediği de göz önüne alınırsa deney ile HAD arasındaki farklar anlaşılabilir.

Çalışmaların sonuçları incelendiğinde çözülmesi gereken bazı problemlerin olduğu görülmektedir. Bahsedilen problemler her ne kadar bu çalışma kapsamında çözülmemiş olsa da burada belirtilecek önerilerle tezden yararlanacaklar için ileriki çalışmalarda fayda sağlayacaktır. Bununla birlikte tezde işlenen konu ile ilgili çalışmalar genişletilebilir ve farklı çalışmalarla kıyaslanabilir. Sonuç olarak tez çalışması kapsamında verilebilecek öneriler şu şekildedir:

- Deneysel çalışmalarda kullanılan kanada ait çok parçalı yapının ortaya çıkardığı olumsuz etkilerden dolayı kanadın olabildiğince az parçalı olması faydalı gözükmektedir.
- Burada yalnızca çift yarık çıkışlı jet için yapılan çalışmaların tek yarıklı jet ile de yapılması sonrasında sonuçların kıyaslanması ve yarık sayısının akış kontrolüne olan etkisinin gösterilmesi bakımından önemli olabilir.
- Jet aktüatörün herhangi bir uygulamada çalıştırılması durumunda aktüatörün enerji tüketim durumu ile sisteme sağladığı katkı arasındaki ilişki incelenebilir.
- Yapılan çalışmalarda incelenen jet aktüatörün frekans aralığının üst noktası daha yüksek değerlere çekilerek optimum jet frekans değerinin belirlenmesine çalışılabilir.
- HAD analizleri ayrıca 3B LES modeli ile gerçekleştirilip karşılaştırmalar yapılabilir.
- HAD analizlerinde türbülans modelinin belirlenmesinde ve ağ yapısının yeterliliğinin değerlendirilmesinde akış kontrollü bir kanat analizinin de incelenmesi daha doğru bir yaklaşım olabilir.
- HAD analizlerinde zaman adımının belirlenmesi için bir çalışma yapılabilir.

- Kanada ait iz bölgesi akış hızlarının hem deneysel olarak hem de HAD analizleri yapılarak tespit edilmesi sonuçları anlamlandırma açısından fayda sağlayabilir.
- Çalışmaların yapıldığı Re sayısı daha yüksek değerlere çekilebilir. Böylece endüstriyel uygulamaların kullanıldığı akış şartlarına daha da yaklaşılr.





## KAYNAKLAR

- Ai, Q., Jawahar, H. K., Azarpeyvand, M., & Ilario da Silva, C. R.** (2016). Experimental and numerical studies of flow and noise control of aerofoils using morphing structures, *3AF Greener Aviation Conference*, Brussels, Belgium : October 11-13.
- ANSYS, Inc.** (2014). *Introduction to ANSYS Fluent: Lecture 7: Turbulence Modeling* [PowerPoint slides].
- Belamadi, R., Djemili, A., Ilinca, A., & Mdouki, R.** (2016). Aerodynamic performance analysis of slotted airfoils for application to wind turbine blades, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 151, 79-99.
- Benard, N., Jolibois, J., & Moreau, E.** (2009). Lift and drag performances of an axisymmetric airfoil controlled by plasma actuator, *Journal of Electrostatics*, 67, 133-139.
- Cattafesta, L. N. & Sheplak, M.** (2011). Actuators for active flow control, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 43:247-72.
- Chapin, V. G. & Benard, E.** (2015). Active control of a stalled airfoil through steady or unsteady actuation jets, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 137, 091103.
- Çadircı, S.** (2010). *Aktif akış kontrolü için jet ve vorteks aktüatörünün deneysel ve sayısal araştırılması.* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- De Giorgi, M. G., De Luca, C. G., Ficarella, A., & Marra, F.** (2015). Comparison between synthetic jets and continuous jets for active flow control: Application on a NACA 0015 and a compressor stator cascade, *Aerospace Science and Technology*, 43, 256-280.
- Favier, J., Pinelli, A., & Piomelli, U.** (2012). Control of the separated flow around an airfoil using a wavy leading edge inspired by humpback whale flippers, *Comptes Rendus Mecanique*, 340, 107-114.
- Gad-El-Hak, M.** (1996). Modern developments in flow control. *Applied Mechanics Reviews*, vol. 49, pp. 365–379.
- Gad-El-Hak, M.** (2000). *Flow Control Passive, Active, and Reactive Flow Management.* New York: Cambridge University Press.
- Gad-El-Hak, M. & Bushnell, D. M.** (1991). Separation Control: Review. *Journal of Fluids Engineering*, vol. 113, pp. 5–30.
- Genç, M. S., Kaynak, Ü., ve Yapıcı, H.** (2011). Performance of transition model for predicting low Re aerofoil flows without/with single and simultaneous

blowing and suction, *PEuropean Journal of Mechanics B/Fluids*, 30, 218-235.

- Gilarranz, J. L., Traub, L. W., & Rediniotis, O. K.** (2005). A new class of synthetic jet actuators-Part I: Design, fabrication and bench top characterization, *Journal of Fluids Engineering*, Vol 127, 367-376.
- Gilarranz, J. L., Traub, L. W., & Rediniotis, O. K.** (2005). A new class of synthetic jet actuators-Part II: Application to flow separation control, *Journal of Fluids Engineering*, Vol 127, 377-387.
- Godard, G. & Stanislas, M.** (2006). Control of decelerating boundary layer. part 1: Optimization of passive vortex generators, *Aerospace Science and Technnology*, 10, 181-191.
- Godard, G. & Stanislas, M.** (2006). Control of decelerating boundary layer. part 3: Optimization of round jets vortex generators, *Aerospace Science and Technnology*, 10, 455-464.
- Godard, G., Foucaut, J. M., & Stanislas, M.** (2006). Control of decelerating boundary layer. part 2: Optimization of slotted jets vortex generators, *Aerospace Science and Technnology*, 10, 394-400.
- Guoqing, Z., Qijun, Z., Yunsong, G., & Xi, C.** (2016). Experimental investigations for parametric effects of dual synthetic jets on delaying stall of a thick airfoil, *Chinese Journal of Aeronautics*, 29(2):346-357.
- He, C. & Corke, T. C.** (2009). Plasma flaps and slats: An application of Weakly ionized plasma actuators, *Journal of Aircraft*, Vol. 46, No. 3.
- Huang, L., Huang, P. G., LeBeau, R. P., & Hauser, T.** (2004). Numerical study of blowing and suction control mechanism on NACA0012 airfoil, *Journal of Aircraft*, Vol. 41, No. 1.
- Joslin, R.D. & Miller, R. N.** (2009). *Fundamentals and Applications of Modern Flow Control*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Kang, W., Lei, P., Zhang, J., & Xu, M.** (2015). Effects of local oscillation of airfoil surface on lift enhancement at low Reynolds number, *Journal of Fluids and Structures*, 57, 49-65.
- Kim, S. H. & Kim, C.** (2009). Separation control NACA23012 using synthetic jet, *Aerospace Science and Technology*, 13, 172-182.
- Kitsios, V., Kotapati, R. B., Mittal, R., Ooi, A., Soria, J., & You, D.** (2006). Numerical simulation of lift enhancement on a NACA 0015 airfoil using ZNMF jets, *Center for Turbulence Research Proceedings of the Summer Program*.
- Kurz, J., Hoeger, M., & Niehuis, R.** (2016). Design of a highly loaded turbine exit case airfoil with active flow control, *ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Phoenix, Arizona, USA : November 11-17.
- Lee, S. J. & Jang, Y. G.** (2005). Control of flow around a NACA 0012 airfoil with a micro-riblet film, *Journal of Fluids and Structures*, 20, 659-672.

- Li, Y., Wang, J., & Zhang, P.** (2002). Effects of gurney flaps on a NACA0012 airfoil, *Flow, Turbulence and Combustion*, 68, 27-39.
- Mazaheri, K., Kiani, K. C., Nejati, A., Zeinalpour, M., & Taheri, R.** (2015). Optimization and analysis of shock wave/boundary layer interaction for drag reduction by Shock Control Bump, *Aerospace Science and Technology*, 42, 196-208.
- Montazer, E., Mirzaei, M., Salami, E., Ward, T., Romli, F. I., & Kazi, S. N.** (2016). Optimization of a synthetic jet actuator for flow control around an airfoil. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* , 152(1), [012023].
- Müller-Vahl, H. F., & Greenblatt, D.** (2015). Control of thick airfoil, deep dynamic stall using steady blowing, *AIAA Journal*, Vol. 53, No. 2.
- Nakayama A.** (1985). Characteristics of the flow around conventional and supercritical airfoils, *Journal of Fluid Mechanics*, 160:155-179.
- Schlichting, H.** (1979). *Boundary-Layer Theory* (J. Kestin, Çev.). United States of America: McGraw Hill, Inc.
- Seifert, A., Eliahu, S., Greenblatt, D., & Wagnanski, I.** (1998). Use of piezoelectric actuators for airfoil separation, *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 8.
- Tang, H., Salunkhe, P., Zheng, Y., Du, J., & Wu, Y.** (2014). On the use of synthetic jet actuator arrays for active flow separation control, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 57, 1-10.
- Tuck, A. & Soria, J.** (2004). Active flow control over a NACA 0015 airfoil using a ZNMF jet, *15<sup>th</sup> Australasian Fluid Mechanics Conference*, Sydney, Australia : December 13-17.
- Xiao, Q., Liu, W., & Incecik, A.** (2013). Flow control for VATT by fixed and oscillating flap, *Renewable Energy*, 51, 141-152.
- Xu, H., Xing, S., & Ye, Z.** (2015). Numerical simulation of the effect of a co-flow jet on the wind turbine airfoil aerodynamic characteristics, *Procedia Engineering*, 126, 706-710.
- You, D. & Moin, P.** (2008). Active control of flow separation over an airfoil using synthetic jets, *Journal of Fluids and Structures*, 24, 1349-1357.
- Yükselen, D. & Moin, P.** (2008). Active control of flow separation over an airfoil using synthetic jets, *Journal of Fluids and Structures*, 24, 1349-1357.
- Zheng, J., Cui, Y. D., Zhao, Z., Li, J. M., & Khoo, B. C.** (2018). Flow separation control over a NACA 0015 airfoil using nanosecond-pulsed plasma actuator, *AIAA Journal*, Vol. 56, No. 6.
- Url-1** < <https://www.nbcnews.com/mach/science/self-flying-planes-may-arrive-sooner-you-think-here-s-ncna809856> >, erişim tarihi 30.04.2019.
- Url-2** < <https://www.digitaltalks.org/2015/08/06/avrupanin-elektrik-ihtiyacinin-yuzde-sekizi-ruzgar-enerjisinden-karsilaniyor/> >, erişim tarihi 30.04.2019.

**Url-3** < <https://www.tracesecritesnews.fr/actualite/l-essentiel-de-traces-ecrites-news-64945> >, erişim tarihi 30.04.2019.

**Url-4** < <https://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/lrlap.htm> >, erişim tarihi 30.04.2019.



## ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Fatih SONKAYA  
Doğum Tarihi ve Yeri : 20.02.1991 / İstanbul  
E-posta : fatihsonkaya61@hotmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı-Akışkan Programı

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2016 Mayıs - Halen – TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü
  - Hidroelektrik Santral Bileşenlerinin Yerli Olarak Tasarımı ve Üretimi (MİLHES)
  - 12"-16" Doğalgaz Dağıtım Boru Hatları için Boru İçi Denetleme Robotu Sistemi Geliştirilmesi (BİDR)