

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**PROFİL DEĞİŞTİREBİLEN RÜZGÂR TÜRBİN KANADI TASARIMI**

**HAZIRLAYAN**

**YALIM GÜLTEKİN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ANKARA - 2020**



**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**PROFİL DEĞİŞTİREBİLEN RÜZGÂR TÜRBİN KANADI TASARIMI**

**HAZIRLAYAN**

**YALIM GÜLTEKİN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TEZ DANIŞMANI**

**PROF. DR. TAHİR YAVUZ**

**ANKARA - 2020**

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Yalın GÜLTEKİN tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 28 / 05 / 2020

**Tez Adı:** Profil Değiştirebilen Rüzgâr Türbin Kanadı Tasarımı

**Tez Jüri Üyeleri ( Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu )**

**İmza**

Prof. Dr. Tahir YAVUZ, Başkent Üniversitesi

.....

Dr. Öğretim Üyesi Levent ÇOLAK, Başkent Üniversitesi

.....

Dr. Öğretim Üyesi Muhittin BİLGİLİ, Gazi Üniversitesi

.....

**ONAY**

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... / .....

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU**

Tarih: 18 / 06 / 2020

Öğrencinin Adı, Soyadı: Yalım GÜLTEKİN

Öğrencinin Numarası: 21920229

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı: Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Prof. Dr. Tahir YAVUZ

Tez Başlığı: PROFİL DEĞİŞTİREBİLEN RÜZGÂR TÜRBİN KANADI TASARIMI

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 67 sayfalık kısmına ilişkin, 18 / 06 / 2020 tarihinde şahsım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

Onay

19 / 06 / 2020

Prof. Dr. Tahir YAVUZ

## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması sürecinde bana her konuda destek olup, anlayış gösteren üzerimde büyük emeği olan danışmanım sayın hocam Prof. Dr. Tahir YAVUZ 'a çalışmanın sonuca ulaştırılmasında ve karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında yol gösterici olduğu için en içten dileklerim ile teşekkür ederim.

Başkent Üniversitesi 'nde yaptığım akademik çalışmalar ile birlikte eş zamanlı sürdürdüğüm bir diğer Yüksek Lisans Tez çalışmamın olduğu Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi 'ne bağlı Enerji Sistemleri Bölümü'ndeki danışmanım sayın hocam Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ 'ye bu ikili süreçte gösterdiği sonsuz desteği ve anlayışı için şükranlarımı sunarım. Bu çalışmam esnasında desteğini benden esirgemeyen ve laboratuvar çalışmamda emeği büyük olan Türk Hava Kurumu Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Dr. Öğr. Üyesi Ataollah KHANLARI hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Değerli jüri üyeleri ve hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Muhittin BİLGİLİ ve Dr. Öğr. Üyesi Levent ÇOLAK'a tezime katkıda bulundukları için teşekkür ederim.

Benim her zaman yanımda olup bu ikili süreçte bana sonuz hoşgörü ve destek gösteren ve zaman zaman elimde olmadan üzdüğüm sevgili çekirdek ailem annem Prof. Dr. Nevin TURGUT GÜLTEKİN'e ve babam Prof. Dr. Ahmet Tanju GÜLTEKİN'e en derin saygı, özür ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince bana gerek teknik gerek moral desteği veren arkadaşlarım Ene. Sis. Yük. Müh. Alper KARAKOÇ, İnş. Müh. Burak ASLANTÜRK, Kim. Müh. Batuhan ENER ve saygıdeğer eşi Psk. Dan. Hümeysra YILDIZ ENER, Yaz. Müh. Enes Kaan KORUKLUOĞLU'na ve Gülден VATANSEVER'e, E. E. Müh. Onur KOYUNCU, Orkun ÖZKAN'a, Filolog İrem ULUSOY'a, kuzenim Vet. Dr. Yağmur TURGUT'a ve sayın büyüklerim Prof. Dr. Zuhale ÖZCAN saygıdeğer eşi Yük. Mim. Mustafa Veysi ÖZCAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

# ÖZET

**Yalım GÜLTEKİN**

## **PROFİL DEĞİŞTİREBİLEN RÜZGÂR TÜRBİN KANADI TASARIMI**

**Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**2020**

Bu çalışmada şekil değiştirebilen rüzgâr türbini kanadı hesaplamaları için kanat profili üzerinde gerekli olan perdovites ve çeşitli hücum açılarına göre kanat üzerinde optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimizasyon çalışmasında k-ε modeli ve ANSYS Fluent Adjoint Solver (Sınırdış Çözüm) için  $C_l/C_d$  optimizasyon kullanılmıştır. Sınırdış çözümlmeye göre kanat üzerinde oluşan değişimler incelenmiştir. Çalışmada ilk olarak oluşturulan benzetim modeli Cornell Üniversitesi Confluence sitesinde bulunan profil doğrulama verileri ile doğrulama yapılmıştır. Çalışmanın devamında ise fiziken kaldırma kuvveti elde edilemeyecek simetrik kanat ve paralel akış şartı denenmiştir. Çalışmanın devamında ise kanat profilinin en iyi noktalarından biri olan 4° hücum açısı 25m/s verimi göz önünde bulundurularak kanat verimleri bu noktaya göre optimize edilmiştir. 10° hücum açısı 5m/s özelliğinden 4° hücum açısı 20m/s değerli için verim artışı ile birlikte kaldırma kuvveti katsayısında artış gözlenmiştir. 4° hücum açısı 25m/s ve 4° hücum açısı 50m/s değerine kadar olan aralıkta ise emniyet nedenlerinden ötürü kanat profili kaldırma kuvvetini azaltacak şekilde hareket etmiştir. Değişen rüzgâr hızları ve hücum açılarında verim değerini tanımlayan kaldırma kuvveti/direnç kuvveti katsayısı oranı,  $C_l/C_d$ , 13.205625 değerinde sabitlenmiş ve optimum çalışma noktasına göre şekil değişiklikleri incelenmiştir. Şekil değiştirebilen rüzgâr türbini kanadı kullanarak emniyet nedenleri ile rüzgâr türbininin enerji üretmesi perdovites ile engellenebilirken rüzgâr türbinlerinin enerji üretebileceği rüzgâr hızı aralığı genişletilerek türbinin kapasite faktörü ve yıllık enerji üretiminde artış sağlanabilecektir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Değişken Rüzgâr Türbini Kanat Tasarımı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi, k-ε modellemesi

# **ABSTRACT**

**Yalım GÜLTEKİN**

**DESIGN OF MORPHING WIND TURBINE BLADE**

**Başkent University Institute of Science and Engineering**

**Department of Mechanical Engineering**

**2020**

In this study, an optimization study was carried out on the blade according to the active stall and various attack angles required on the wing profile for calculating wind turbine blades. In the optimization study,  $C_l/C_d$  optimization was used for the  $k-\varepsilon$  model and ANSYS Fluent Adjoint Solver and according to the boundary analysis, changes on the wing profile were examined. The first simulation model created in the study was verified with the profile verification data available on the Cornell University Confluence site. In the continuation of the study, symmetrical wing and parallel flow condition which physically lifting force cannot be obtained have been tried. In the continuation of the study, by considering the efficiency of  $4^\circ$  angle of attack 25m/s, which is one of the best points of the wing profile, wing efficiency is optimized according to this point. An increase in the coefficient of buoyancy was observed with the increase in efficiency for the value of  $10^\circ$  attack angle 5m/s and  $4^\circ$  angle of attack 20m/s. In the range of  $4^\circ$  angle of attack up to 25m/s and  $4^\circ$  angle of attack up to 50m/s, it moved to reduce the wing profile lifting force for safety reasons. The lift / drag force coefficient ratio, which defines the efficiency value at varying wind speeds and offensive angles, is fixed at  $C_l/C_d$ , 13.205625 and is designed to change according to the optimum operating mode. For safety reasons, the wind turbine's energy generation can be prevented by perdivity by using a deformable wind turbine blade, while the wind speed range that the wind turbines can generate energy can be expanded to increase the capacity factor and annual energy production of the turbine.

**KEYWORDS:** Variable Blade Control in Wind Turbine, Variable Blade Design,  $k-\varepsilon$  Modeling

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TEŞEKKÜR.....                                                                      | i   |
| ÖZET.....                                                                          | ii  |
| ABSTRACT.....                                                                      | iii |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                   | iv  |
| TABLolar LİSTESİ .....                                                             | vi  |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                             | vii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....                                               | iv  |
| 1. GİRİŞ.....                                                                      | 1   |
| 1.1. Temel Kavramlar .....                                                         | 1   |
| 1.2. Literatür Taraması.....                                                       | 4   |
| 1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı .....                                                   | 8   |
| 2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ ve TÜRBİN KANADI METODOLOJİSİ.....                            | 9   |
| 2.1. Rüzgâr Türbini Tipleri ve Elemanları .....                                    | 9   |
| 2.2. Kanat Profilleri ve Genel Aerodinamik Konseptler.....                         | 10  |
| 2.3. İrdelemeler .....                                                             | 13  |
| 3. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL MODELLER.....                                  | 14  |
| 3.1. Problemin Tanımı.....                                                         | 14  |
| 3.2. Şekil Değiştirebilen Kanat Yapısı ve Tarihçesi .....                          | 14  |
| 3.3. Matematiksel Modellemeler .....                                               | 19  |
| 3.3.1. HAD analizi.....                                                            | 19  |
| 3.3.2. Viskoz olmayan akış (inviscid flow) benzetimi .....                         | 19  |
| 3.3.3. k- ε benzetimi .....                                                        | 20  |
| 3.4. İrdelemeler .....                                                             | 21  |
| 4. SAYISAL ANALİZ .....                                                            | 22  |
| 4.1. Giriş .....                                                                   | 22  |
| 4.2. Çözüm Ağı ve Sınır Koşulları.....                                             | 22  |
| 4.3. Benzetim Doğrulama Çalışmaları.....                                           | 24  |
| 4.3.1. Profil özelliklerinin doğrulama çalışması.....                              | 24  |
| 4.3.2. Perdovites .....                                                            | 26  |
| 4.4. 10° Hücüm Açısı ile Çeşitli Hızlarda Kanat Profilinin Şekil Değiştirmesi..... | 27  |
| 4.4.1. 10° Hücüm açısı ve 25m/s hız şartı için benzetim çalışması .....            | 28  |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4.2. 10° Hücüm açısı ve 5m/s hız şartı için benzetim çalışması .....             | 30 |
| 4.4.3. 10° Hücüm açısı ve 10m/s hız şartı için benzetim çalışması .....            | 32 |
| 4.4.4. 10° Hücüm açısı ve 20m/s hız şartı için benzetim çalışması .....            | 33 |
| 4.4.5. 10° Hücüm açısı ve 30 m/s hız şartı için benzetim çalışması .....           | 36 |
| 4.4.6. 10° Hücüm açısı ve 40m/s hız şartı için benzetim çalışması .....            | 38 |
| 4.4.7. 10° Hücüm açısı ve 50m/s hız şartı için benzetim çalışması .....            | 40 |
| 4.5. 4° Hücüm Açısı ile Çeşitli Hızlarda Kanat Profilinin Şekil Değiştirmesi ..... | 42 |
| 4.5.1. 4° Hücüm açısı ve 25m/s hız şartı için benzetim çalışması .....             | 42 |
| 4.5.2. 4° Hücüm açısı ve 5m/s hız şartı için benzetim çalışması .....              | 43 |
| 4.5.3. 4° Hücüm açısı ve 10m/s hız şartı için benzetim çalışması .....             | 45 |
| 4.5.4. 4° Hücüm açısı ve 20m/s hız şartı için benzetim çalışması .....             | 47 |
| 4.5.5. 4° Hücüm açısı ve 30m/s hız şartı için benzetim çalışması .....             | 49 |
| 4.5.6. 4° Hücüm açısı ve 40m/s hız şartı için benzetim çalışması .....             | 51 |
| 4.5.7. 4° Hücüm açısı ve 50m/s hız şartı için benzetim çalışması .....             | 53 |
| 5. SAYISAL SONUÇLAR VE İRDELEME .....                                              | 56 |
| 5.1. Profil Değiştirme Mekanizması .....                                           | 56 |
| 5.2. Doğrulama Çalışmaları Sonuçları .....                                         | 56 |
| 5.3. NACA0012 Profilinin Optimum Çalışma Noktası .....                             | 56 |
| 5.4. $C_l/C_d$ ile Optimizasyon Çalışması .....                                    | 56 |
| 5.5. $C_l/C_d$ Değerleri ve Kanat Profili Değişimi .....                           | 57 |
| 6. BULGULAR VE ÖNERİLER .....                                                      | 66 |
| 6.1. Bulgular .....                                                                | 66 |
| 6.2. İleride Yapılması Öngörülen Hesaplamalar ve Öneriler .....                    | 66 |
| KAYNAKLAR .....                                                                    | 68 |

## **EKLER**

### **EK 1: Kanat Profil Şekil Değişiklerinin Nokta Verileri**

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                   | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Tablo 4.1. Ağ yapısının özellikleri tablosu.....                                                  | 23    |
| Tablo 5.1. 10° Hücüm açısına Göre $C_l/C_d$ ve $C_l$ ilk değerleri ve değiştirilmiş değerler..... | 57    |
| Tablo 5.2. 4° Hücüm açısına göre $C_l/C_d$ ve $C_l$ ilk değerleri ve değiştirilmiş değerler.....  | 57    |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                       | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Dikey ve yatay rüzgâr türbinleri.....                                                      | 10    |
| Şekil 2.2. Rüzgâr türbini elemanları.....                                                             | 10    |
| Şekil 2.3. Airfoil terminolojisi.....                                                                 | 11    |
| Şekil 2.4. Rüzgâr türbini kanadı üzerinde tanımlanmış açılar.....                                     | 11    |
| Şekil 2.5. Kanat üzerine sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerin gösterimi.....                            | 12    |
| Şekil 3.1. Westland Aircraft- Pterodactylus uçağına ait kanat şekilleri .....                         | 15    |
| Şekil 3.2. Bell X-5 Ait farklı kanat süpürme açıları.....                                             | 15    |
| Şekil 3.3. F111 Aardwark farklı süpürme açıları .....                                                 | 16    |
| Şekil 3.3. Sukhoi OKB SU-17 ait farklı süpürme açıları .....                                          | 16    |
| Şekil 3.5. Modüler twist açısına sahip türbin kanadı.....                                             | 17    |
| Şekil 3.6. Kanatlarda aktif bölgeler .....                                                            | 17    |
| Şekil 3.7. Pizoseramik kompozit aktüatör .....                                                        | 18    |
| Şekil 3.8. Aktif uç noktası için mekanik aktüatör .....                                               | 18    |
| Şekil 3.9. Kanat üst bölgesi için mekanik aktüatör .....                                              | 18    |
| Şekil 4.1. Oluşturulan çözüm ağının genel görüntüsü.....                                              | 22    |
| Şekil 4.2. Oluşturulan çözüm ağının detaylı görüntüsü.....                                            | 23    |
| Şekil 4.3. Cornell üniversitesi confluence sitesine göre benzetim doğrulama artık çizelgesi.....      | 25    |
| Şekil 4.4. Cornell üniversitesi confluence sitesine göre benzetim doğrulama statik basınç alanı.....  | 25    |
| Şekil 4.5. Cornell üniversitesi confluence sitesine göre benzetim doğrulama dinamik basınç alanı..... | 26    |
| Şekil 4.6. Perdovites (active stall) statik basınç alanı.....                                         | 26    |
| Şekil 4.7. Perdovites (active stall) dinamik basınç alanı .....                                       | 27    |
| Şekil 4.8. 10° Hücüm açısı ile 25 m/s statik basınç alanı .....                                       | 28    |
| Şekil 4.9. 10° Hücüm açısı ile 25 m/s dinamik basınç alanı.....                                       | 28    |
| Şekil 4.10. 10° Hücüm açısı ile 25 m/s profilde şekil değişikliği.....                                | 29    |

|             |                                                            |    |
|-------------|------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.11. | 10° Hücüm açısı ile 25 m/s profilde şekil değişikliği..... | 29 |
| Şekil 4.12. | 10° Hücüm açısı ile 5 m/s statik basınç alanı .....        | 30 |
| Şekil 4.13. | 10° Hücüm açısı ile 5 m/s dinamik basınç alanı.....        | 30 |
| Şekil 4.14. | 10° Hücüm açısı ile 5 m/s profilde şekil değişikliği.....  | 31 |
| Şekil 4.15. | 10° Hücüm açısı ile 5 m/s profilde şekil değişikliği.....  | 31 |
| Şekil 4.16. | 10° Hücüm açısı ile 10 m/s statik basınç alanı .....       | 32 |
| Şekil 4.17. | 10° Hücüm açısı ile 10 m/s dinamik basınç alanı.....       | 32 |
| Şekil 4.18. | 10° Hücüm açısı ile 10 m/s profilde şekil değişikliği..... | 33 |
| Şekil 4.19. | Hücüm açısı ile 10 m/s profilde şekil değişikliği .....    | 33 |
| Şekil 4.20. | 10° Hücüm açısı ile 20 m/s statik basınç alanı .....       | 34 |
| Şekil 4.21. | 10° Hücüm açısı ile 20 m/s dinamik basınç alanı.....       | 34 |
| Şekil 4.22. | 10° Hücüm açısı ile 20 m/s profilde şekil değişikliği..... | 35 |
| Şekil 4.23. | 10° Hücüm açısı ile 20 m/s profilde şekil değişikliği..... | 35 |
| Şekil 4.24. | 10° Hücüm açısı ile 30 m/s statik basınç alanı .....       | 36 |
| Şekil 4.25. | 10° Hücüm açısı ile 30 m/s dinamik basınç alanı.....       | 36 |
| Şekil 4.26. | 10° Hücüm açısı ile 30 m/s profilde şekil değişikliği..... | 37 |
| Şekil 4.27. | 10° Hücüm açısı ile 30 m/s profilde şekil değişikliği..... | 37 |
| Şekil 4.28. | 10° Hücüm açısı ile 40 m/s statik basınç alanı .....       | 38 |
| Şekil 4.29. | 10° Hücüm açısı ile 40 m/s dinamik basınç alanı.....       | 38 |
| Şekil 4.30. | 10° Hücüm açısı ile 40 m/s profilde şekil değişikliği..... | 39 |
| Şekil 4.31. | 10° Hücüm açısı ile 40 m/s profilde şekil değişikliği..... | 39 |
| Şekil 4.32. | 10° Hücüm açısı ile 50 m/s statik basınç alanı .....       | 40 |
| Şekil 4.33. | 10° Hücüm açısı ile 50 m/s dinamik basınç alanı.....       | 40 |
| Şekil 4.34. | 10° Hücüm açısı ile 50 m/s profilde şekil değişikliği..... | 41 |
| Şekil 4.35. | 10° Hücüm açısı ile 50 m/s profilde şekil değişikliği..... | 41 |
| Şekil 4.36. | 4° Hücüm açısı ile 25 m/s statik basınç alanı .....        | 42 |
| Şekil 4.37. | 4° Hücüm açısı ile 25 m/s dinamik basınç alanı.....        | 43 |

|             |                                                                                                    |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.38. | 4° Hücüm açısı ile 5 m/s statik basınç alanı .....                                                 | 43 |
| Şekil 4.39. | 4° Hücüm açısı ile 5 m/s dinamik basınç alanı.....                                                 | 44 |
| Şekil 4.40. | 4° Hücüm açısı ile 5 m/s profilde şekil değişikliği.....                                           | 44 |
| Şekil 4.41. | 4° Hücüm açısı ile 5 m/s profilde şekil değişikliği.....                                           | 45 |
| Şekil 4.42. | 4° Hücüm açısı ile 10 m/s statik basınç alanı .....                                                | 45 |
| Şekil 4.43. | 4° Hücüm açısı ile 10 m/s dinamik basınç alanı.....                                                | 46 |
| Şekil 4.44. | 4° Hücüm açısı ile 10 m/s profilde şekil değişikliği.....                                          | 46 |
| Şekil 4.45. | 4° Hücüm açısı ile 10 m/s profilde şekil değişikliği.....                                          | 47 |
| Şekil 4.46. | 4° Hücüm Açısı ile 20 m/s statik basınç alanı .....                                                | 47 |
| Şekil 4.47. | 4° Hücüm Açısı ile 20 m/s dinamik basınç alanı.....                                                | 48 |
| Şekil 4.48. | 4° Hücüm açısı ile 20 m/s profilde şekil değişikliği.....                                          | 48 |
| Şekil 4.49. | 4° Hücüm açısı ile 20 m/s profilde şekil değişikliği.....                                          | 49 |
| Şekil 4.50. | 4° Hücüm açısı ile 30 m/s statik basınç alanı .....                                                | 49 |
| Şekil 4.51. | 4° Hücüm açısı ile 30 m/s dinamik basınç alanı.....                                                | 50 |
| Şekil 4.52. | 4° Hücüm açısı ile 30 m/s profilde şekil değişikliği.....                                          | 50 |
| Şekil 4.53. | 4° Hücüm açısı ile 30 m/s profilde şekil değişikliği.....                                          | 51 |
| Şekil 4.54. | 4° Hücüm açısı ile 40 m/s statik basınç alanı .....                                                | 51 |
| Şekil 4.55. | 4° Hücüm açısı ile 40 m/s dinamik basınç alanı.....                                                | 52 |
| Şekil 4.56. | 4° Hücüm açısı ile 40 m/s profilde şekil değişikliği.....                                          | 52 |
| Şekil 4.57. | 4° Hücüm açısı ile 40 m/s profilde şekil değişikliği.....                                          | 53 |
| Şekil 4.58. | 4° Hücüm açısı ile 50 m/s statik basınç alanı .....                                                | 53 |
| Şekil 4.59. | 4° Hücüm açısı ile 50 m/s dinamik basınç Alanı.....                                                | 54 |
| Şekil 4.60. | 4° Hücüm açısı ile 50 m/s profilde şekil değişikliği.....                                          | 54 |
| Şekil 4.61. | 4° Hücüm açısı ile 50 m/s profilde şekil değişikliği.....                                          | 55 |
| Şekil 5.1.  | 10 ° Hücüm açısına göre yapılan kanat profil şekil değişikliklerinin toplam gösterimi.....         | 58 |
| Şekil 5.2.  | 10 ° Hücüm açısına göre 5m/s ve 10m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması..... | 58 |

|             |                                                                                                       |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.3.  | 10° Hücüm açısına göre 10m/s ve 20m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması.....    | 59 |
| Şekil 5.4   | 10° Hücüm açısına göre 20m/s ve 25m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması.....    | 59 |
| Şekil 5.5.  | 10° Hücüm açısına göre 25m/s ve 30m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması.....    | 60 |
| Şekil 5.6.  | 10° Hücüm açısına göre 30m/s ve 40m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması.....    | 60 |
| Şekil 5.7.  | 10° Hücüm açısına göre 40m/s ve 50m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması.....    | 61 |
| Şekil 5.8.  | 4° Hücüm açısına göre yapılan kanat profil şekil değişikliklerinin toplam gösterimi.....              | 62 |
| Şekil 5.9.  | 4° Hücüm açısına göre 5m/s ve 10m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması.....      | 62 |
| Şekil 5.10. | 4° Hücüm açısına göre 10m/s ve 20m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması.....     | 63 |
| Şekil 5.11. | 4° Hücüm açısına göre 20m/s ve 30m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması.....     | 63 |
| Şekil 5.12. | 4° Hücüm açısına göre 30m/s ve 40m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması.....     | 64 |
| Şekil 5.13. | 4° Hücüm açısına göre 40m/s ve 50m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması.....     | 64 |
| Şekil 5.14. | 10° ve 4° Hücüm açılarında çeşitli hızlarda $C_l/C_d$ değerlerinin optimum değere göre konumları..... | 65 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|                |                                                       |
|----------------|-------------------------------------------------------|
| ALE            | Arbitrary Lagrangian Eulerian                         |
| BEM            | Blade Element Momentum                                |
| HAD            | Computational Fluid Dynamics                          |
| CFX            | Ansys HAD Benzetim Programı                           |
| FLUENT         | Ansys HAD Benzetim Programı                           |
| GE             | General Electric                                      |
| HAD            | Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği                       |
| IGP            | Improved Geometric Parameter Airfoil Parameterization |
| N-S            | Navier-Stokes                                         |
| OPENFOAM       | HAD Benzetim Programı                                 |
| PID            | Oransal-İntegral-Türevsel Denetleyici                 |
| PSO            | Particle Swarm Optimisation                           |
| RANS           | Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations             |
| RES            | Rüzgâr Enerjisi Santrali                              |
| RG             | Resmî Gazete                                          |
| SEA            | Sonlu Elemanlar Analizi                               |
| XFOIL          | Subsonic Airfoil Development System                   |
| YEKA           | Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları                  |
| $\alpha$       | Hücum Açısı                                           |
| $c$            | Kord Uzunluğu                                         |
| $Cl$           | Kaldırma Kuvveti Katsayısı                            |
| $Cd$           | Sürüklenme Kuvveti Katsayısı                          |
| $E$            | Enerji                                                |
| $\varepsilon$  | Yüzey Prüzlülüğü                                      |
| $k$            | Türbülanslı Akışta Kinetik Enerjinin Yayılma Hızı     |
| $L$            | Yüzey Uzunluğu                                        |
| $l$            | Birim Uzunluk                                         |
| $U$            | X Yönündeki Hız                                       |
| $V$            | Y Yönündeki Hız                                       |
| $U_{rel}$      | Rüzgârın Bağlı Hızı                                   |
| $U(1-a)$       | Rüzgârın Türbin Kanadı Üzerindeki Hızı                |
| $P$            | Kısmi Basınç                                          |
| $\rho$         | Özkütle                                               |
| $\theta_p$     | Kısmi Rüzgâr Hızı:                                    |
| $\theta_{p,0}$ | Kanat Pitch Açısı                                     |
| $\theta_T$     | Kanat Parçasının Burulma Açısı                        |

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Temel Kavramlar

Rüzgâr enerjisini kullanan ilk makinelerin M.Ö. 200 civarında Asya kıtasında bu günkü Çin, Tibet, Afganistan ve İran coğrafyalarında kullanıldığı bilinmektedir. Rüzgâr enerjisinin kullanımına dair ilk yazılı kanıt M.Ö. 200-300 yılları arasında Büyük İskender tarafından bu topraklarda kullanılan günümüze göre oldukça basit sayılabilecek rüzgâr türbinlerini hakkındadır. M.Ö. 700 civarında günümüz İran topraklarında Persler tarafından düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin kullanıldığına dair kanıtlar mevcuttur.

Rüzgâr enerjisi ve bu enerjinin kullanımını M.S. 640 civarında haclı seferleri zamanında Türkler tarafından Asya kıtasından Avrupa kıtasına yayılmıştır. Avrupa'daki ilk yel değirmenleri örnekleri 1105 yılında Fransa'da ve 1143 yılında İngiltere'de görülmeye başlanmıştır. 18.yy. başlarında Hollanda'da çatısı dönebilen yel değirmeni inşaatı ile pervane çarkının hâkim rüzgâr yönüne döndürülmesi ile verimlilik artmıştır. Günümüzde bu yel değirmenleri örnekleri kuyulardan su çekmek veya buğday öğütmek için kullanılmaktadır.

18.yy. da buhar makinesinin icadı ve sanayi devrimi ile birlikte günümüzde de oluşma belirsizliğini koruyan rüzgâr enerjisinin yerine kömür, petrol, gaz gibi istenildiği zaman yakılarak ısı enerjisine dönüştürülebilen yakıtların popülerliği artmıştır. Bu nedenle insanlar 19.yy. ve 20.yy. sonuna kadar ilk zamanlardaki amaçları doğrultusunda kullanılmışlardır.

Rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmeyi düşünen ilk kişi Danimarkalı mucit ve bilim adamı Poul La Cour (1846-1908) dur. Kendisi ayrıca aerodinamik alanında da çalışmalar yapmıştır. 1891 yılında doğru akım elektrik üreten ilk rüzgâr türbini faaliyete geçirmiştir. 1897 yılında Askov Folk High School da yapılan rüzgâr türbini 89 W gücündeydi. La Cour bu alandaki çalışmalarının yanı sıra rüzgâr enerjisinin yaygınlaşması içinde de çalışmıştır. 1905 yılında kuruculuğunu yaptığı Society of Wind Electricians derneğinin 365 üyesi vardı ve dernek alanındaki ilk dergi olan Journal of Wind Electricity La Cour'un editörlüğünde basılmıştı. La Cour'un 1908'deki vefatının ardından ve I. Dünya Savaşı yıllarının ardından 1918 yılına gelindiğinde Danimarka'da elektrik üretebilen toplam 120 adet rüzgâr türbini vardı ve güçleri 20 ile 35 kW aralığında değişen bu türbinlerin kurulu gücü 3 MW civarındaydı.

1940'lı yıllara gelindiğinde Danimarkalı bir şirket olan F.L. Smith firması tarafından 2 ve 3 kanatlı türbinler üretilmiştir. 1939-1945 yılları arasında II. Dünya Savaşı'nın ardından 1950 yılından sonra doğru akım jeneratörler zaman içerisinde yerini alternatif akım üreten asenkron jeneratörlere bırakmıştır. Bu sürecin öncüleri Johannes Juul ve Vester Egeborg La Cour'un da öğrencileridir.

1956-1957 yılları arasında Gedser Firması tarafından 200 kW gücünde tasarlanıp Johannes Juul'un öncülüğünde SEAS elektrik şirketi için yapılmıştır. Bu türbin 3 kanatlı, yaw sistemli, mekanik frenli ve stall kontrol prensibiyle çalışan ilk türbin olup modern rüzgâr türbinlerinin ilk örneğidir.

1960'lı yıllarda ise rüzgâr türbinlerinden ekonomik nedenlerle uzaklaşıldığı ve sanayi devrimi sürecindeki gibi fosil yakıtların revaçta olduğu yıllar olarak tarihe geçmiştir. 1970'li yıllarda körfez krizi ve petrol doğalgaz gibi fosil yakıtların arzındaki sorunlar sebebi ile yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmuştur. 1970'ten günümüze kadar olan süreçte çok farklı kaynaklarla dengeli enerji arzının bir ihtiyaç olduğu karşımıza çıkmıştır [1].

1918 yılında Poul La Cour tarafından tasarlanan ilk rüzgâr enerjisi santralinden itibaren günümüze kadarki yaklaşık yüz yıllık süreçte rüzgâr enerjisinin kullanımında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. 2017 yılına küresel rüzgâr kaynaklı elektrik enerjisi çıktısına bakıldığı zaman 50 GW altında üretim olduğunu ve fakat Avrupa, Hindistan ve offshore Rüzgâr Enerji Santrali (RES) kaynaklarına bu yılda rekor üretime ulaşıldığı görülmektedir. Çin'de bir önceki yılda RES'e bağlı üretimde enerji çıktısı 19,66 GW civarına düşerken Dünyanın geri kalanında RES enerji çıktısı artmıştır. 2017 yılında kurulan RES santralleri 52.492 MW kurulu güce sahip olup bu genel RES kurulu gücünü dünya genelinde 539.123 MW'a çıkartmıştır. 2016'da kurulan 54.642 MW RES santral gücüne göre 2017'de kurulan RES santral gücü %3,8 daha az olmasına rağmen RES kurulu gücü 2017 de 2016 yılında toplam kurulu güç olan 487.279 MW dan %11 daha fazladır. 2017 yılında 2016 yılına göre offshore RES santralleri kurulumu %87'lük rekor bir artışla 4.334 MW olarak gerçekleşirken toplam kurulu güç ise 18.814 MW ile %30'luk bir artış göstermiştir. Offshore RES santralleri %3,5'luk kurulu güç sağlarken küresel yıllık markette %8'lik bir yer kaplar. Offshore RES kurulumunun yıllar bazında artacağı öngörülmektedir. [1-2]

Rüzgâr enerjisi teknolojisinin ilerlemesi ile birlikte daha önce RES santralleri kurulamayan onshore bölgelerde santral kurulumu yapılabilmektedir. İyi planlama, yönetim ve güç elektroniklerindeki gelişmeler ile birlikte santral güvenilirlik ve kurulum

maliyetleri düşüş gözlenmiştir. İlerleyen senelerde Offshore RES boyutlarının artıp 1 MW'lık tek rüzgâr türbini kurulacağı öngörülmektedir. GE'nin 1 Mart 2018'de yaptığı açıklama ile 2021'de kurulması öngörülen Haliade-X gücü 12 MW olup rotor çapının 220m olması öngörülmektedir. Önümüzdeki on yıllık gelecekte bugün offshore tek türbin için tasarlanan maksimum gücünün iki katına çıkması öngörülmektedir.

Günümüzde rüzgâr enerjisi fiyat rekabetinde diğer kaynaklarla yarışabilir hale gelmesine rağmen bu durum yeni sorunları da beraberinde getirmiştir. Bunlardan bazıları rüzgâr/güneş melez sistemlerin kontrolü, şebeke kontrolü ve enerji depolama imkânları olarak karşımıza çıkmaktadır [3-4].

Dünya enerji pazarında artan RES santrallerine paralel olarak Türkiye'de de rüzgâr enerjisinin elektrik üretiminde etkin olarak kullanılmaya başlanmıştır. Türkiye'de ilk RES yapımında İzmir Alaçatı Germiyan köyünde 1997 yılında başlanmıştır. 1998 yılı şubat ayında işletmeyen alınan santral 3 adet 500 kW'lık türbin içermektedir. Bu santralden yıllık yaklaşık 4 GWh elektrik enerjisi üretilebiliyordu. 2007 ile 2017 yılları arasındaki süreçte Türkiye'de kümülatif kurulum bir önceki yıla göre azalma göstermesine rağmen genel eğilimde sürekli artış göstermiştir [5].

Türkiye için yenilenebilir enerji kaynakları alanında önemli bir adım olan Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı (YEKA) yarışması 13 Nisan 2017 tarih 30037 sayılı 3276/1-1 RG ilanı [6] ile toplamda 1000 MW gücünde RES kurulumunu ve 15 yıl boyunca 0,07 \$/kWh tavan fiyat olarak satışını içerecek şekilde yayımlanmıştır. 3 Ağustos 2017 tarihinde 30. turda Siemens-Türkerler-Kalyon ortaklığı 0,0348 \$/kWh fiyat olarak ihaleyi kazanmıştır [7].

“Rüzgâr enerjisinin kaynağı güneştir. Rüzgârlar yeryüzünün eşit olamayan ısınmasından meydana gelir” [2]. Rüzgârları küresel ve yerel rüzgârlar olarak iki kısımda inceleyebiliriz. Küresel rüzgârlar dünyanın kendi eksenini etrafında hareketini tamamlaması ve sıcaklık farklarından dolayı oluşurken yerel rüzgârlar ise basınç gradyanının oluşturduğu kuvvetler, coriolis kuvvetleri ve jeostrofik kuvvetlerden oluşmaktadır. Küresel rüzgârlar yüksek süreklilik göstermesine rağmen yerel rüzgârlar için aynı durumdan bahsedemeyiz. Bu yüzden yerel rüzgârları baz alan RES küresel rüzgârların etkisinde üretim yapan offshore benzeri santrallere kıyasla üretim sürekliliği bakımından daha kararsızlardır.

Rüzgâr enerjisi varoluşu şekliyle değişken sürekliliğe sahip bir enerji kaynağıdır. Bu enerjinin yakalanıp türbin şaftı üzerinde mekanik enerjiye dönüşümü sırasında verim kaybı yaşanmaktadır. Bu verim kaybının en yüksek olduğu ve günümüzde en çok çalışılan türbin

elemanlarından en önemlisi ise rüzgâr türbin kanatlarıdır. Bu kanatların temel yapı taşı ise kanat profilleridir.

Kanat profilleri sayesinde rüzgâr türbinleri kanatları üzerlerine gelen rüzgârın enerjisini kaldırma kuvvetine dönüştürerek rüzgâr türbini şaftı üzerinde dönme kuvveti oluşturular. Rüzgârın geliş hızı ve gücü değiştiğinden sabit bir kanadın kullanılması açı değiştirebilen bir kanadın kullanılmasına göre daha verimsiz olacaktır. Bu duruma paralel olarak her hız ve rüzgâr gücü koşulunda bütün profillerin aynı özellik gösteremeyeceği bilinen bir gerçektir.

Dünya ve Türkiye’de RES kurulumu rüzgâr enerjisinin daha da önem kazanarak ilerleyeceğini göstermektedir. Bu ilerlemelerde türbin kanatlarının ve kanat profillerinin teknolojik gelişimi önemli bir rol oynayacaktır. Kanatların verim değerleri kanadın hücum açısına bağlı olabildiği gibi kanat profillerine de bağlıdır. Kanat profillerinin verim incelenmesinde en önemli kıstas kaldırma katsayısının sürüklenme katsayısına oranı olarak karşımıza çıkmaktadır [8]. Bu nedenle kanat verimlerinden belirli şartlar altında bahsedilebilir. Bu çalışmanın temel amacı da şekil değiştirebilen rüzgâr türbini kanadının şeklinin tasarımı sayısal yöntemlerle incelenmesi ve optimizasyondur.

## 1.2. Literatür Taraması

Rüzgâr türbininin rüzgârı yakalayan parçası türbin kanatlarıdır. Değişken profilli kanat, literatür taramasında malzeme tasarımı, profil optimizasyonu, türbin kontrolü ve multidisipliner yönden incelenmiştir.

Soğukpınar ve Bozkurt [8] Optimum Profil Şeklinin belirlenmesi ve maksimum aerodinamik verimin alınması konusunda çalışmışlardır. Çalışmada S 825 profili üzerinde SST ve RANS modelleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda iki farklı model kullanılarak profilin aerodinamik özellikleri irdelenmiştir.

Bilgen ve Friswell [9] Piezoseramik kompozit aktüatörlerle katı fazda değişken kamburluk düzeyine sahip profil tasarımı üzerine çalışmışlardır. Bu çalışma sonucunda MFC aktüatörleri kullanarak kanat profilleri üzerine voltajlar uygulanmış ve farklı airfoil profilleri oluşturulmuştur.

Li ve arkadaşları [10] biçim değiştirilebilen kanatların modellenmesi ve analizi hakkında günümüze kadar yapılan çalışmaları derlemişlerdir.

Morgado ve arkadaşları [11] XFOIL ve HAD yöntemlerinin performans çıktılarını yüksek kaldırma kuvveti ve düşük Re sayılarında çalışmışlardır. Çalışmanın çıktısında

XFOIL programının  $k$ - $kl$ - $\omega$  ve  $k$ - $\varepsilon$  modellerini  $C_l$  ve  $C_d$  değerlerinde, değişken N-S Momentum Denklemi çözücülerinde 3 boyutlu ve durağan olmayan akış şartlarında HAD yöntemine göre daha doğru sayısal sonuçlar verdiği görülmüştür.

Wang ve arkadaşları [12] dinamik stall karakteristiğinin airfoil optimizasyon ile azaltılması sağlamıştır. Optimizasyon için fonksiyon uyarlama yöntemi ile optimum hesaplama yöntemin oluşturulup HAD uygulaması için geçirilen süre azaltılmış ve çalışılan airfoil optimize edilmiştir.

Lu ve arkadaşları [13] airfoil için geometrik parametre metodu üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada IGP metodu kullanılarak konvansiyonel hesap yöntemlerine göre daha az sayılabilecek 8 kontrol parametresi üzerinden şekil uyarlama ve aerodinamik hesaplamalar yapılmıştır.

Yang ve arkadaşları [14] düşük rüzgâr hızları için rüzgâr türbin kanatlarında aero-yapısal optimizasyon metodu hakkında çalışmışlardır. Bu çalışmada amaç aerodinamik verimi artırıp aynı zamanda türbin kanadının yapısal performansını geliştirmeyi amaçlamışlardır. PSO algoritması kullanılarak aynı zamanda türbin kanadının ağırlığının azaltılması amaçlanmıştır.

Wang ve arkadaşları [15] dinamik biçim değiştirebilen piezokompozit aktüatörlü esnek kanatların geri besleme, izleme ve kontrolü üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda önceden belirlenen airfoil şekilleri arasında geçişleri sağlayan piezokompozit aktüatörlere uygulanan voltajın kanat boyunca profilde sapmalara yol açtığı ve vibrasyona sebep olduğu bulunmuştur. Bu durumun üstesinden gelinmesi adına statik kontrol (sadece voltaj farkıyla sistem kontrolü) yerine dinamik kontrol ve geri besleme sistemlerinin kullanılması önerilmiştir.

Gonzales ve arkadaşları [16] türbin yalpa hareketlerinin kontrolü ve bakımı üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda 4 adet parametre kullanarak pitch hareketi ile maksimum rüzgâr potansiyelini kullanırken istenmeyen sarsıntılar yok edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın öneri kısmında learning algoritmaları ile pitch ayarlamalarının yapılabileceğine değinilmiştir.

Mouhsine ve arkadaşları [17] rüzgâr türbini kanadının aerodinamik ve yapısal analizi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada yapısal analiz için SEA, aerodinamik analiz için BEM teorisini ve  $k$ - $\omega$  modelini kullanmışlardır. Bu çalışmada SEA ve HAD için kullanılan mesh modeli aynıdır.

Ronold ve Christensen [18] rüzgâr türbini kanadının yorgunluk optimizasyonu için bilgisayar kodlaması üzerine çalışmışlardır. Kodun optimizasyonunda Lind's hata

(penalty) fonksiyonunu kullanılmıştır. Kodun sadeleştirilmesi için taşıma şartlı yük dağılımı kullanılmıştır. Tasarlanan kodun iyileştirilmesi için farklı rüzgâr türbin kanatları üzerinde, farklı rüzgâr ve lokasyonlarda çalıştırılmasına dikkat çekilmiştir.

Ashuri ve arkadaşları [19] multidisipliner yöntemler ile büyük rüzgâr türbinlerinin teknik, ekonomik, tasarım zorlukları ve optimizasyon konusunda çalışmışlardır. Bu çalışmayı yaparken aeroservoelastik benzetim çalışması programının çeşitli alt rutinlerinden yararlanmışlardır. Bu rutinler başlıca TurbSim (3B türbülanslı akış için), AeroDyn (Değişken Aerodinamik Yükler), Airfoil Prep (2B airfoil verilerini 3B için düzeltmek amacıyla), FAST (Rüzgâr türbininin dinamik çıktıları izlemek için), BModes (Model frekansları hesaplamak için), Crunch zamana bağlı çıktıları izlemek için), WindPACT (Model kütlesi ve parçaların fiyatları için), Fatigue (Yorgunluk hasarlarını ölçmek için) kullanılmıştır. Toplamda 51 tane değişkene bağlı 51 denklemi aynı anda çözen bu program (3 twist, 4 cord, 10 kalınlık değişimi, 1 rotor hızı, 1 kule yükseliği, 2 alt-üst kule kalınlığı, 2 alt-üst kule yarıçapı) ile optimizasyon yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda rüzgâr türbininde kapasite artırılması ile daha küçük bir türbinin elemanlarına göre hesap yapılmasının doğru olmadığı saptanmıştır.

Neto ve arkadaşları [20] rüzgâr türbinlerinin kanatları için çok amaçlı optimizasyon konusunda çalışmışlardır. Çalışma rüzgâr türbini kanadının yük dağılımının dengelenmesi, pürüzsüz ve diğer yöntemlere kıyasla daha kolay türbin kanadı üretilmesini amaçlamaktadır.

Jureczko ve arkadaşları [21] rüzgâr türbin kanatlarının optimizasyon çalışması konusunda çalışmışlardır. Optimizasyon parametreleri olarak kanat üzerindeki vibrasyon, güç çıktısı, türbin kanadı maliyeti, lokal ve genel yapısal dayanım ve türbin kanat mukavemeti göz önüne alınmıştır.

Lee ve arkadaşları [22] rüzgâr türbinlerinin kanat moment sinyalleri ve transformasyon algoritması üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada türbin kanadı üzerinden ölçülen rüzgâr türbin kanat momenti 3 fazlı ham veriden 2 ortogonal sinyale çevrilmiş ve kanat pitch açısı bulunmuştur. Bulunan bu açı koordinat transformasyon matrisi ile kanata iletilip pitch açısı düzeltilmiştir.

Nejadkhaki ve Hall [23] bölge verimliliğini artırmak için etkin bir değişken büküm dağılımı ile esnek bir rüzgâr türbini kanadı için bir modüler tasarım metodolojisi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada yarı-durağan BEM modeli kullanılmıştır. İteratif yöntemle önce burulma açısı için bir değer tanımlanıp, kapalı kontrol PID kontrol sistemi ile modül

kontrolü sağlanmıştır. Bu tasarım ile türbinin çalışmaya başlama (cut in speed) hızı azaltılmıştır.

Thumthae [24] düşük rüzgâr hızlı bölgelerde değişken hızlı rüzgâr türbinleri için optimum kanat profilleri üzerine çalışmıştır. Çalışmada HAD ve BEM bazlı SuWiT programı kullanılmıştır ve çıktıların aynı olduğu görülmüştür. Çalışmada temel alınan türbin 300 kW lık olup 10m/s lik rüzgâr hızına maruz kaldığından güç katsayısını %50,5 (Betz limiti %59,63 tür) olarak bulunmuştur.

Açıkel ve Genç [25] kısmi esnekliğe sahip rüzgâr türbini kanadı emme yüzeyi üzerinde laminer ayrıştırma kabarcık kontrolü üzerine çalışmışlardır. Çalışmada farklı Re sayılarında emme yüzeyinde kısmi elastik membranla sürtünme kuvveti azaltılmaya çalışılmıştır. Akıştaki deformasyonun frekansına eşit frekansta membran deformasyonu olursa deformasyon olmayan katı türbin kanatlarına göre sürtünme kuvveti ciddi olarak azaldığı izlenmiştir.

Nada ve Al-Shahrani [26] esnek çoklu yüzey (multibody) yaklaşımı kullanarak düşük hızlı rüzgâr türbini kanatlarının şekil optimizasyonu konusunda çalışmışlardır. Günümüzde sıklıkla kullanılan rüzgâr türbini kanat şekli olan betz optimizasyonuna sahip türbin kanadı yerine bu kanat şeklinin tam tersinin düşük rüzgâr hızlarında daha verimli olduğu izlenmiştir.

MacPhee ve Beyene [27] değişken kanat yapısına sahip düşey eksenli rüzgâr türbini akışkan-yapı etkileşim analizi konusunda çalışmışlardır. Çalışma ALE denklemleri yardımıyla çözümlenmiştir. OpenFOAM programı ile çözümlemeler yapılmıştır. Akış analizlerinde momentum denklemlerinin çözümlenmesinde  $k-\omega$  durağan hal modeli ve kütle korunumu PISO algoritması kapalı formda Euler zaman adım yöntemi için Co sayısı bütün çözüm alanında 1'den küçük olacak şekilde sağlanmıştır. Kanat güç performansında % 9,6 oranında artış saptanmıştır. Ayrıca değişken kanatlarla birlikte pasif pitch kontrolü ve titreşimde azalma sağlanmıştır.

Marinić-Kragić ve arkadaşları [28] esnek kanat yapısına sahip Savonius tipi dikey akslı rüzgâr türbinlerinin sayısal analizleri ve şekil optimizasyonu konularında çalışmıştır. Çalışma HAD için BEM bazlı RANS ve Ansys CFX programından yararlanılmıştır. Çalışmanın sonucunda esnek kanat yapısının rijit kanat yapısına göre güç katsayısında %18 artış gözlenmiştir.

### 1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı

İnsanlığın enerji ihtiyacının her geçen gün arttığı yadsınamaz bir gerçektir. İnsanlık enerji sorununu çözmek için çok çeşitli enerji kaynaklarına başvurmuştur. Bu enerji kaynaklarını yenilenemeyen ve yenilenebilir enerji kaynakları olarak iki ana başlıkta sınıflandırılabilir. Yenilenemeyen enerji kaynaklarına petrol ve yan ürünlerini örnek olarak gösterilebilir. Bu kaynaklar kullanıldıkları zaman yerine konulması çok uzun zaman alır ya da tekrar yerine konulamaz. Yenilenebilir enerji kaynaklarına güneş, dalga, gel-git ve rüzgâr enerjileri örnek verilebilir. Bu kaynaklar yenilenemez enerji kaynaklarına göre daha kısa sürede tekrar yenilenebilirler.

Rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde en yaygın olarak kullanılan sistemler rüzgâr türbinleridir. Rüzgâr türbinlerinde rüzgâr enerjisi türbin kanatlarını döndürmesi sayesinde elektrik jeneratörünün tahriki sağlanır.

Türbin kanat tasarımı bu yüzden büyük önem teşkil etmektedir. Günümüzde savaş uçakları ve benzerinde kullanılan kanadın süpürülmesi ve kanadın şekil değiştirmesi gibi kavramlar enerji üretiminde kullanılabilecek bir boyuta gelmiştir.

Bu çalışmanın amacı rüzgâr türbin kanatlarında şekil değiştirebilen profiller kullanılarak türbin kanatlarının istenilen durum çıktısına göre kanat profilinin şeklinin tasarımı, sayısal yöntemlerle incelenmesi ve optimizasyondur.

Bu çalışmada rüzgâr türbininin shaftının devir sayısının kanat profili şekli değiştirilerek sabit tutulması ve aşırı çevre şartlarında kanat profilinin şekil değişikliği ile kaldırma kuvveti üretmesi engellenerek türbin emniyetinin sağlanması esas alınmıştır. Bu şartların sağlanması adına çalışmada kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvertine oranından yararlanılmıştır.

## 2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ ve TÜRBİN KANADI METODOLOJİSİ

### 2.1. Rüzgâr Türbini Tipleri ve Elemanları

Rüzgâr türbini rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren yapılardır. Bu yapılar dikey ve yatay olmak üzere iki grupta incelenebilirler.

Yatay rüzgâr türbinlerinde türbin şaftı yere dik olup elektrik ve kontrol ekipmanları yer seviyesine yerleştirilmiştir. Dikey rüzgâr türbinlerinde ise rüzgâr türbini şaftı yere paralel olup elektrik ve kontrol elemanları kulenin üzerindedir.

Rüzgâr türbini ekipmanlarını yatay rüzgâr türbini üzerinden incelersek;

**Üreteç (Generator):** Kanatlar tarafından yakalanan rüzgâr mekanik enerjiye çevrilir. Rotor ile jeneratöre taşınan mekanik enerji üreteç üzerinde elektrik enerjisine çevrilir. Rüzgâr türbinlerinin kapasitesine göre senkron veya asenkron jeneratör (üreteç) kullanılmaktadır.

**Stator:** Senkron elektrik jeneratörlerinde üretecın sabit parçasıdır. Mıknatıs ile manyetik alanın oluştuğu yerdir.

**Rotor:** Rüzgâr türbini motorlarında bir aks veya mil etrafında bönen asenkron motor parçasıdır. Aynı zamanda senkron elektrik jeneratörlerinde üretecın hareketli parçasıdır.

**Ana Mil:** Kanatların bağlantısının yapıldığı flanşı taşıyan elemandır. Döndürme kuvvetini ve mekanik enerjiyi jeneratöre iletilmesinden sorumlu parçadır.

**Kanat (Blade):** Rüzgâr enerjisinin yakalanması için kullanılır. Rüzgâr enerjisini mekanik enerjiye çeviren elemandır.

**Kanat Flanşı (Hub):** Rüzgâr türbinlerinde yer alan kanatların rotor ile bağlantısının kurulduğu elemandır.

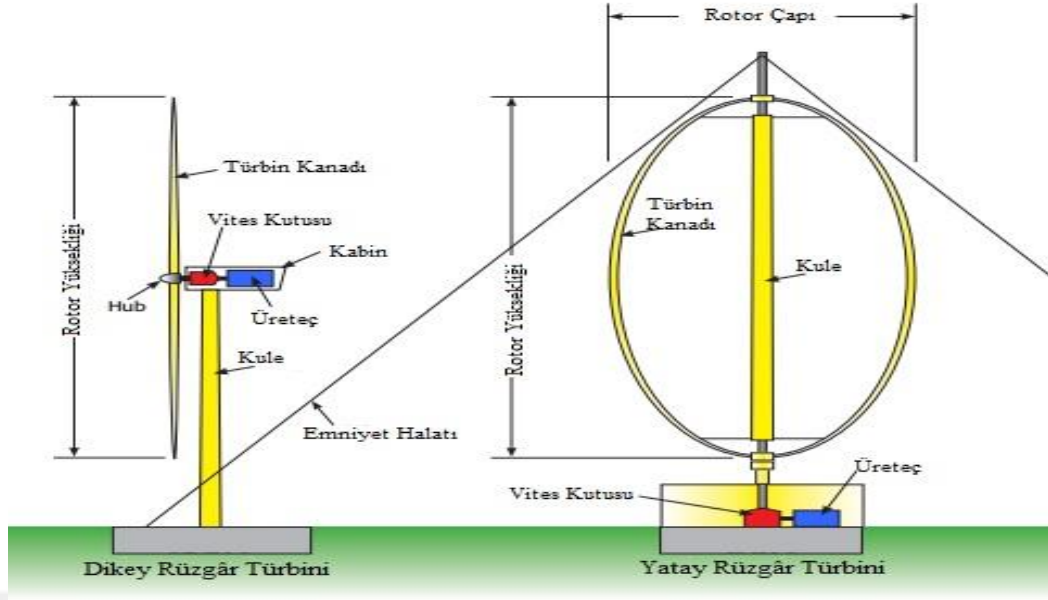
**Açı Kontrol Motoru (Pitch Kontrol Motor):** Kanatların hücum açısını ayarlayan servo motordur.

**Yön Kontrol Motoru (Yaw Kontrol Motor):** Değişken rüzgâr yönüne göre kabinin yönünü rüzgâra göre ayarlayan servo motordur.

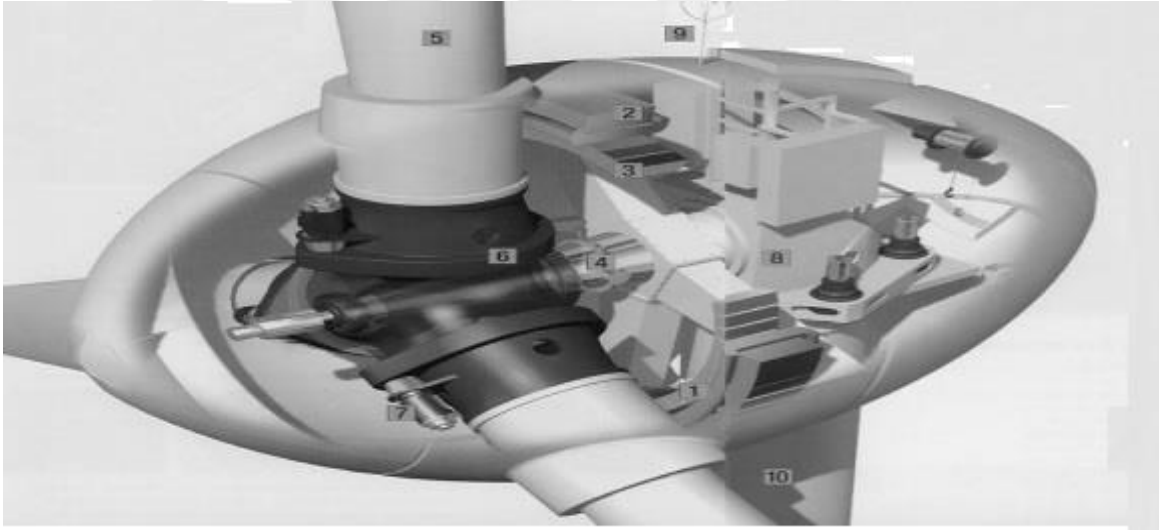
**Meteorolojik Veri Sensörü:** İklim koşullarının rüzgâr türbini üzerinde değişimlerini izleyen sensördür.

**Kabin (Nacelle):** Rüzgâr türbini için önemli olan üreteç, ana mil ve benzeri mekanik ve elektromekanik elemanları dış hava şartlarından koruyan iklimlendirilmiş korugandır [9].

Şekil 2.1.'de dikey ve yatay rüzgâr türbinlerinin temsili resmi bulunmaktadır. Söz konusu dikey ve yatay türbinlerin elemanları Şekil 2.2. 'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Dikey ve yatay rüzgâr türbinleri



Şekil 2.2. Rüzgâr türbini elemanları

## 2.2. Kanat Profilleri ve Genel Aerodinamik Konseptler

Kanatlar çeşitli geometrik gösterimler yardımı ile tanımlanırlar. Bu nokta ve uzunluklar Şekil 2.3. 'de tanımlanmıştır.

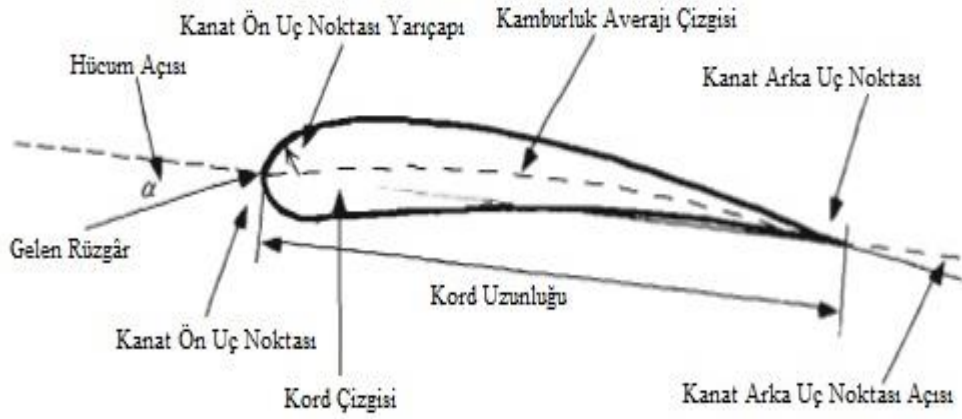
**Kanat Orta Çizgisi (Mean Camber Line):** Kanadın alt ve üst profiline eşit uzaklıkta olan çizgidir.

**Kanat Ön Uç Noktası (Leading Edge):** Kanat profilinin ön en uç noktasıdır.

**Kanat Arka Uç Noktası (Trailing Edge):** Kanat profilinin arka en uç noktasıdır.

**Kord Uzunluğu (Chord Line):** Ön ve arka uç noktaları birleştiren düz çizgidir.

**Hücum Açısı (Angle of Attack):** Kord çizgisi ile rüzgâr hızı arasındaki açıdır.



Şekil 2.3. Airfoil terminolojisi

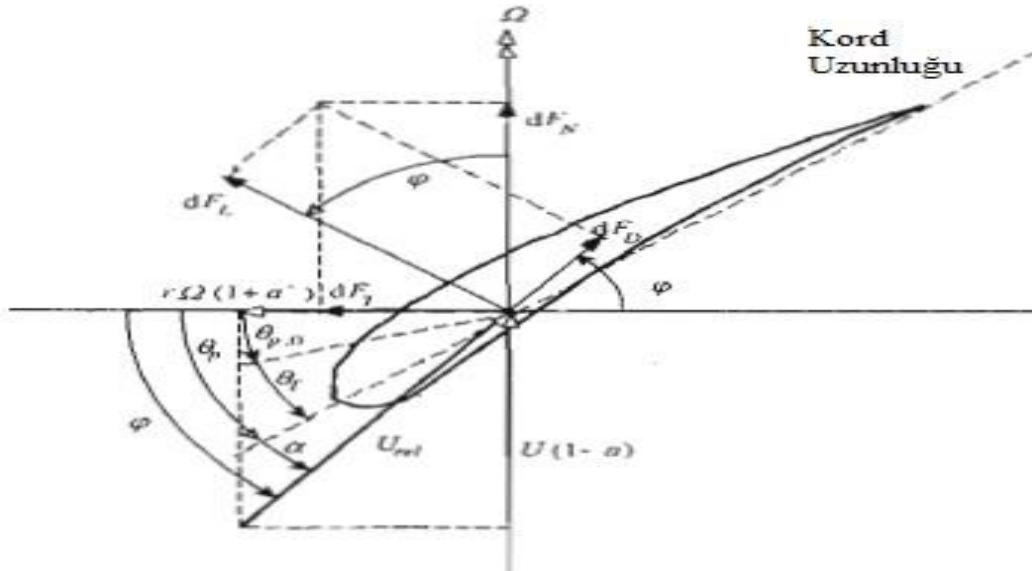
**Trailing Edge Angle (Kanat Arka Açısı):** Kord çizgisi ile kanat uç noktası arasındaki açıdır. Kanatlar çeşitli rejimlerde tanımlanırlar.

**Attached Flow Regime (Yüzeyden Kopmayan Akış Rejimi):** Kanadın üst kısmında akış yüzeyden kopmamıştır. Belirli bir noktaya kadar hücum açısındaki artış kaldırma kuvvetini artırırken sürüklenme kuvvetini azaltır.

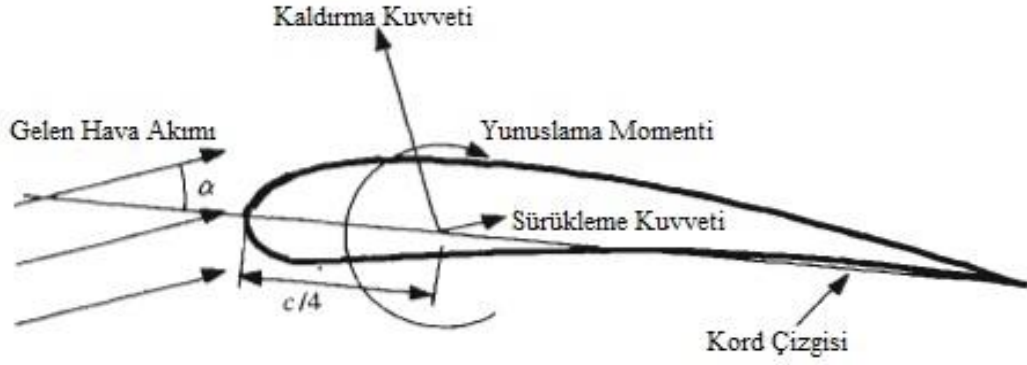
**High Lift/Stall Development Regime (Yüksek Kaldırma/Perdövites Rejimi):** En yüksek kaldırma kuvvetine ulaşıldıktan sonra hücum açısında artış olursa stall başlangıcı gözlenir. Bu noktadan itibaren kanadın üst kısmında ayrılma gözlenir.

**Flat Plate/Fully Stalled Regime (Yüksek Hücum Açılı Akış Rejimi):** Tam stall halidir. Kanat akışa dik olacak şekilde durur.

Kanat üzerinde tanımlanan açılara bakılacak olursa Şekil 2.4.'de belirtilen açılar kanat profili üzerinde belirterek işleme başlamalıyız.



Şekil 2.4. Rüzgâr türbini kanadı üzerinde tanımlanmış açılar



Şekil 2.5. Kanat üzerine sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerin gösterimi

Kanat üzerine etki eden kuvvetler Şekil 2.5’de gösterilmiş olup aşağıdaki bölüntüler ve formüller ile incelenmiştir.

**Kaldırma Kuvveti (Lift Force):** Üst ve alt profilde oluşan basınç farkının sonucunda kanat üzerinde kaldırma kuvveti meydana gelir.

**Sürüklenme Kuvveti (Drag Force):** Kanat üzerine gelen hava akımının viskoz akış özelliği gösterdiği durumlarda kullanılır.

**Yunuslama Momenti (Pitching Moment):** Kanat üzerinde oluşan döndürme momentinin tanımıdır.

## 2 boyutlu kaldırma kuvveti katsayısı

2 boyutlu kaldırma kuvveti katsayısı ( $C_l$ ) kaldırma kuvvetinin dinamik kuvvete oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$C_l = \frac{L/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\frac{\text{Kaldırma Kuvveti}}{\text{Birim Uzunluk}}}{\frac{\text{Dinamik Kuvvet}}{\text{Birim Uzunluk}}} \quad (2.1)$$

## 2 boyutlu sürüklenme kuvveti katsayısı

2 boyutlu sürüklenme kuvveti katsayısı ( $C_d$ ) sürüklenme kuvvetinin dinamik kuvvete oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$C_d = \frac{D/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\frac{\text{Sürüklenme Kuvveti}}{\text{Birim Uzunluk}}}{\frac{\text{Dinamik Kuvvet}}{\text{Birim Uzunluk}}} \quad (2.2)$$

### Yalpalama kuvveti katsayısı

Yalpalama kuvveti katsayısı ( $C_m$ ) yalpalama kuvvetinin dinamik kuvvete oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 Ac} = \frac{\text{Yalpalama Kuvveti}}{\text{Dinamik Kuvvet}} \quad (2.3)$$

### Basınç katsayısı

Basınç katsayısı ( $C_p$ ) yalpalama kuvvetinin dinamik kuvvete oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{\text{Statik Basınç}}{\text{Dinamik Basınç}} \quad (2.4)$$

### Birim yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğünün yüzey uzunluğuna oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\frac{\varepsilon}{L} = \frac{\text{Yüzey Pürüzlülüğü}}{\text{Yüzey Uzunluğu}} \quad (2.5)$$

### Teorik Kaldırma Katsayısı

Teorik olarak kaldırma kuvveti katsayısı bir profil için belirtilen şekilde hesaplanabilir. Fakat bu katsayı olması hedeflenenden daha yüksek çıkmaktadır çünkü geometrik değişkenlerden sadece hücum açısına bağlı olarak ifade edilmiştir.

$$C_l = 2\pi \sin \alpha \quad (2.6)$$

## 2.3. İrdelemeler

Tez çalışmasının 2. bölümünde rüzgâr türbinleri için genel tanımlamalar yapılmıştır. İlk olarak rüzgâr türbilleri için genel teminolji incelenmiştir. Devamında ise rüzgâr türbinlerinin için tasarım ve değerlendirme kısıtları için aerodinamik tanımlamalar ve literatürde kullanılan performansın incelenmesi için katsayılar tanımlanmıştır.

### **3. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL MODELLER**

#### **3.1. Problemin Tanımı**

Uçan canlılar incelendiğinde kanat şekillerinin ihtiyaca göre şekil değiştirebildiği ve bu sayede enerjilerini daha verimli kullanarak uzun mesafeler kat edebildiği herkes tarafından bilinmektedir. Günümüzde hava taşıtları ve rüzgâr türbinleri kanatları incelendiğinde; bahsedilen kanat değişimlerinin doğada olan canlılara yeterince benzemediği görülmektedir. Bunun en önemli kısıtlarından birisi ise kanatların ihtiyaca göre profil şeklini değiştirememesinden kaynaklanmaktadır. Bu kısıt değişikliğe uğratıldığı zaman ise gerek uçakların uçuş mesafeleri artacağı ve rüzgâr türbinleri üzerinden elektrik enerjisi üretimi daha verimli hala geleceği yadsınamaz bir gerçektir.

Günümüzde sabit profile sahip rüzgâr türbini kanatları hub üzerinden hücum açılarını değiştirme özelliğine sahiptir. Bu sayede rüzgâr türbinleri ihtiyaca göre kanat üzerindeki hücum açısını değiştirerek kanadın enerji üretiminde optimum noktada tutulması için çalışırlar. Kullanılan kanat profili ise bir diğer önemli kısıttır. Rüzgâr türbini kanadı profilinin şekil değiştirmesi öncelikli olarak kullanılan kanat profilinin tanımlanması ile başlar. Çalışmada kesit alanı küçük olan NACA0012 simetrik kanat kullanılarak görece verimsiz sayılabilecek bir kanadın özelliklerinin ne kadar değiştirilebileceği incelenmiştir. Bunun için düşük rüzgâr hızlarında türbine iletilen enerjiyi arttırmak için kanat profili daha çok kaldırma kuvveti elde edilebilecek bir şekile dönüştürülmüştür. Rüzgâr hızı emniyetli değerin üzerine çıktığında ise türbine iletilen enerjiyi azaltmak için kanat profili daha az kaldırma kuvveti elde edilebilecek bir şekile evrilmiştir. Olağanüstü hallerde ise türbin kanadının aktif olarak perdövites edilmesi ile kanadın kaldırma kuvveti üretmiyip (dolayısı ile enerji üretmemesi) konusunda hesaplamalar yapılmıştır.

Bu tezde literatürde oluşturulan HAD modelleri ile olası başlangıç noktaları belirlenmiş olup sınır koşullarının tanımlamaları ile ilgili ön bilgiler elde edilmiştir. Ayrıca bir tasarım kısıtı olarak kaldırma kuvveti katsayısının sürüklenme kuvveti katsayısına oranı ile değişen kanat profilinin kullanılabileceği ön görülmüştür.

#### **3.2. Şekil Değiştirebilen Kanat Yapısı ve Tarihçesi**

Şekil değiştirebilen kanat tarihçesinde, yapılan ilk tasarımların rüzgâr türbinlerinden önce uçaklar üzerinde gerçekleştiğini görürüz. İlk değiştirebilen kanatlar süpürme açılı kanatlar olup kanat profilini değiştirmeyip uçuş ihtiyacına göre yüksek hızlarda kanadı

geriye pozisyona kaldırma kuvvetini azaltırken düşük hızlarda kanatları ileri pozisyona alıp kaldırma kuvvetini arttırmaya dayalı yapılardı.

İlk deneme İngiltere’de 1928 yılında Westland Aircraft Ltd firmasında Geoffrey T. R. Hill tarafından tasarlanan ve bir dinozor türünün adı verilen Pterodactylus adlı uçaktır. Bu uçak kanat şeklini günümüzdeki uçaklara kıyasla oldukça az bir açı ile olsa da değiştirebilir. Şekil 3.1.’de uçağın temsili resmi gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Westland Aircraft- Pterodactylus Uçağına ait kanat şekli

Şekil 3.2.’de Bell Aircraft firması tarafından 1951’de ilk uçuşunu yapan ve açılı süpürme kanatlı deneysel uçak olan Bell X-5, İkinci Dünya Savaşının son yıllarında Messerschmitt AG tarafından tasarlanan Messerschmitt P.1101 jet uçağının tersine mühendislik örneklerinden birisi sayılmaktadır.



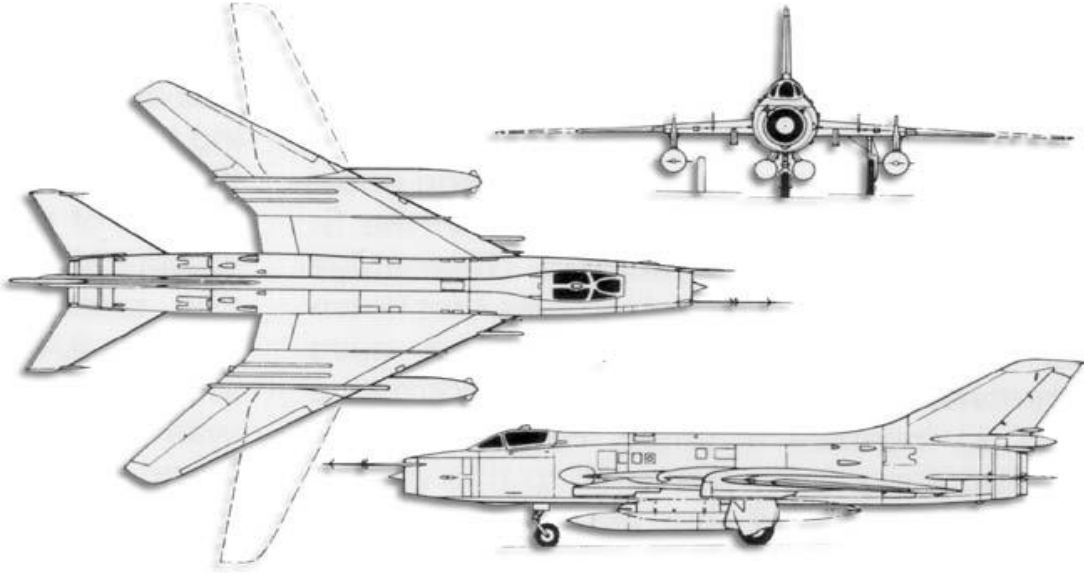
Şekil 3.2. Bell X-5 Ait farklı kanat süpürme açıları

Şekil 3.3.’de gösterilen General Dynamics tarafından tasarlanıp üretilen bir bombardıman uçağı olan ve 1967’de F-111 Aardvark (Karıncayıyen) dünyada hava kuvvetleri envanterine giren ilk süpürme kanat açılı uçaktır.



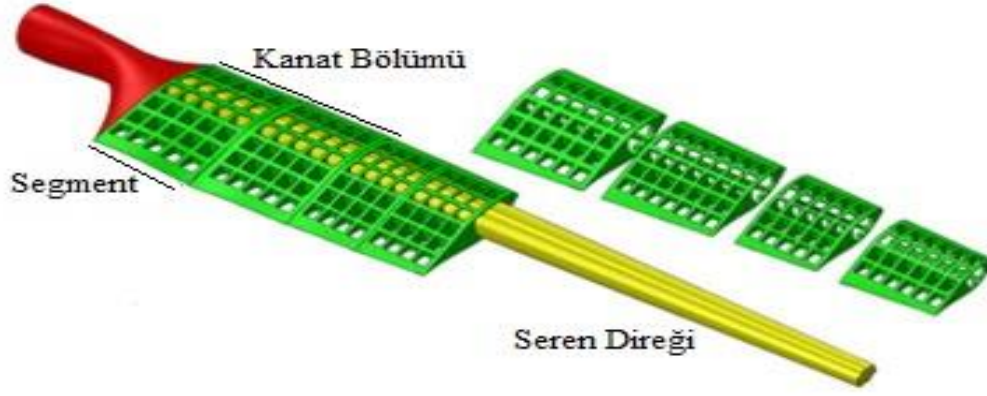
Şekil 3.3. F-111 Aardwark ait farklı süpürme açıları

Şekil 3.4.'de gösterilen Soviyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği tarafından aynı ihtiyaçlarla üretilen ilk süpürme kanatlı uçak olan Sukhoi OKB tarafından tasarlanan ve ilk örneği 1966'da üretilen SU-17 günümüzde hala kullanılmaktadır.



Şekil 3.4. Sukhoi OKB SU-17 ait farklı süpürme açıları

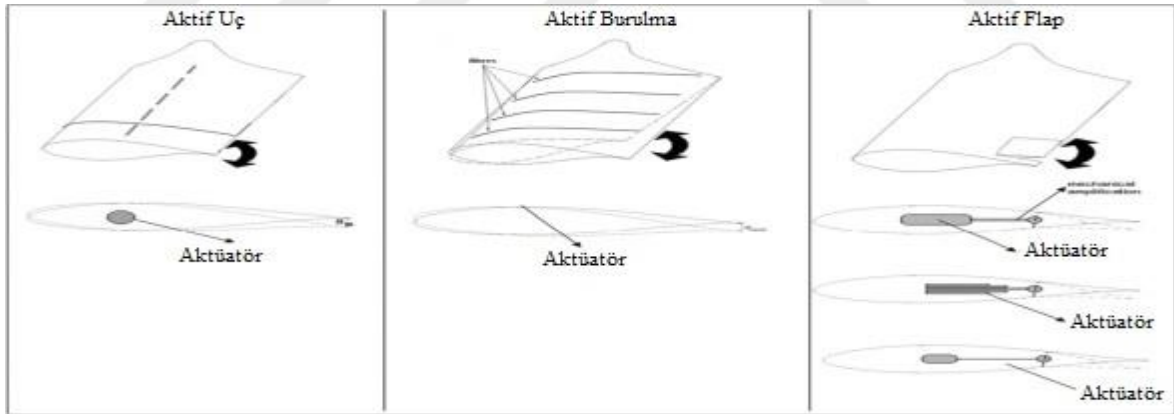
Şekil 3.5.'de tanımlanan kanat yapıları günümüzde ihtiyaca göre modüler yapılar olarak yapılabilmektedirler. Uzun süreli ihtiyaç değişikliklerinde bu yapılar üzerinde değişiklikler yapılabilmektedir.



Şekil 3.5. Modüler burulma açısına sahip türbin kanadı

Bir diğer kanat üzerinde yapılabilecek değişiklik ise hareket edebilen profil yapılarıdır. Günümüzde profil şeklini değiştirebilen kanatlarda ise çeşitli yöntemlerde kanat profili değiştirilebilir. Bu istenilen kısmın kontrolü ile sağlanır. Şekil 3.6’de yer alan değişebilen bölgeler aşağıda incelenmiştir.

- Aktif uç (Active tip)
- Aktif burulma (Active twist)
- Aktif flap (Active flap)
- Aktif uç nokta (Active Trailing Edge)

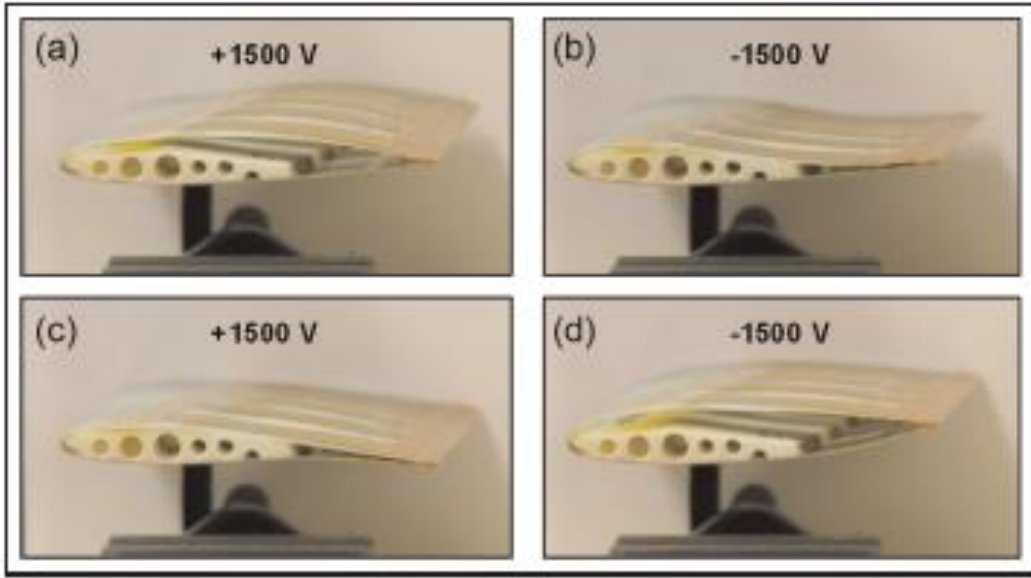


Şekil 3.6. Kanatlarda aktif bölgeler

Aktif bölgelerin kontrolü çeşitli yöntemlerle sağlanır. Bunlar başlıca Şekil 3.6.’de gösterilen pizoseramik ya da Şekil 3.7., Şekil 3.8. ve Şekil 3.9. gösterildiği gibi mekanik aktüatörler ile kontrol edilebilirler.

#### **Pizoseramik kompozit aktüatör**

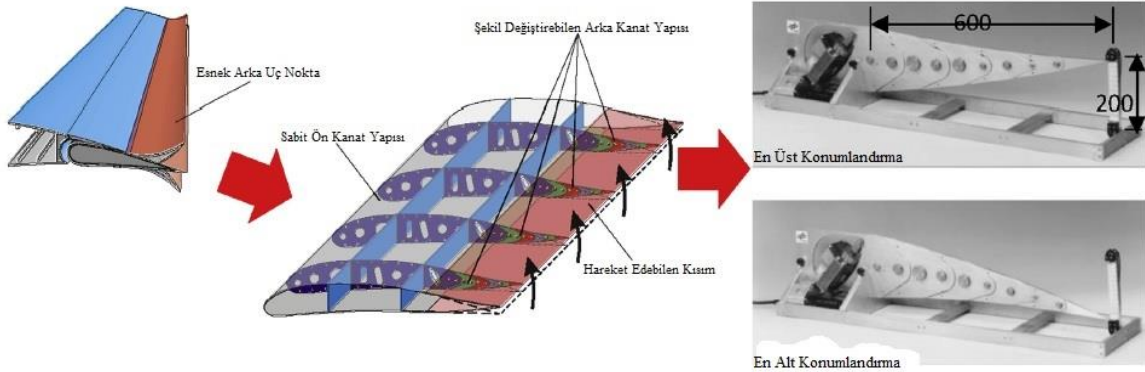
Elektrik potansiyel farkı ile kanadın istenilen şekile getirilmesi için kullanılan yapılarıdır.



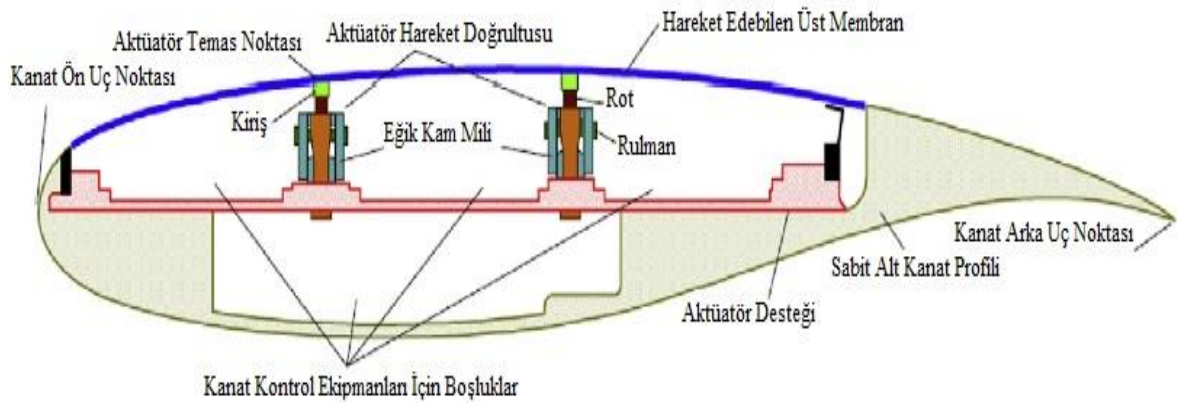
Şekil 3.7. Pizoseraamik kompozit aktüatör [9]

### Mekanik aktüatör

Mekanik motorlar yardımı ile şekil değişikliği istenilen kısıtlarda yapılabilmektedir. İhtiyaca göre mekanik bir parça ya da hareket edebilen bir membran üzerinde mekanik aktüatörler yardımı ile çeşitli bölgelerde değişiklikler yapılabilmektedir.



Şekil 3.8. Aktif uç noktası için mekanik aktüatör [10]



Şekil 3.9. Kanat üst bölgesi için mekanik aktüatör [10]

### 3.3. Matematiksel Modellemeler

Bu kısımda HAD analizinde kullanılacak olan modellere ve modellerin sayısal formüllerine değinilmiştir.

#### 3.3.1. HAD analizi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akışkan akışlarını içeren problemleri analiz etmek ve çözmek için sayısal analiz ve veri yapılarını kullanan akışkanlar mekaniğinin bir koludur. Sıvının serbest akışını simüle etmek için gereken hesaplamaları yapmak için gerekli hesaplamaları ve sınır koşullarında tanımlanmış yüzeylerle akışkanın (sıvılar ve gazlar) etkileşimini gerçekleştirmek için bilgisayarlar kullanılır. Yüksek hızlı süper bilgisayarlarla daha iyi çözümler elde edilebilir ve genellikle en büyük ve en karmaşık sorunları çözmek için gereklidir.

Devam eden araştırmalar, transonik veya türbülanslı akışlar gibi karmaşık benzetim çalışması senaryolarının doğruluğunu ve hızını artıran bir yazılım sağlar. Bu tür bir yazılımın ilk validasyonu tipik olarak rüzgâr tünelleri gibi deneysel aparatlar kullanılarak gerçekleştirilir. Daha önce yapılan analitik veya deneysel bir problemin analizi, karşılaştırma için kullanılabilir. Son bir doğrulama genellikle uçuş testleri gibi tam ölçekli bir test kullanılarak yapılır.

HAD, aerodinamik ve havacılık analizi, hava durumu benzetim çalışması, endüstriyel sistem tasarımı ve analizi, biyo mühendislik, akışkan akışları ve yanma tepkimelerinin benzetim çalışmalarında kullanılmaktadır.

HAD programları çalışılan geometriyi noktalar(nodes) ve ağ yapıları(mesh) kullanarak çeşitli geometrik şekiller yardımı ile çalışılacak geometriyi matematiksel olarak anlamlandırır. Sonrasında ise kullanıcının komutlarına göre bu programlar kullanılan benzetim türüne göre bu noktalar arasında istenilen matematiksel denklemleri çözerler.

#### 3.3.2. Viskoz olmayan akış (inviscid flow) benzetimi

Viskoz olmayan akış, viskozitenin sıfıra eşit olduğu viskoz olmayan bir sıvının akışıdır. Süper akışkanlar olarak bilinen sınırlı viskozite akışkan örnekleri olmasına rağmen, viskoz olmayan akışkanların akışkan dinamiğinde birçok uygulaması vardır.

Reynolds viskozite akışı sayısı viskozite sıfıra yaklaşırken sonsuza yaklaşır. Viskoz kuvvetler, inviscid akış durumunda olduğu gibi ihmal edildiğinde, Navier-Stokes (N-S) denklemi Euler denklemi olarak bilinen bir forma basitleştirilebilir. Bu sadeleştirilmiş

denklem, viskoz olmayan akışa ve düşük viskoziteli akışa ve bir taneden daha büyük bir Reynolds sayısına uygulanır. Euler denklemini kullanarak, düşük viskoziteyi içeren birçok akışkan dinamiği problemi kolayca çözülür, ancak kabul edilebilir önemsiz viskozitenin katı bir sınırın yakınında akışkan bölgesinde artık geçerli olmadığı varsayılmaktadır. 2 boyutlu Euler denklemleri süreklilik ve momentum denklemlerinden oluşmaktadır. Süreklilik denklemleri kütle korunumunu belirtmek için kullanılmaktadır.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

Euler denkleminin diğer bir bileşeni olan momentum denklemleri de 2 boyutlu olarak ve süreklilik denklemlerini de içerecek şekilde yazılabilir. Kullanılan HAD programı ile birlikte çözüm ağı üzerindeki basınç alanları bu denklemler ile birlikte ifade edilebilirler.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (3.3)$$

Akışkanın kendisinin, viskoz olmayan akışın gerçekleşmesi için sıfır viskoziteye sahip olması gerekmez. Bir viskoz akışkanın akışını, viskoz kuvvetlerin yok olacağı şekilde ayarlamak da mümkündür. Böyle bir akışın hareketine karşı viskoz bir direnci yoktur.

### 3.3.3. k- ε benzetimi

k- ε modelini 1974 yılında Launder ve Spalding tarafından oluşturulmuştur ve türbülanslı akış koşulları için ortalama akış özelliklerini simüle etmek için en yaygın kullanılan modeldir. Bu, türbülanslı enerjinin taşınımı ve yayılması gibi geçmiş etkilerini açıklayan iki taşıma denklemi vasıtasıyla türbülansın genel bir tanımını veren 2 denklem modelidir. Taşınan 2 değişken, türbülanstaki enerjiyi belirleyen türbülanslı kinetik enerji k ve türbülanslı kinetik enerjinin yayılma hızını (disipasyonunu) belirleyen türbülans dağılımdır. Türbülans kinetik enerjisi modeli akışın matematiksel olarak noktalar üzerinde ifade edecek formül aşağıda tanımlanmıştır.

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{1.00} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho\epsilon \quad (3.4)$$

Kinetik enerjinin yayılma hızını (disipasyonunu) ise aşağıdaki formül ile tanımlanmıştır.

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{1.30} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + 1.44 \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - 1.92\rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.5)$$

$$\mu_t = 0.09\rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.6)$$

k veya  $\epsilon$  zaman içinde değişim oranı + k veya  $\epsilon$  'nin adveksiyon ile taşınması = k veya  $\epsilon$  'nin difüzyonla taşınması + k veya  $\epsilon$  üretim hızı - k veya  $\epsilon$  'nin imha oranı olarak ifade edilir.

k-  $\epsilon$  modelinin, nispeten küçük basınç gradyanları gibi serbest kayma akımları için uygulanabilir olduğu gösterilmiştir, ancak büyük ters basınç gradyanlarını içeren problemler için en iyi model olmayabilir. Dolayısıyla bu model girişler ve kompresörler için uygun olmayabilir.

### 3.4. İrdellemeler

Bu bölümün başında tez çalışmasında çözülmesi amaçlanan problem tanımlanmıştır. Bölümün devamında ise güncel uygulamalarda literatürdeki şekil değiştirebilen kanatlar irdelenmiştir. Böylece, literatürde kullanılan ve rüzgâr türbini kanadı için benzetim çalışmalarında kullanılan metotlar da açıklanmıştır. Sonraki bölümde ise sayısal analiz kısmı için genel tanımlamalar verilmiştir.

## 4. SAYISAL ANALİZ

### 4.1. Giriş

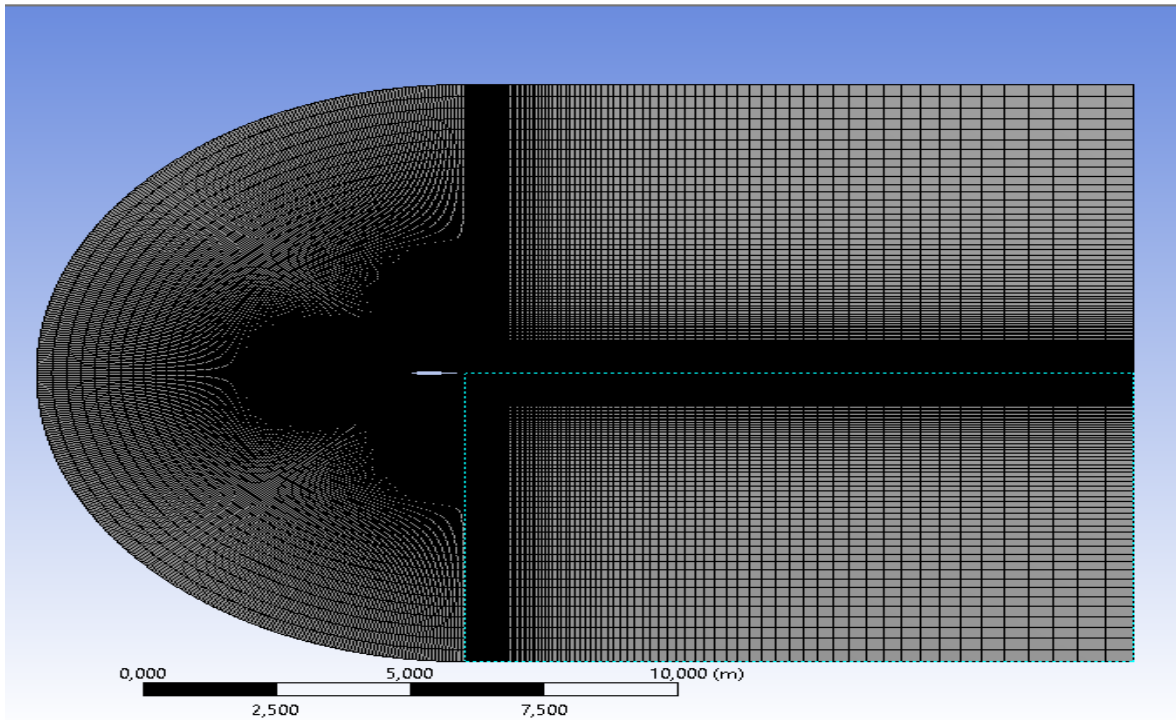
HAD çalışmaları yapılırken ilk adımda geometrinin tanımlanması gerekir. Sonrasında ise programın çözümü matematiksel olarak gerçekleştirilmesi için çözüm ağı ve sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Çözüm için bir diğer önemli kısıt ise kullanılan modeldir. Kullanılacak model ihtiyaca göre seçilmelidir. Seçilen model sonrasında ise yaklaşım sınırı belirlenerek çözümün oluşturulması bu bölümde gerçekleştirilecektir.

### 4.2. Çözüm Ağı ve Sınır Koşulları

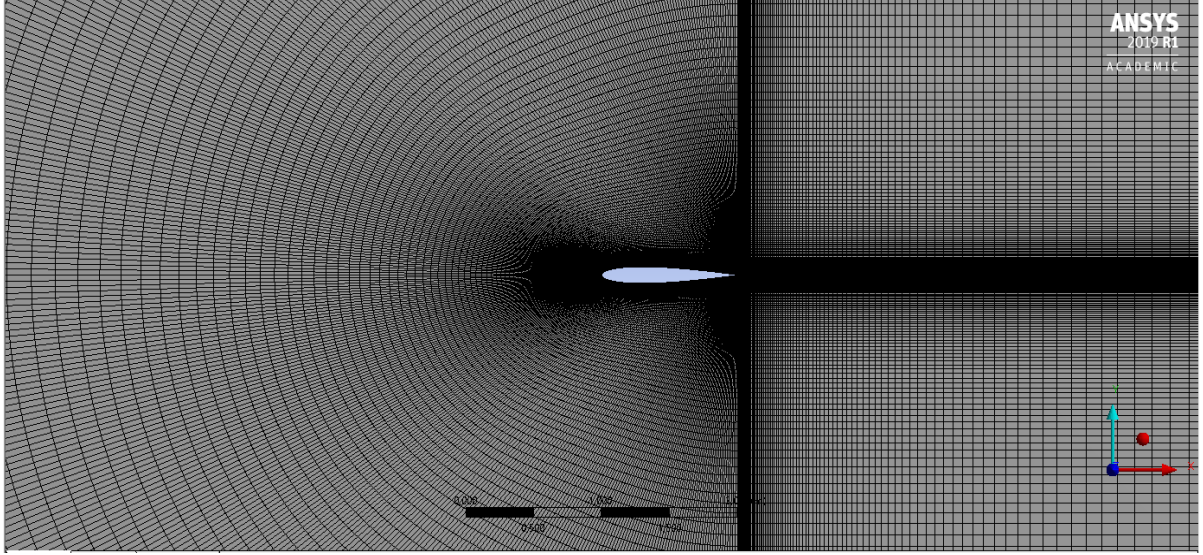
Belirtilen formüllerin rahat ve daha kolay kullanım yöntemi HAD/HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği/Computational Fluid Dynamics) olarak günümüze kadar evrilmiştir.

HAD kullanımı için öncelikli olarak çalışılacak cisimin geometrik tanımlamalarının yapılması gereklidir. Çalışmada profil tanımlamasının yapılabilmesi için [33] sitesinin koordinat dosyalarından faydalanılmıştır.

Oluşturulan Çözüm Ağı (Mesh) Ansys Fluent Programı kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan Çözüm Ağı özellikleri Şekil 4.1., Şekil 4.2. ve Tablo 4.1. de tanımlanmıştır.



Şekil 4.1. Oluşturulan çözüm ağının genel görüntüsü



Şekil 4.2. Oluşturulan çözüm ağının detaylı görüntüsü

Tablo 4.1. Ağ yapısının özellikleri tablosu

| Birim sistemleri                     |                                                 |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Birim Sistemi                        | Metrik (m, kg, N, s, V, A) Derece rad/s Celsius |
| Açı                                  | Derece                                          |
| Rotasyonel Hız                       | rad/s                                           |
| Sıcaklık                             | Celsius                                         |
| Uzunluk Birimi                       | Metre                                           |
| Geometrik kısıtlar ve Ağ Özellikleri |                                                 |
| X Uzunluğu                           | 20,5 m                                          |
| Y Uzunluğu                           | 16 m                                            |
| Z Uzunluğu                           | 0 m                                             |
| Yüzey Alanı                          | 300,45 m <sup>2</sup>                           |
| Düğüm Noktası                        | 72600                                           |
| Element Sayısı                       | 72000                                           |
| Ofset                                | Orta                                            |
| Referans Çerçevesi                   | Lagranjsal                                      |
| Tipi                                 | Kartezyen                                       |
| X Orijini                            | 0 m                                             |
| Y Orijini                            | 0 m                                             |
| Z Orijini                            | 0 m                                             |
| X Aksisi Yön Vektörü                 | [ 1, 0, 0, ]                                    |
| Y Aksisi Yön Vektörü                 | [ 0, 1, 0, ]                                    |

|                      |               |
|----------------------|---------------|
| Z Aksisi Yön Vektörü | [ 0, 0, 1, ]  |
| Element Yerleşimi    | Doğrusal      |
| Element Boyutu       | 1,3002 m      |
| Enflasyon Seçeneği   | Yumuşak Geçiş |
| Geçiş Oranı          | 0,272         |
| Büyüme Oranı         | 1,2           |
| Bias                 | ---- - - - -  |
| Bias Faktörü         | 150           |

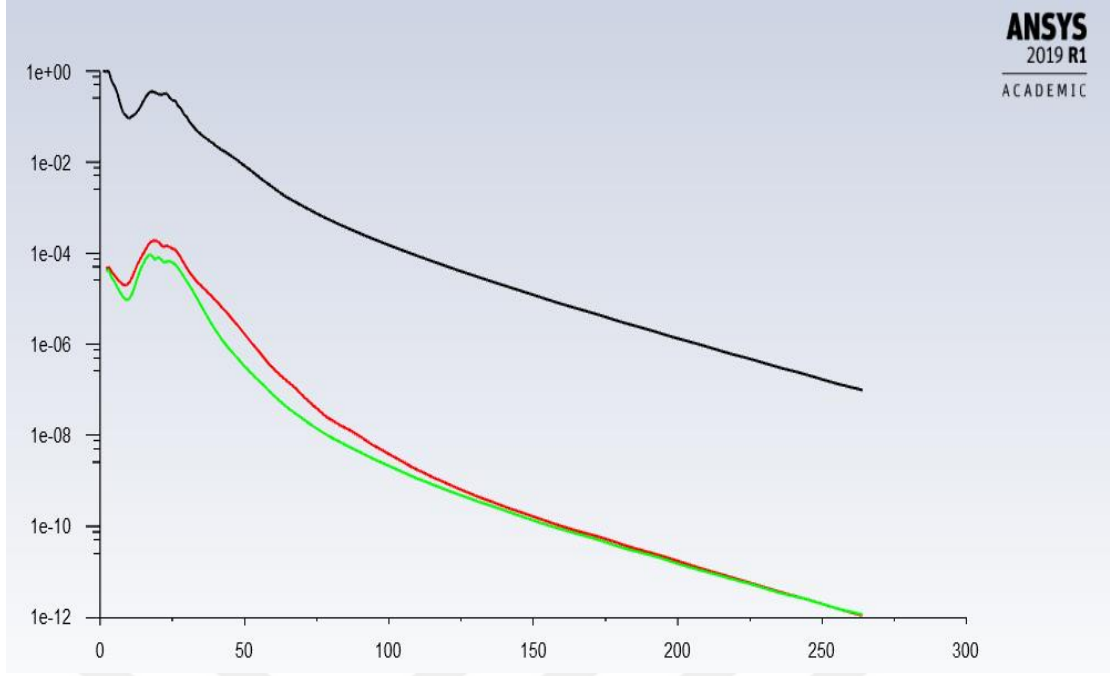
### 4.3. Benzetim Doğrulama Çalışmaları

Benzetim doğrulama çalışmaları 2 kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki halihazırda çalışılan model ile daha önceden sayısal ve deneysel olarak doğrulanan ve NACA0012 için  $4^\circ$  hücum açısı ve 1m/s hız koşullarında profil üzerinde oluşan kaldırma kuvvetinin literatür ile karşılaştırılması için yapılmıştır. Bir diğer doğrulama çalışması ise simetrik kanatların hücum açısı  $0^\circ$  hücum açısı olduğu zaman kaldırma kuvveti oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Bu simetrik kanatların fiziksel bir kısıttır.

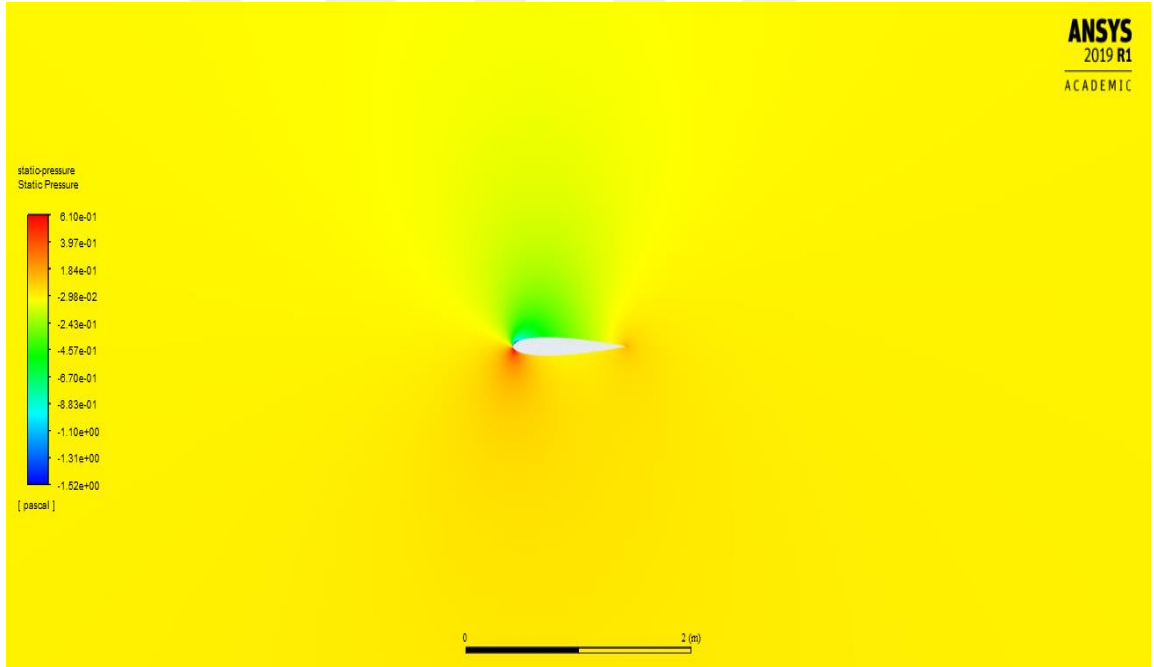
#### 4.3.1. Profil özelliklerinin doğrulama çalışması

Daha önce geometrik tanımlaması yapılan profil için  $4^\circ$  hücum açısı ve 1m/s hız koşullarında çalışma yapılmıştır. Çalışmada viskoz olmayan akış modeli kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada kaldırma kuvveti  $C_l=0,65785139$  olarak hesaplanmıştır. Cornell Üniversitesi'nin [34] Confluence değerleri ise gevşek çözüm ağında  $C_l=0,6315$ , sık çözüm ağında  $C_l=0,6670$  ve deneysel olarak  $C_l=0,6630$  olarak bulunmuştur [34]. Kullanılan benzetim modeli gerçek değerden %0,776563 sapma göstermektedir. Bu şartlar altında kullanılan model ileride yapılacak çalışmalara uygundur.

Artık (Residuals) benzetim modeli sonrasında Şekil 4.3'deki gibi artık tablosu oluşmuştur. Konulan yakınsama şartı olan sürekliliğin  $10^{-6}$  sayı şartına 265. iterasyonda ulaşılmıştır. Tabloda siyah ile gösterilen eğri sürekliliği, kırmızı ile gösterilen eğri x eksenindeki hızı ve yeşil ile gösterilen eğri ise y eksenindeki hızı tanımlamaktadır. Grafiğin dikey eksenini yakınsama sayısını gösterirken yatay eksenini ise iterasyon sayısını göstermektedir. Kullanılan bu süreklilik şartı diğer hesaplamalarda da bir kısıt olarak kullanılmıştır.

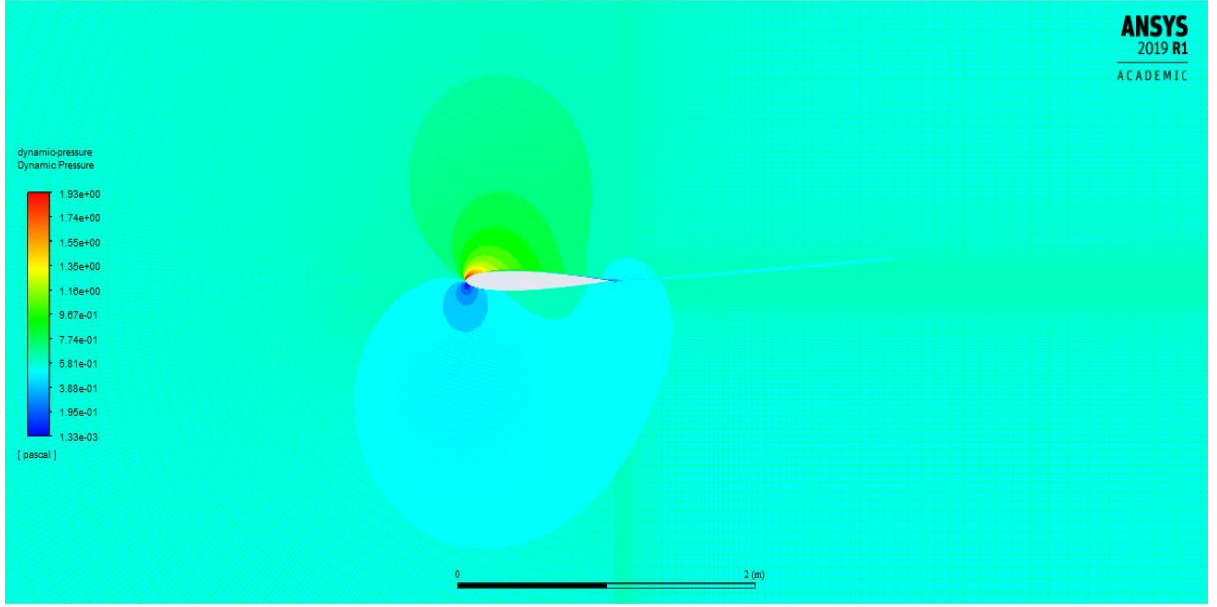


Şekil 4.3. Cornell Üniversitesi confluence sitesine göre benzetim doğrulama artık çizelgesi



Şekil 4.4. Cornell Üniversitesi Confluence sitesine göre benzetim doğrulama statik basınç alanı

Kanat profili üzerinde oluşan Statik Basınç Alanı Şekil 4.4.'deki gibi oluşmuştur. Statik basınç değerleri +61 Pa ile -1,52 Pa değerleri arasında değişmektedir. Kanat profili üzerinde oluşan Dinamik Basınç Alanı da Şekil 4.5.'deki gibi oluşmuştur. Dinamik basınç değerleri ise 1,93 Pa ile  $1,93 \times 10^{-3}$  Pa değerleri arasında gerçekleşmektedir. Viskoz kuvvetler hesaba katılmadığı için viskoz kuvvetlerden oluşan basınç 0 Pa olarak izlenmiş ve oluşan kaldırma kuvveti sayısı  $C_l$  0,65785139 olarak gerçekleşmiştir.

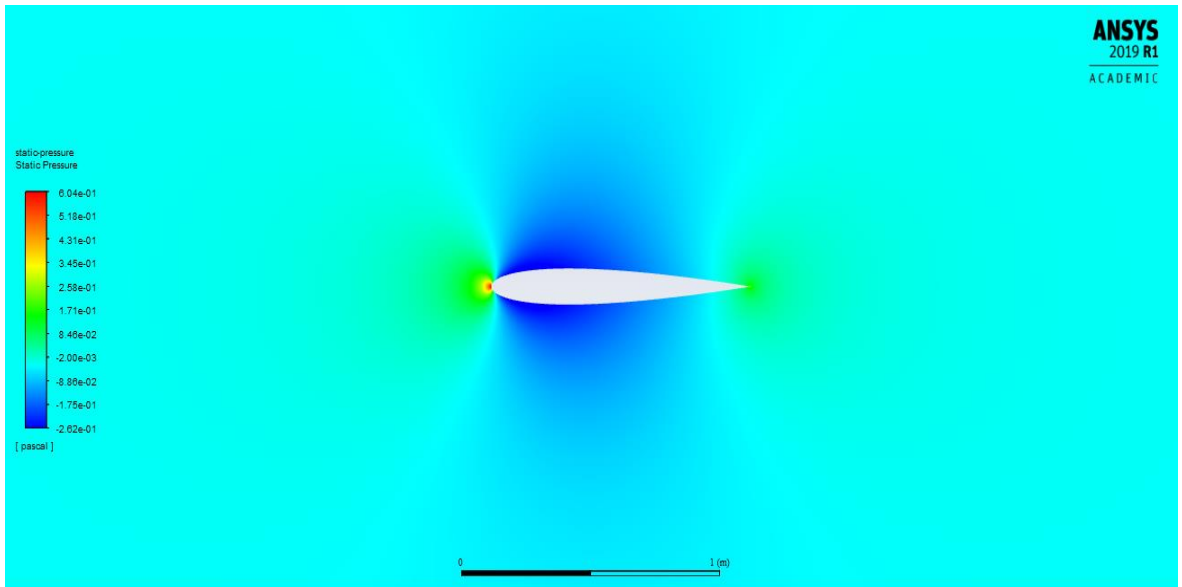


Şekil 4.5. Cornell Üniversitesi confluence sitesine göre benzetim doğrulama dinamik basınç alanı

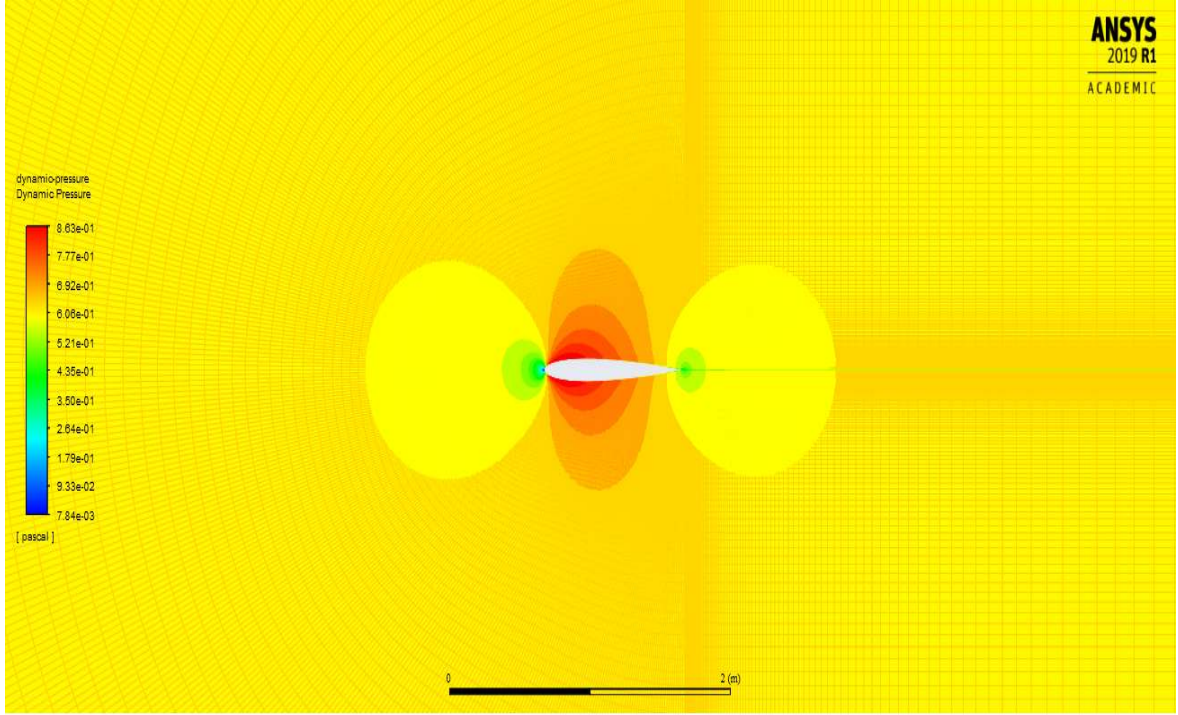
#### 4.3.2. Perdovites

Perodovites kanadın kaldırma kuvveti üretmediği nokta olarak tanımlanmaktadır. Bu nokta yüksek hücum açılarında ya da simetrik kanatlar üzerinde hücum açısının  $0^\circ$  olması ile gerçekleşebilir. Kurulan çözüm ağının (mesh) üzerinden giriş (inlet) bölgesinden hücum açısı  $0^\circ$  olacak şekilde 25m/s hızında hava Inviscid (İdeal Akış) şartları sağlanıp benzetim modeli denenmiştir.

Kanat profili üzerinde oluşan Statik Basınç Alanı Şekil 4.6.'daki gibi oluşmuştur. Statik basınç alanı 60,4 Pa ile -0,262 Pa arasında gerçekleşmiştir. Oluşan Statik basınç alanı kanat üzeride simetri gösterdiği için kanat üzerinde kaldırma kuvveti elde edilemez.



Şekil 4.6. Perdovites (active stall) statik basınç alanı



Şekil 4.7. Perdovites (active stall) dinamik basınç alanı

Şekil 4.7.'de Dinamik basınç alanı tanımlanmıştır. Dinamik basınç alanında basınç değerleri  $0,863 \text{ Pa}$  ile  $7,84 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  değerleri arasında gerçekleşmiştir. Yapılan benzetim modelinde  $Cl=0,0016839096$  olarak hesaplanmıştır. Bu değer 0'a çok yakın olduğundan 0 kabul edilmiştir. Böylelikle yapılan benzetimde kanat profilinin üzerinde kaldırma kuvveti elde edilemeyeceği söylenebilir.

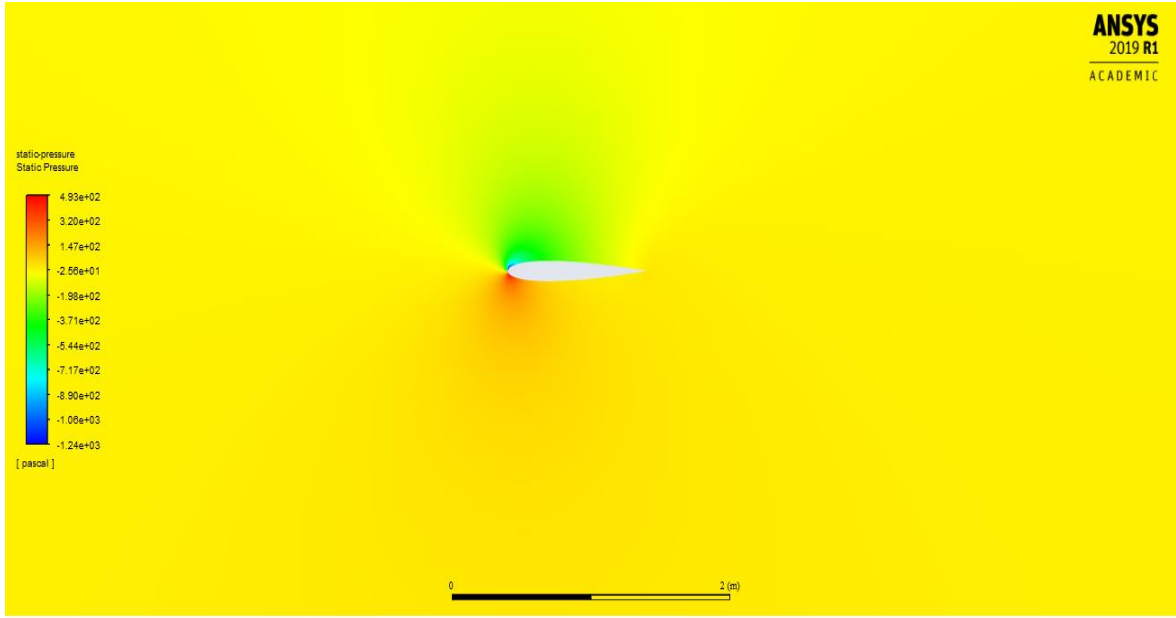
#### 4.4. $10^\circ$ Hücum Açısı ile Çeşitli Hızlarda Kanat Profilinin Şekil Değiştirmesi

Kurulan çözüm ağının(mesh) üzerinden giriş(inlet) bölgesinden hücum açısı  $10^\circ$  olacak şekilde çeşitli hızlarda k- $\epsilon$  (Türbülans değeri bulunduran akış) şartları sağlanıp benzetim modeli denenmiştir. Buradaki temel amaçlardan biri içerisinde türbülans karakteri bulunduran rüzgârlar içinde bir çözüm elde edebilmektir. NACA0012 tabloları incelendiğinde  $10^\circ$  hücum açısı verimli bir nokta olmadığı bilinmektedir. Bu nokta optimum noktadan uzakta olan herhangi bir nokta özelliği taşımaktadır.

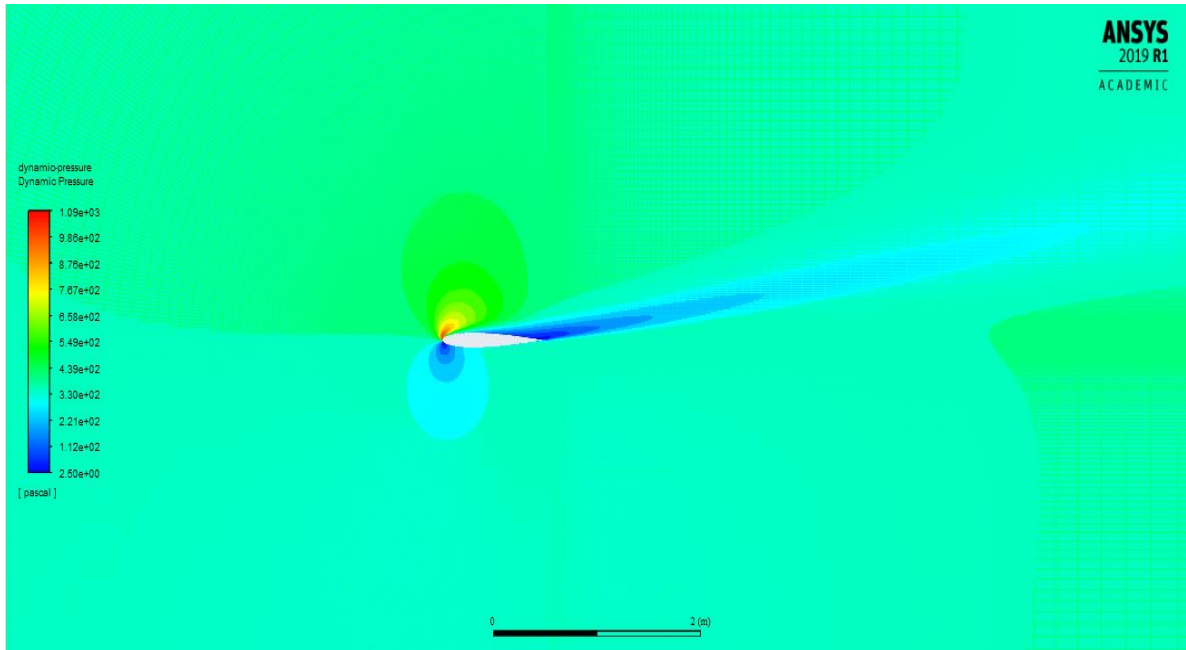
Benzetimler NACA0012 için lift değerinin en yüksek olduğu  $4^\circ$  hücum açısı ve rüzgâr türbinlerinin çalıştığı optimum noktalardan biri olan  $25 \text{ m/s}$  hız için optimize edilmiştir. Optimizasyon çalışmasında esas alınan değer kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranıdır ve  $Cl/Cd$  olarak da ifade edilmektedir. Bu oran ayrıca kanat verimi olarak da değerlendirilir.

#### 4.4.1. 10° Hücüm açısı ve 25m/s hız şartı için benzetim çalışması

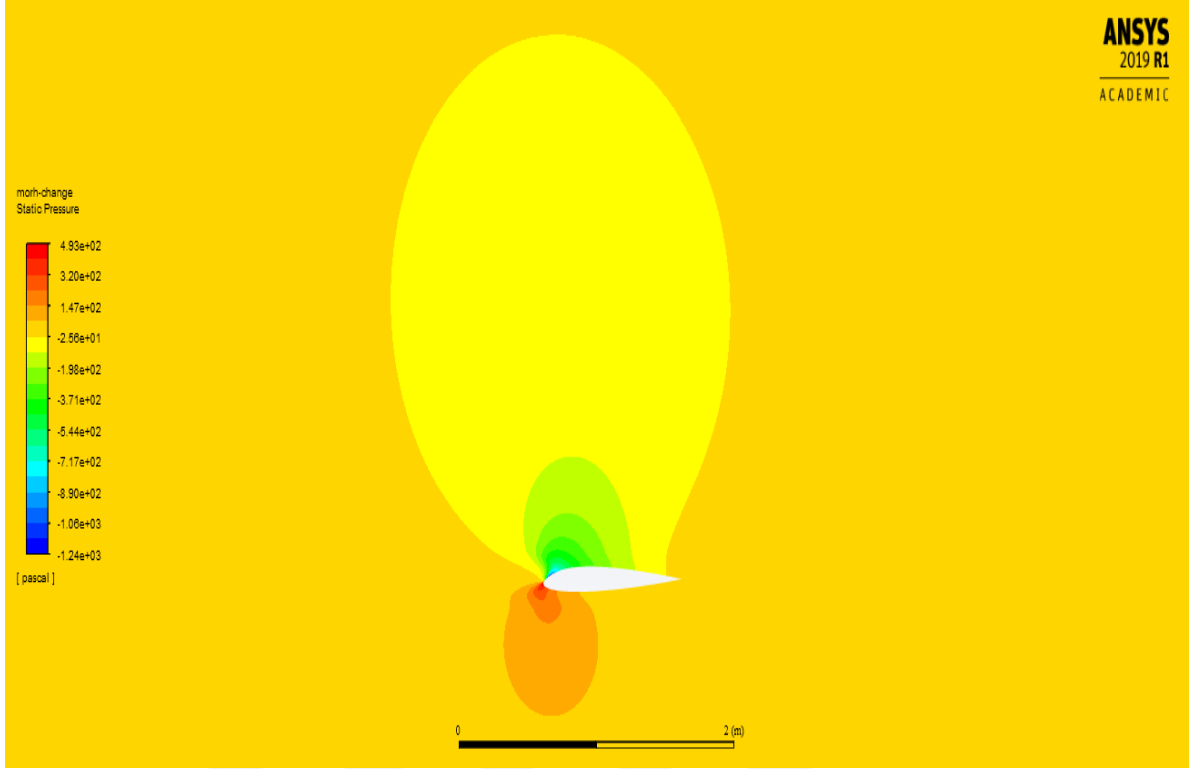
10° hücüm açısı ve 25m/s hız şartındaki benzetim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.8.'de kanat üzerinde statik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Statik basınç değerleri 493 Pa ile -1240 Pa değerleri arasında değişmektedir. Basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.9.'da kanat üzerindeki dinamik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Dinamik basınç değerleri 1090 Pa ile 2,5 Pa değerleri arasında değişmektedir. Statik Basınç alanında olduğu gibi basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir.



Şekil 4.8. 10° Hücüm açısı ile 25m/s statik basınç alanı

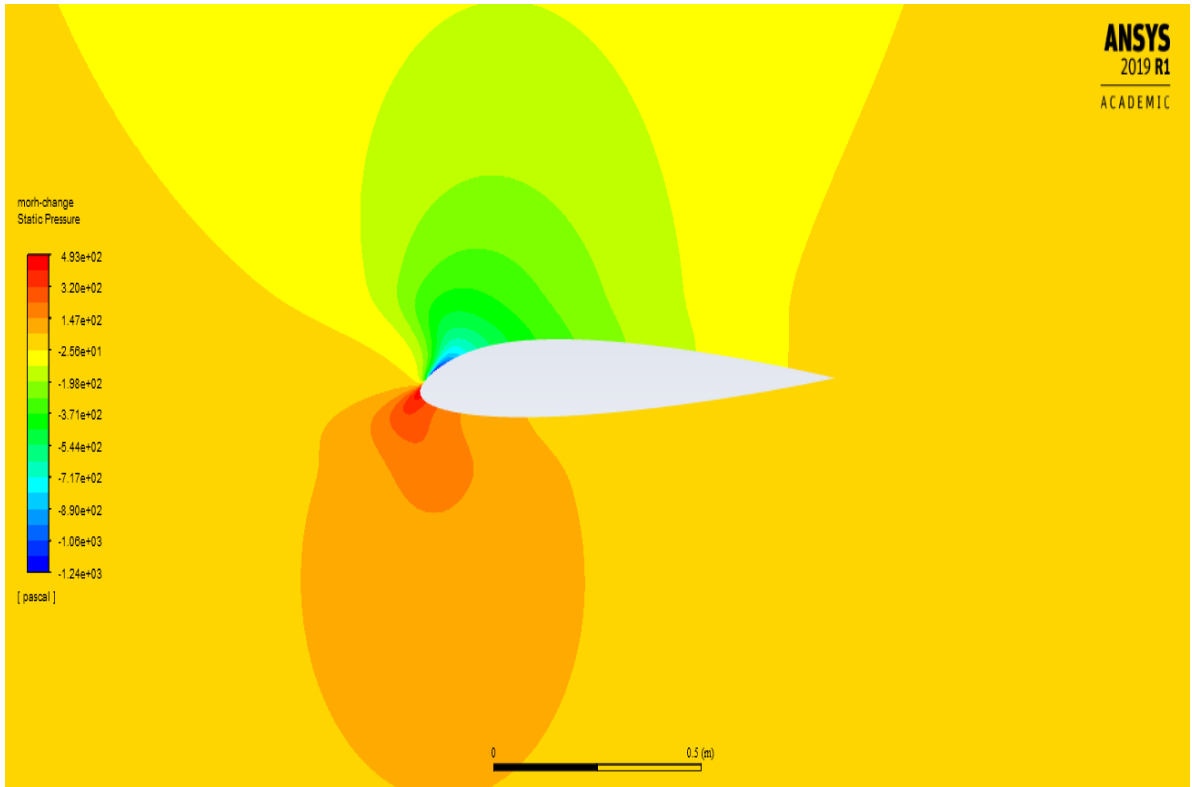


Şekil 4.9. 10° Hücüm açısı ile 25m/s dinamik basınç alanı



Şekil 4.10. 10° Hücüm açısı ile 25m/s profilde şekil değişikliği

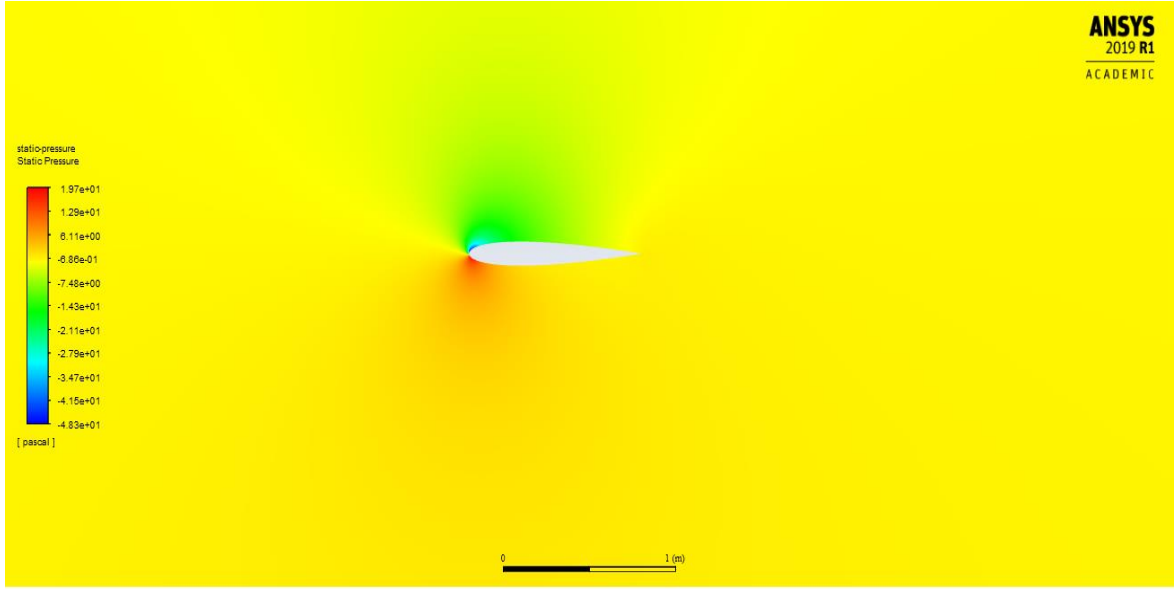
Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.'de kullanılan adjoint solver ile birlikte oluşturulan ve kanat üzerinde yapılan simülasyon sonucu statik basınç alanı ile incelenmiştir. Statik Basınç alanını 493 Pa ile -0,00124 Pa değerleri arasında değişmektedir.



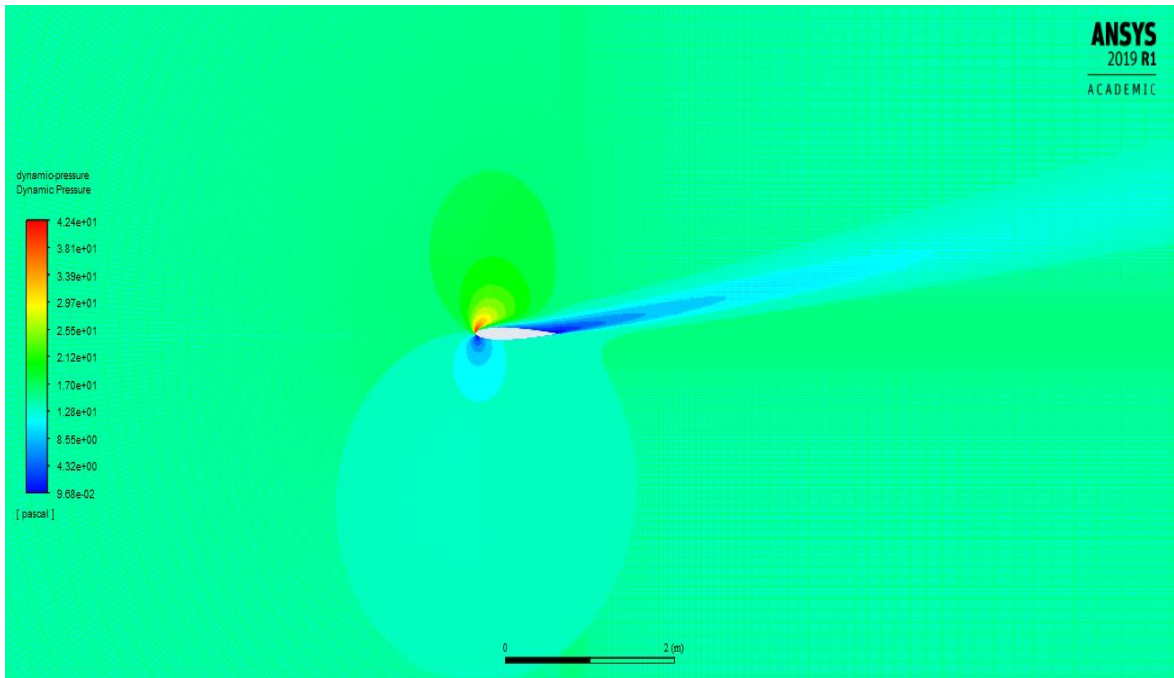
Şekil 4.11. 10° Hücüm açısı ile 25m/s profilde şekil değişikliği

#### 4.4.2. 10° Hücüm açısı ve 5m/s hız şartı için benzetim çalışması

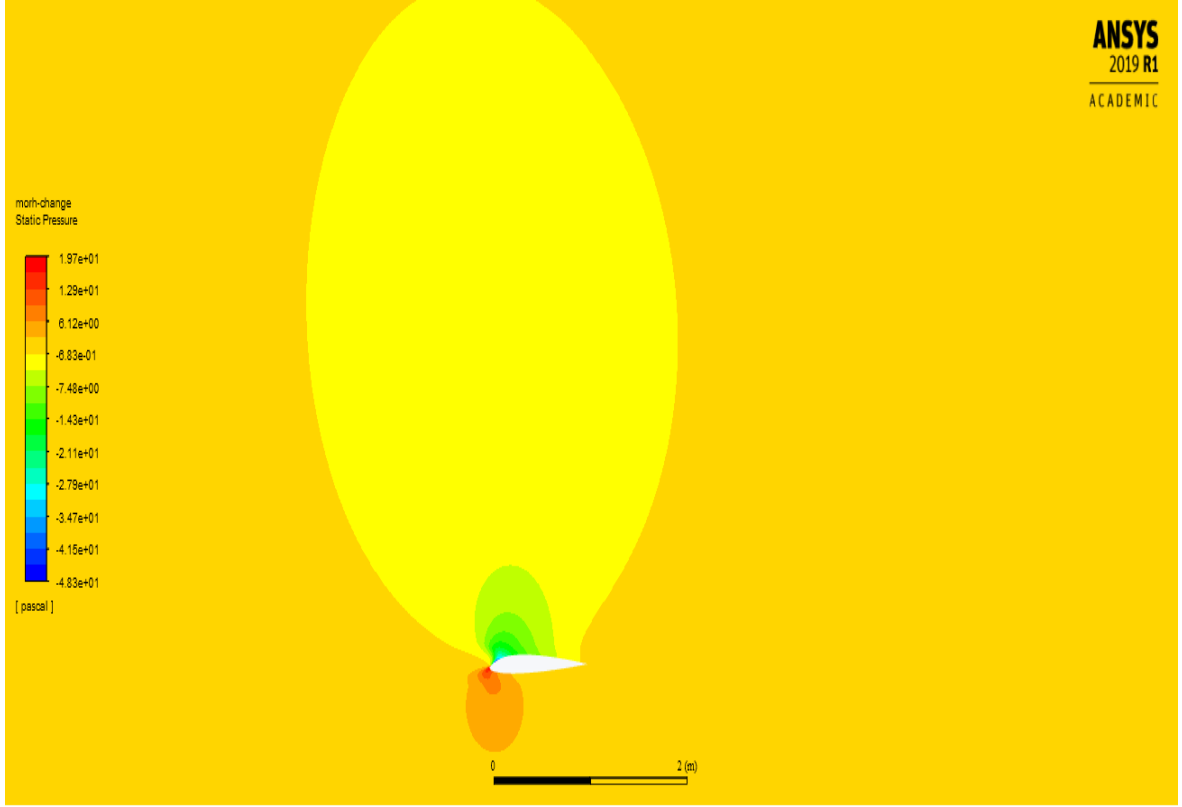
10° hücüm açısı ve 5m/s hız şartındaki benzetim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.12.'de kanat üzerinde statik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Statik basınç değerleri 19,7Pa ile -48,3 Pa değerleri arasında değişmektedir. Basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.13.'de kanat üzerindeki dinamik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Dinamik basınç değerleri 42.4 Pa ile 0,0968 Pa değerleri arasında değişmektedir. Statik Basınç alanında olduğu gibi basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir.



Şekil 4.12. 10° Hücüm açısı ile 5m/s statik basınç alanı

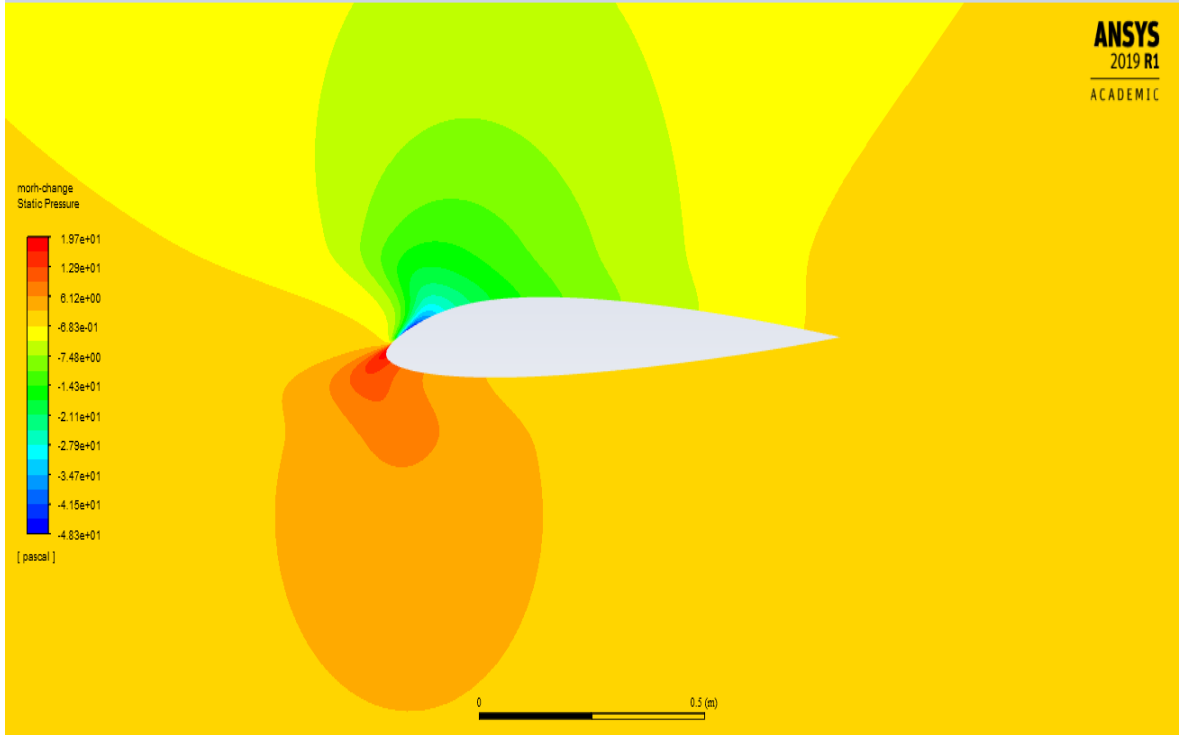


Şekil 4.13. 10° Hücüm açısı ile 5m/s dinamik basınç alanı



Şekil 4.14. 10° Hücüm açısı ile 5m/s profilde şekil değişikliği

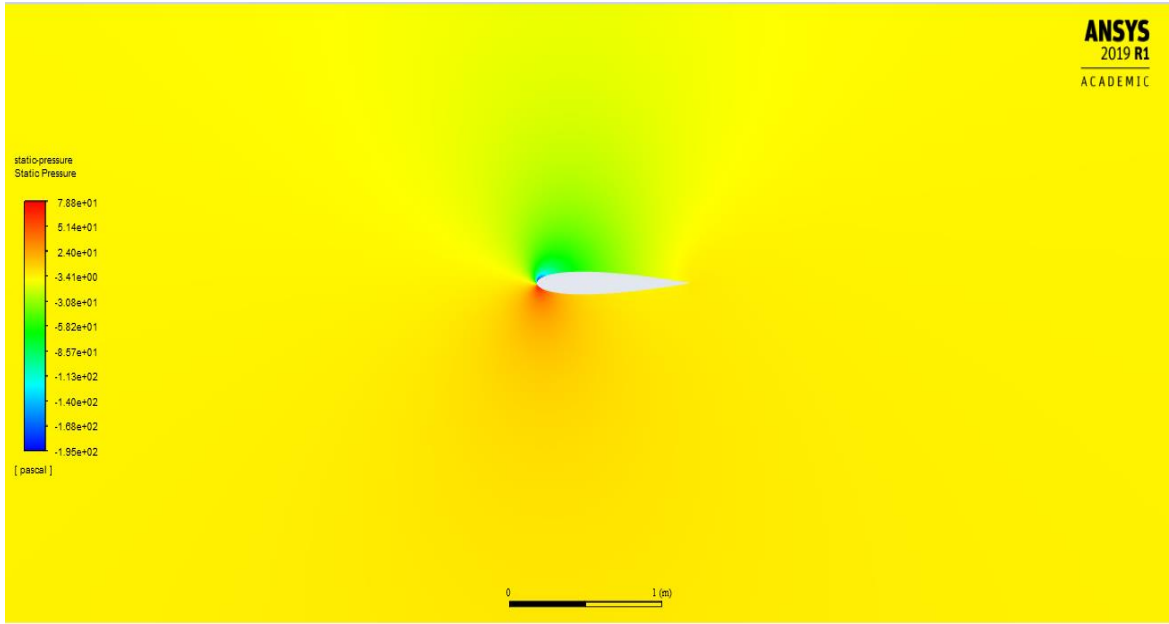
Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.'de kullanılan adjoint solver ile birlikte oluşturulan ve kanat üzerinde yapılan simülasyon sonucu statik basınç alanı ile incelenmiştir. Statik Basınç alanını 19,7 Pa ile -48,3 Pa değerleri arasında değişmektedir.



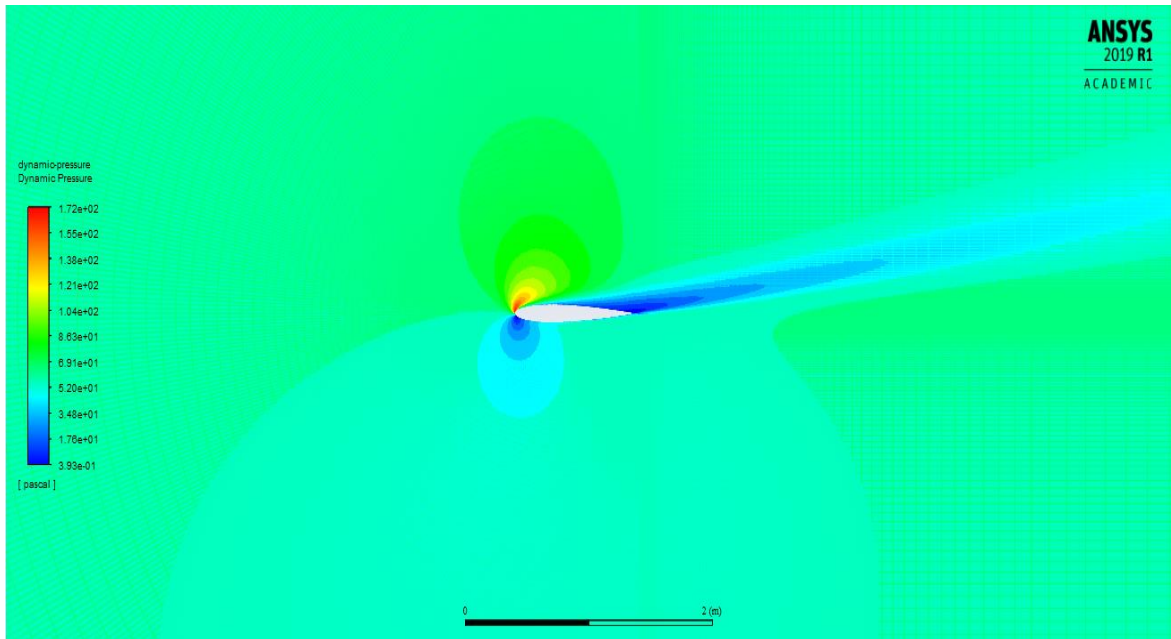
Şekil 4.15. 10° Hücüm açısı ile 5m/s profilde şekil değişikliği

#### 4.4.3. 10° Hücüm açısı ve 10m/s hız şartı için benzetim çalışması

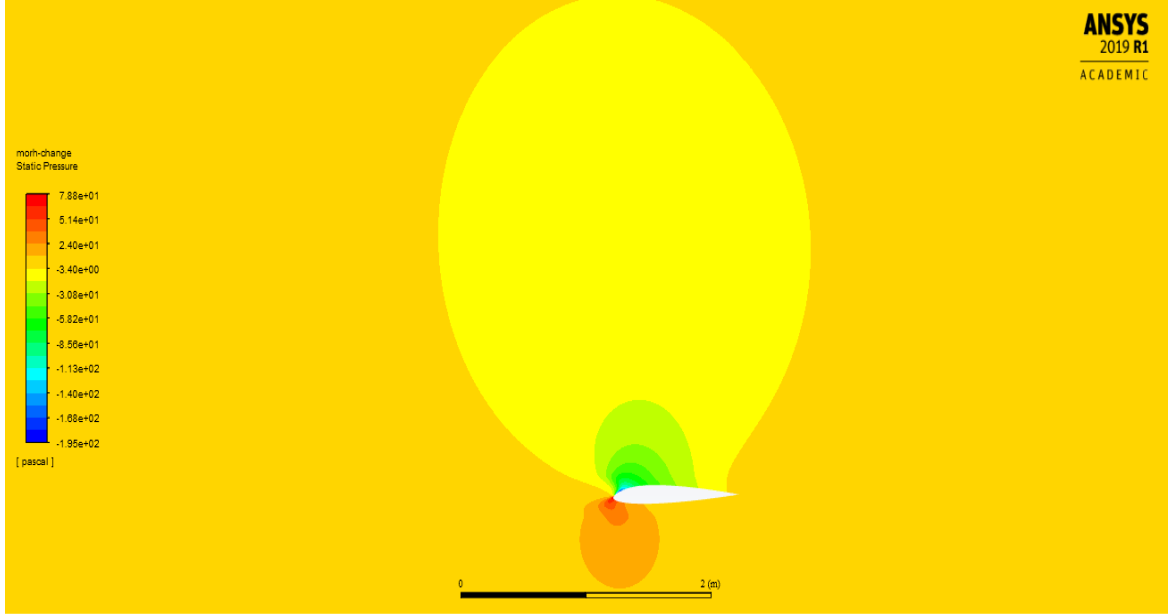
10° hücüm açısı ve 10m/s hız şartındaki benzetim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.16'da kanat üzerinde statik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Statik basınç değerleri 78.8 Pa ile -195 Pa değerleri arasında değişmektedir. Basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.17.'de kanat üzerindeki dinamik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Dinamik basınç değeleri 172 Pa ile -0,393 Pa değerleri arasında değişmektedir. Statik Basınç alanında olduğu gibi basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir.



Şekil 4.16. 10° Hücüm açısı ile 10m/s statik basınç alanı

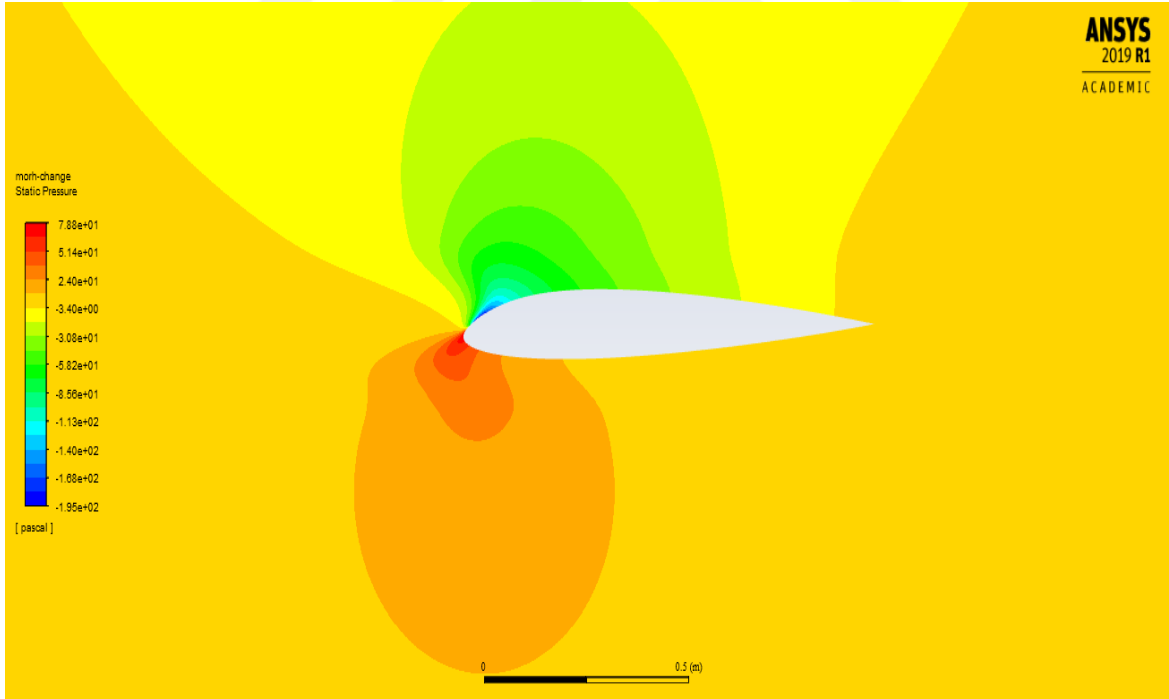


Şekil 4.17. 10° Hücüm açısı ile 10m/s dinamik basınç alanı



Şekil 4.18. 10° Hücüm açısı ile 10m/s profilde şekil değişikliği

Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.'de kullanılan adjoint solver ile birlikte oluşturulan ve kanat üzerinde yapılan simülasyon sonucu statik basınç alanı ile incelenmiştir. Statik Basınç alanını 78,8 Pa ile -195 Pa değerleri arasında değişmektedir.

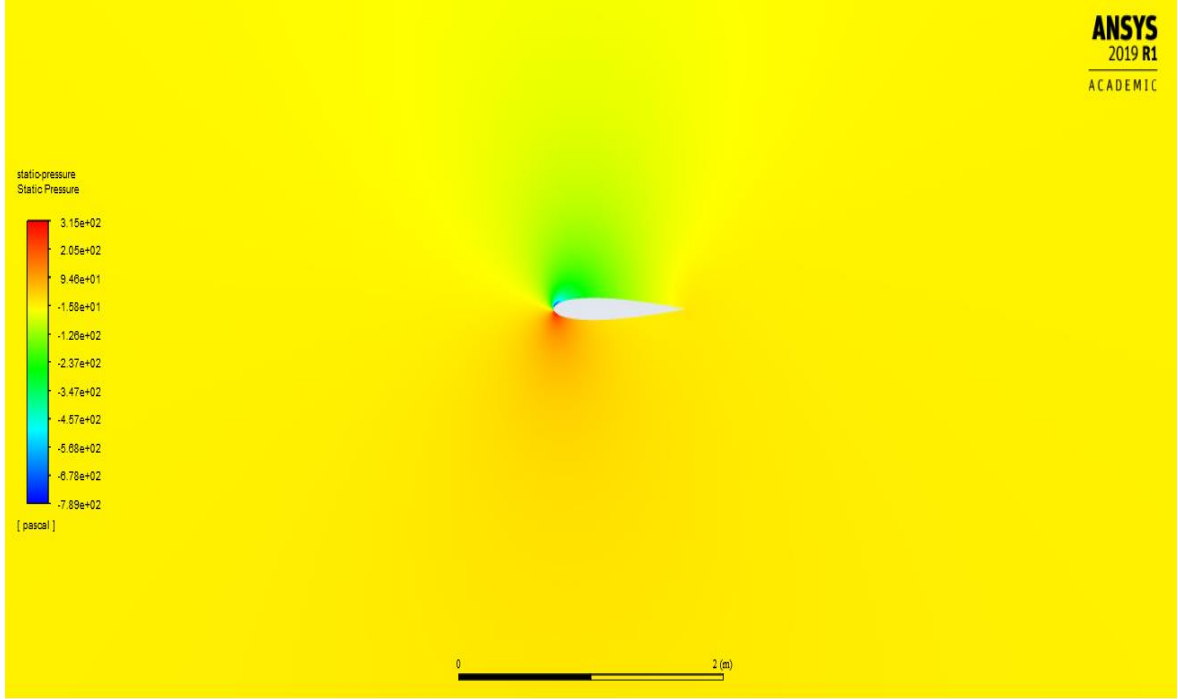


Şekil 4.19. Hücüm açısı ile 10m/s profilde şekil değişikliği

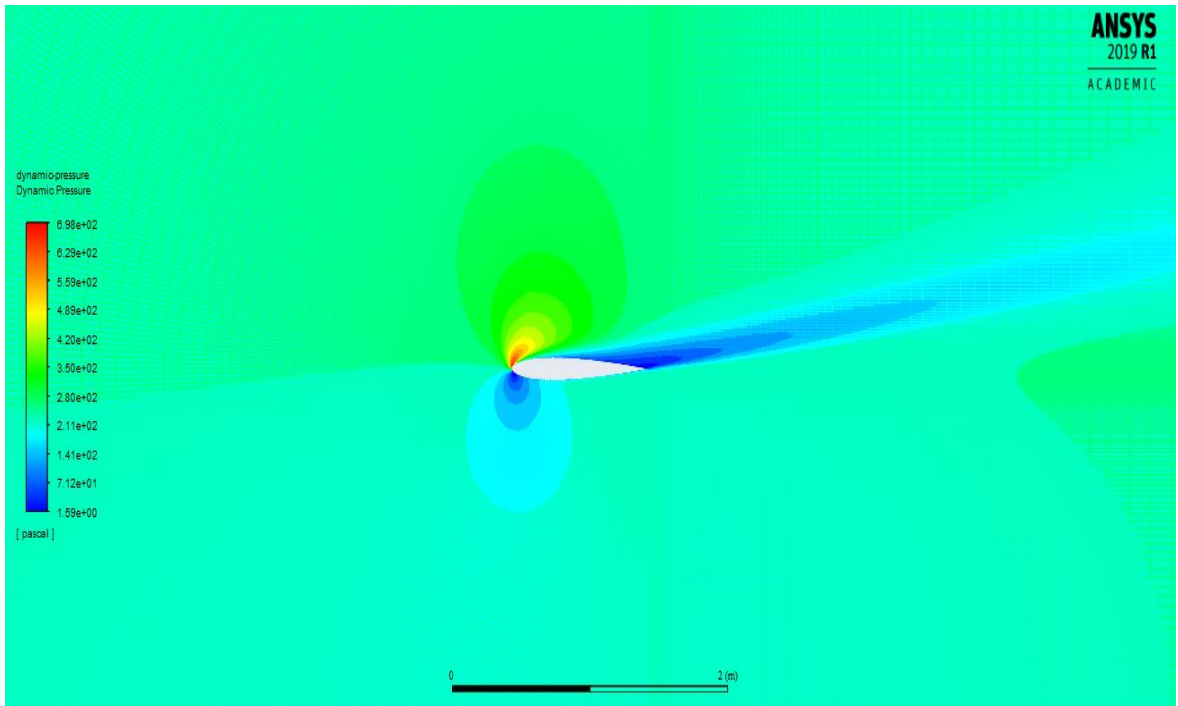
#### 4.4.4. 10° Hücüm açısı ve 20m/s hız şartı için benzetim çalışması

10° hücüm açısı ve 20m/s hız şartındaki benzetim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.20.' de kanat üzerinde statik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Statik basınç değerleri

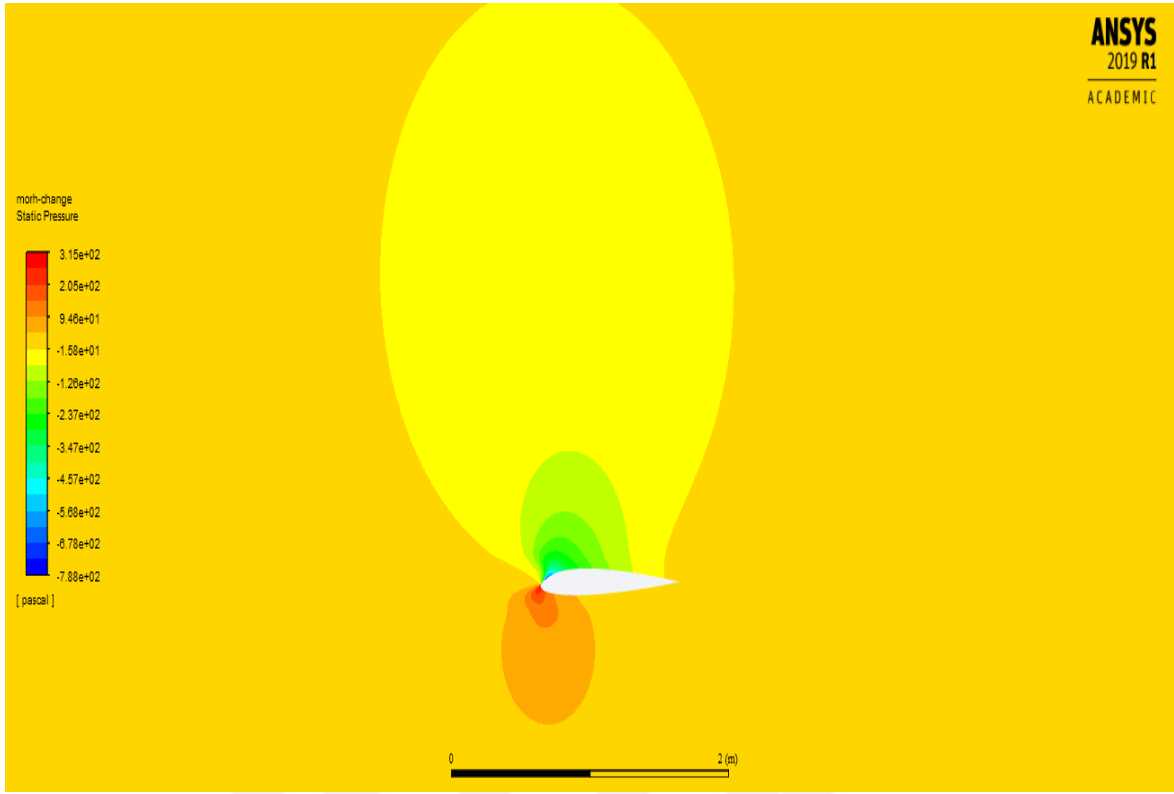
315 Pa ile -789 Pa değerleri arasında değişmektedir. Basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.21.'de kanat üzerindeki dinamik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Dinamik basınç değerleri 698 Pa ile 1,59 Pa değerleri arasında değişmektedir. Statik Basınç alanında olduğu gibi basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir.



Şekil 4.20. 10° Hücüm açısı ile 20m/s statik basınç alanı

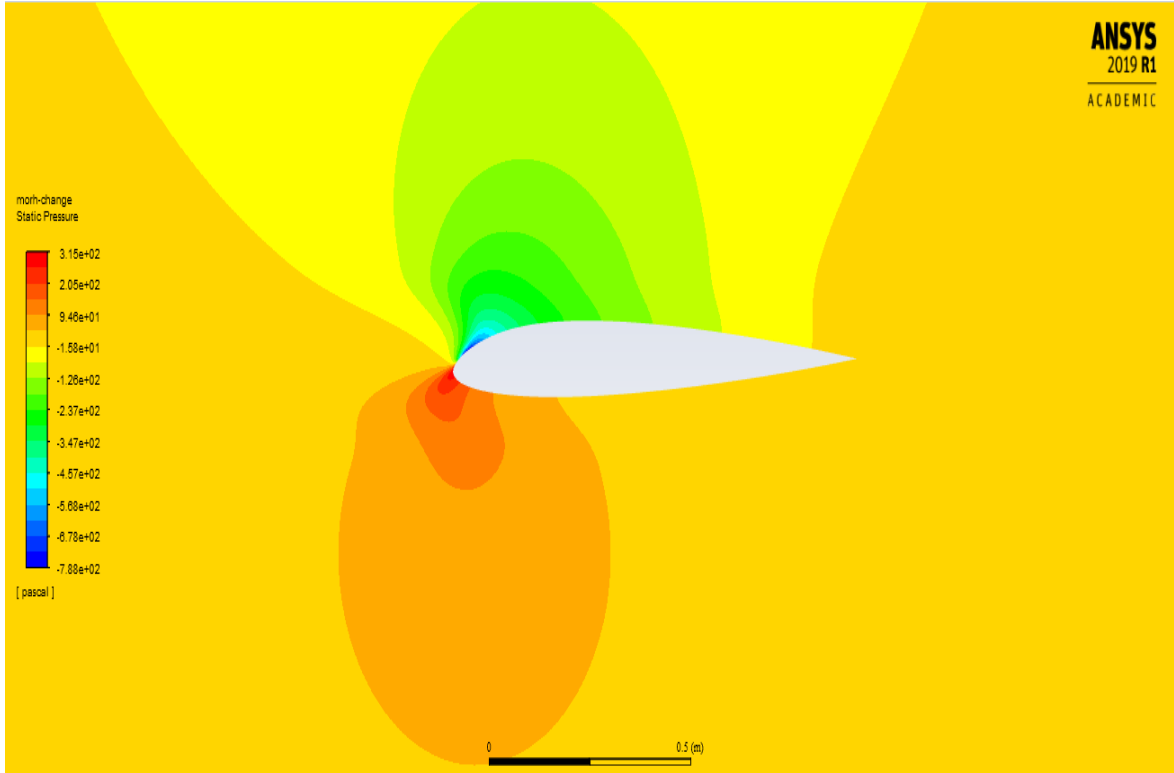


Şekil 4.21. 10° Hücüm açısı ile 20m/s dinamik basınç alanı



Şekil 4.22. 10° Hücüm açısı ile 20m/s profilede şekil değişikliği

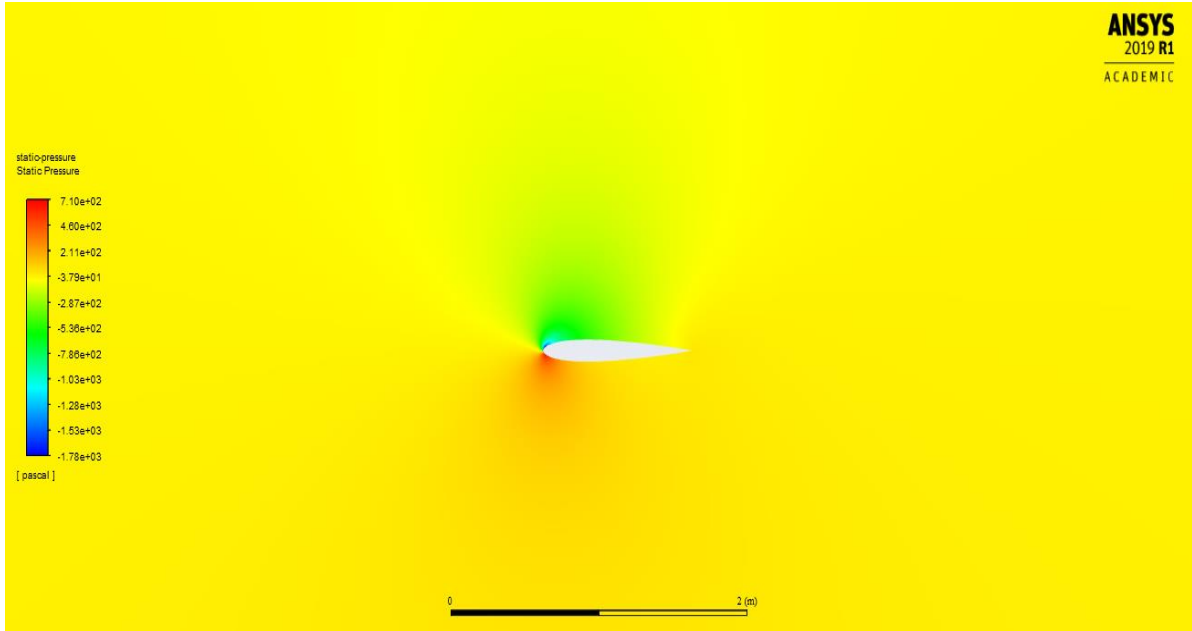
Şekil 4.22. ve Şekil 4.23.'de kullanılan adjoint solver ile birlikte oluşturulan ve kanat üzerinde yapılan simülasyon sonucu statik basınç alanı ile incelenmiştir. Statik Basınç alanını 315 Pa ile -788 Pa değerleri arasında değişmektedir.



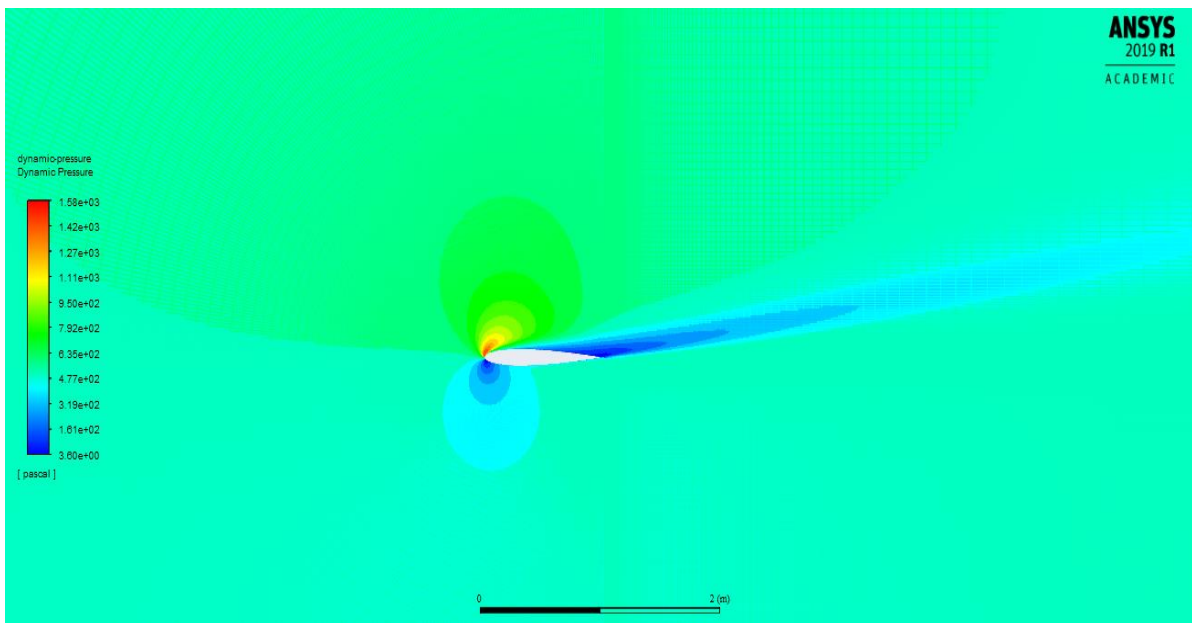
Şekil 4.23. 10° Hücüm açısı ile 20m/s profilede şekil değişikliği

#### 4.4.5. 10° Hücüm açısı ve 30 m/s hız şartı için benzetim çalışması

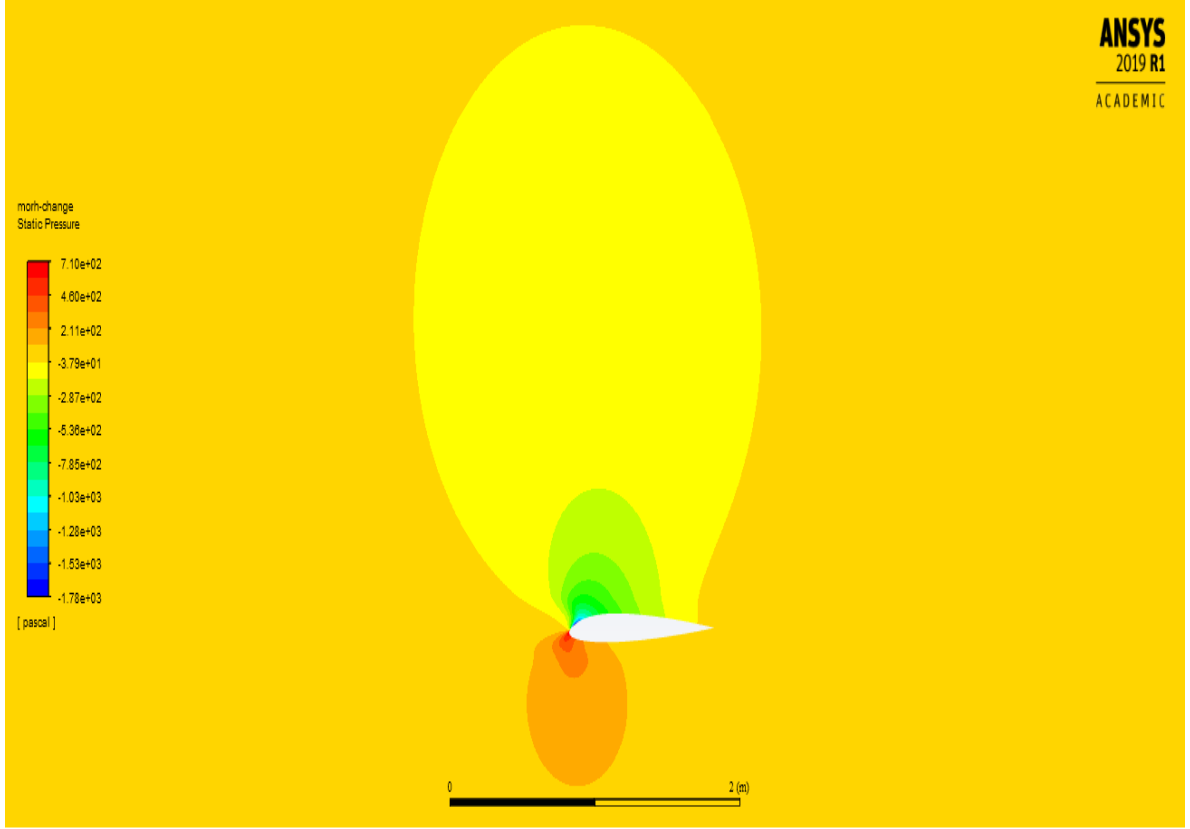
10° hücüm açısı ve 30 m/s hız şartındaki benzetim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.24.'de kanat üzerinde statik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Statik basınç değerleri 710 Pa ile -1780 Pa değerleri arasında değişmektedir. Basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.25.'de kanat üzerindeki dinamik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Dinamik basınç değeri 1580 Pa ile 36 Pa değerleri arasında değişmektedir. Statik Basınç alanında olduğu gibi basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir.



Şekil 4.24. 10° Hücüm açısı ile 30m/s statik basınç alanı

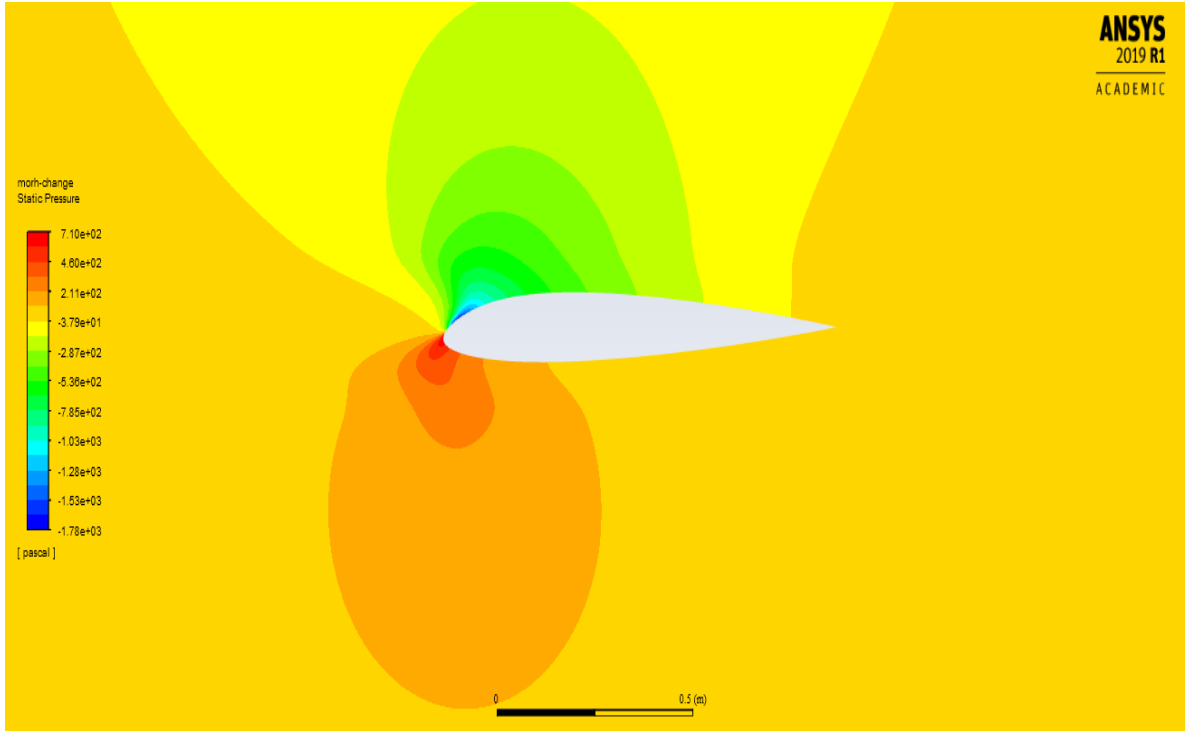


Şekil 4.25. 10° Hücüm açısı ile 30m/s dinamik basınç alanı



Şekil 4.26. 10° Hücüm açısı ile 30m/s profilde şekil değişikliği

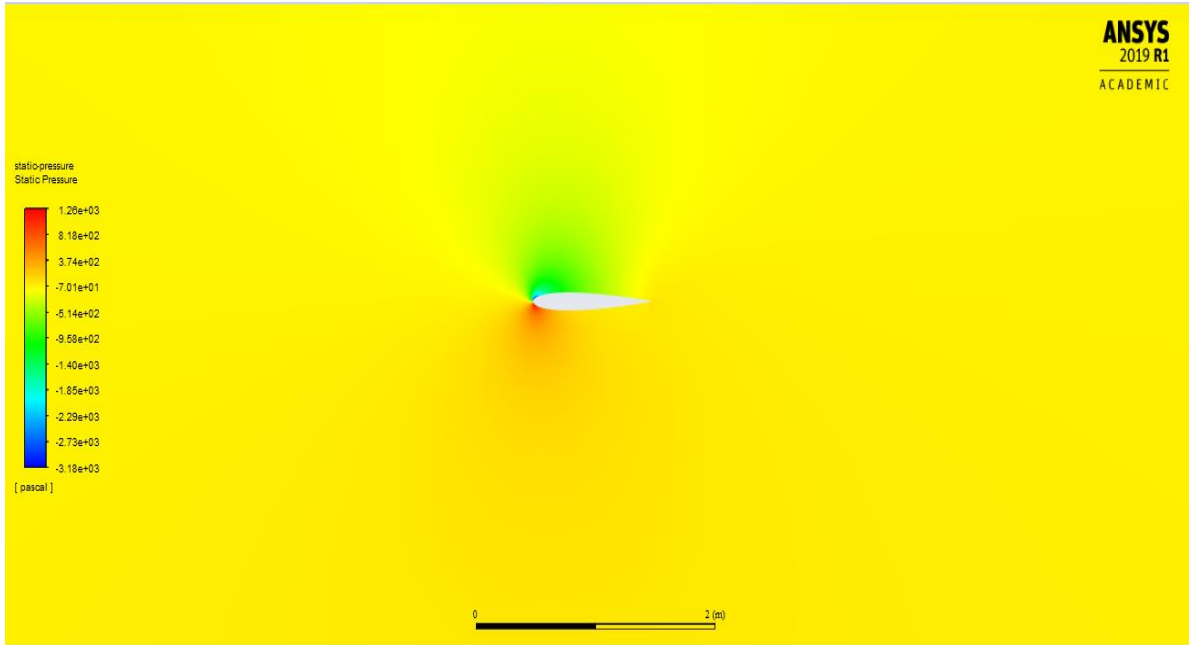
Şekil 4.26. ve Şekil 4.27.'de kullanılan adjoint solver ile birlikte oluşturulan ve kanat üzerinde yapılan simülasyon sonucu statik basınç alanı ile incelenmiştir. Statik Basınç alanını 710 Pa ile -178 Pa değerleri arasında değişmektedir.



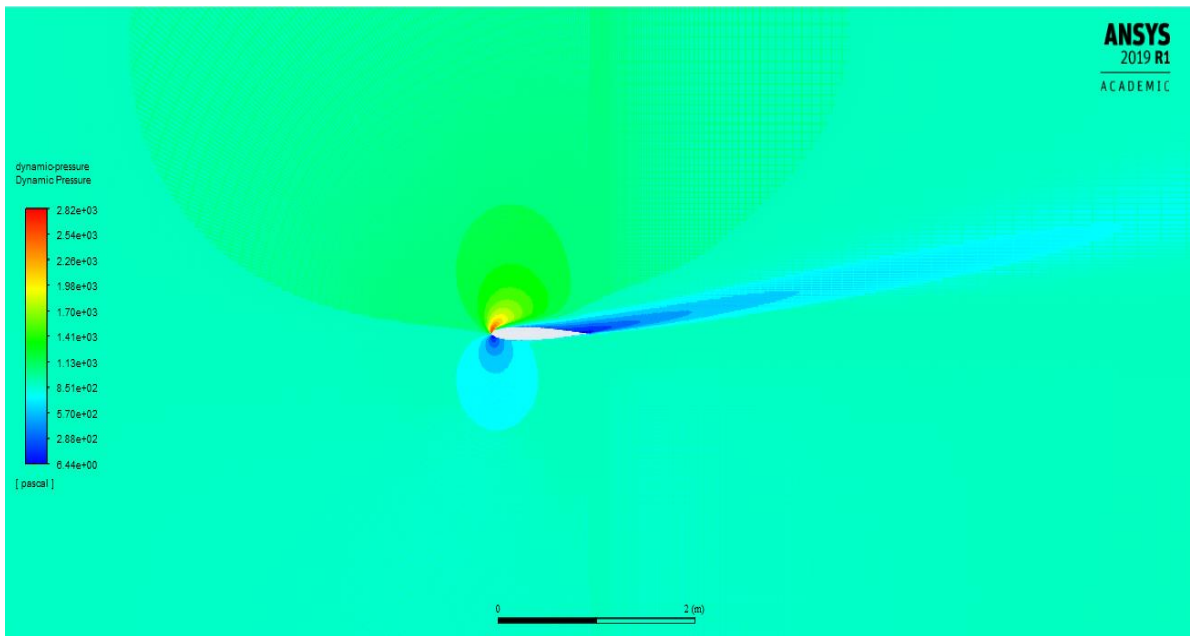
Şekil 4.27. 10° Hücüm açısı ile 30m/s profilde şekil değişikliği

#### 4.4.6. 10° Hücüm açısı ve 40m/s hız şartı için benzetim çalışması

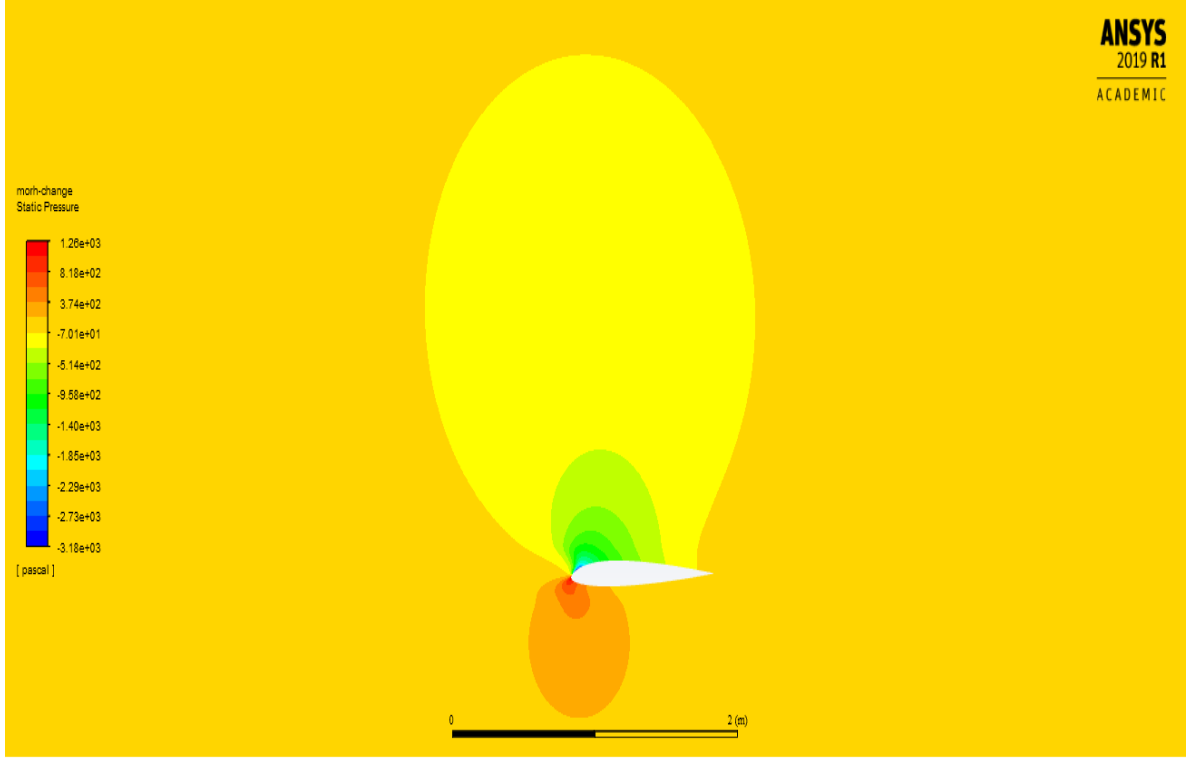
10° hücüm açısı ve 5m/s hız şartındaki benzetim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.28.'de kanat üzerinde statik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Statik basınç değerleri 1260 Pa ile -3180 Pa değerleri arasında değişmektedir. Basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.29.'da kanat üzerindeki dinamik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Dinamik basınç değeleri 2820 Pa ile 6,44 Pa değerleri arasında değişmektedir. Statik Basınç alanında olduğu gibi basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir.



Şekil 4.28. 10° Hücüm açısı ile 40m/s statik basınç alanı

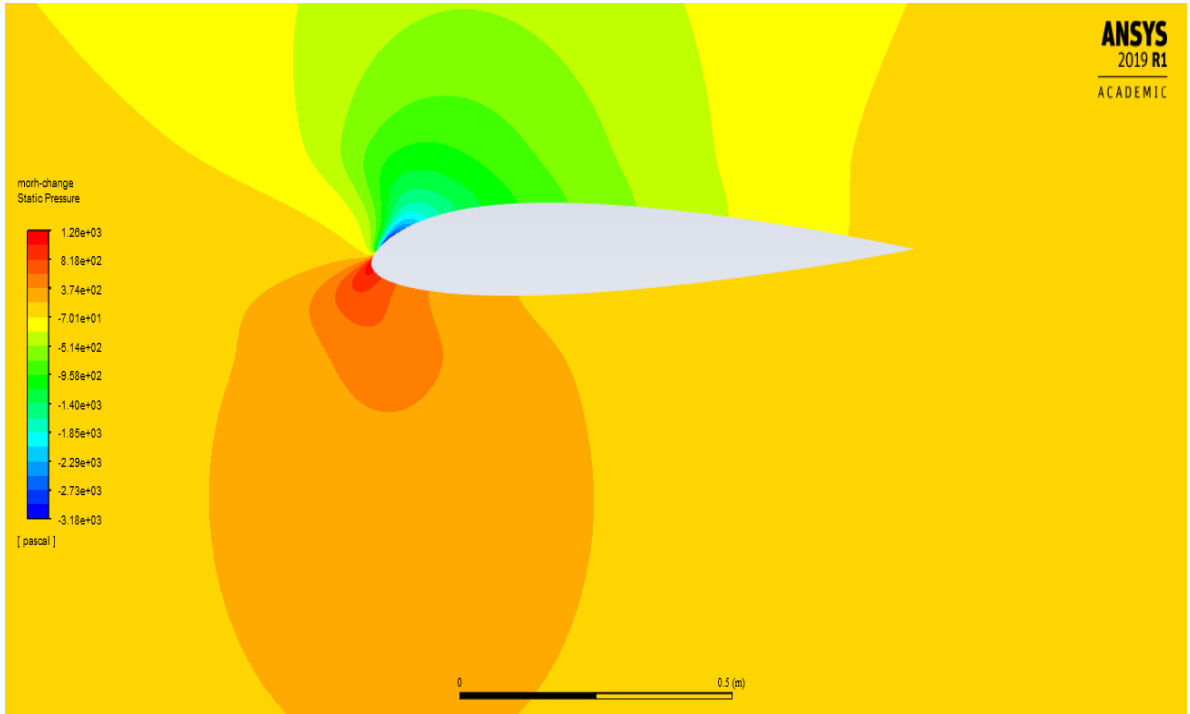


Şekil 4.29. 10° Hücüm açısı ile 40m/s dinamik basınç alanı



Şekil 4.30. 10° Hücüm açısı ile 40m/s profilde şekil değişikliği

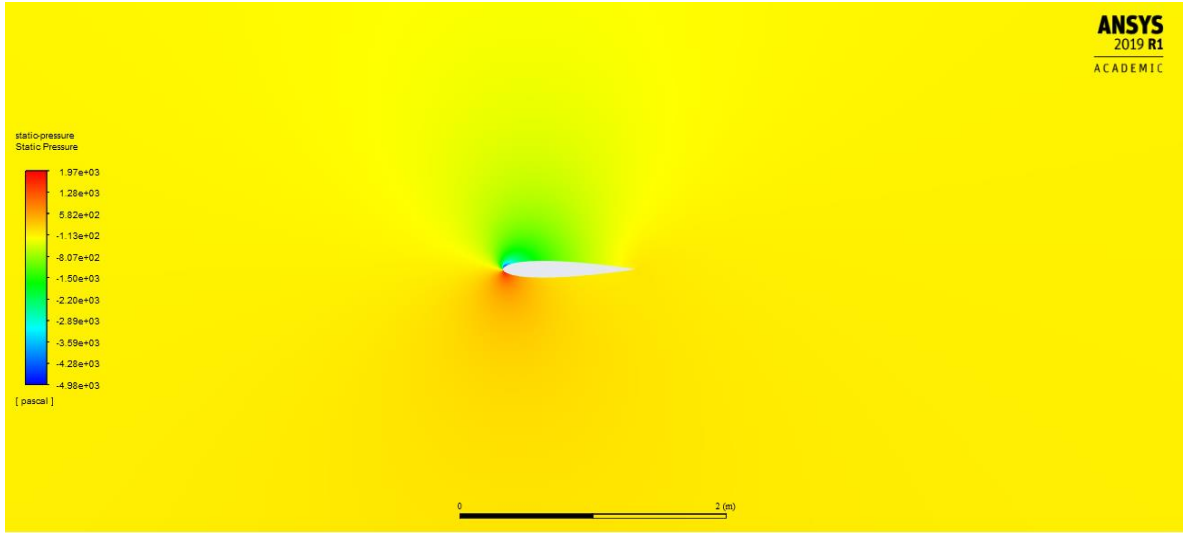
Şekil 4.30. ve Şekil 4.31.'de kullanılan adjoint solver ile birlikte oluşturulan ve kanat üzerinde yapılan simülasyon sonucu statik basınç alanı ile incelenmiştir. Statik Basınç alanını 1260 Pa ile -3180 Pa değerleri arasında değişmektedir.



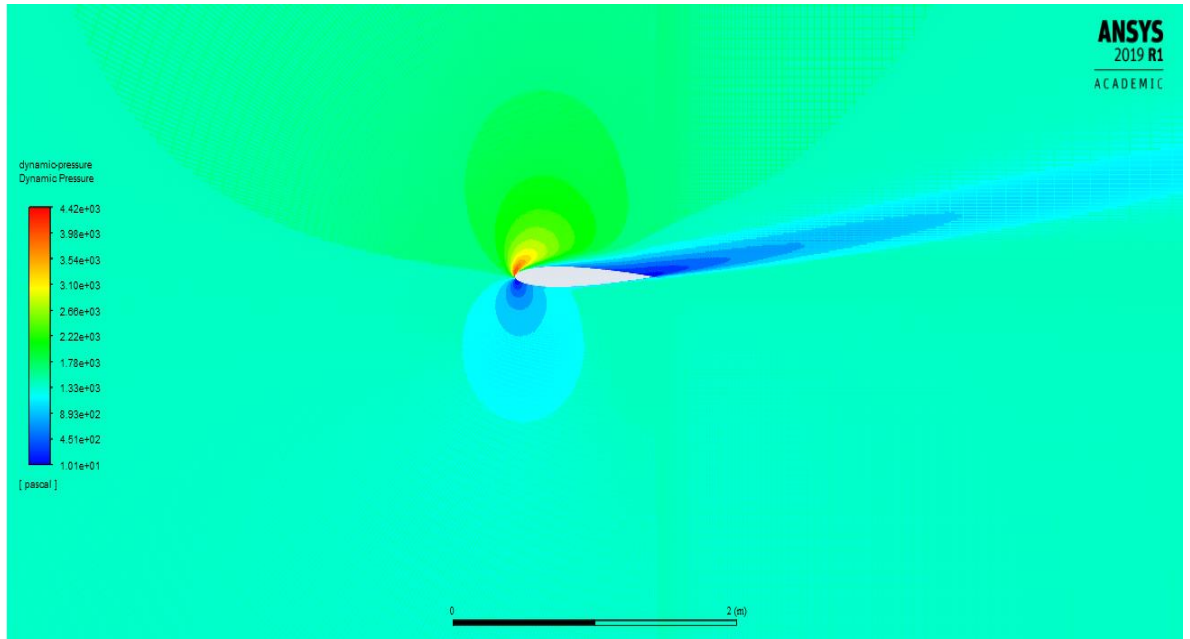
Şekil 4.31. 10° Hücüm açısı ile 40m/s profilde şekil değişikliği

#### 4.4.7. 10° Hücüm açısı ve 50m/s hız şartı için benzetim çalışması

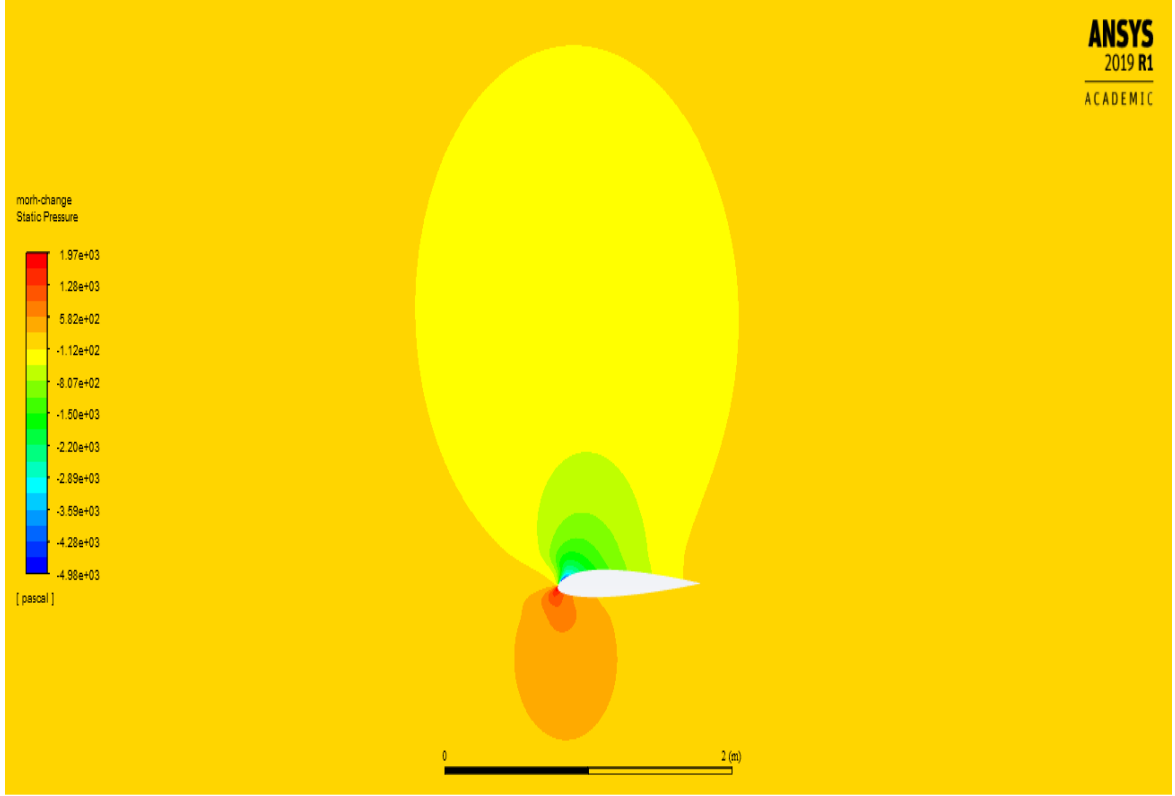
10° hücüm açısı ve 5m/s hız şartındaki benzetim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.32.'de kanat üzerinde statik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Statik basınç değerleri 1970 Pa ile -4980 Pa değerleri arasında değişmektedir. Basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.33.'de kanat üzerindeki dinamik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Dinamik basınç değeleri 4420 Pa ile 10,1 Pa değerleri arasında değişmektedir. Statik Basınç alanında olduğu gibi basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir.



Şekil 4.32. 10° Hücüm açısı ile 50m/s statik basınç alanı

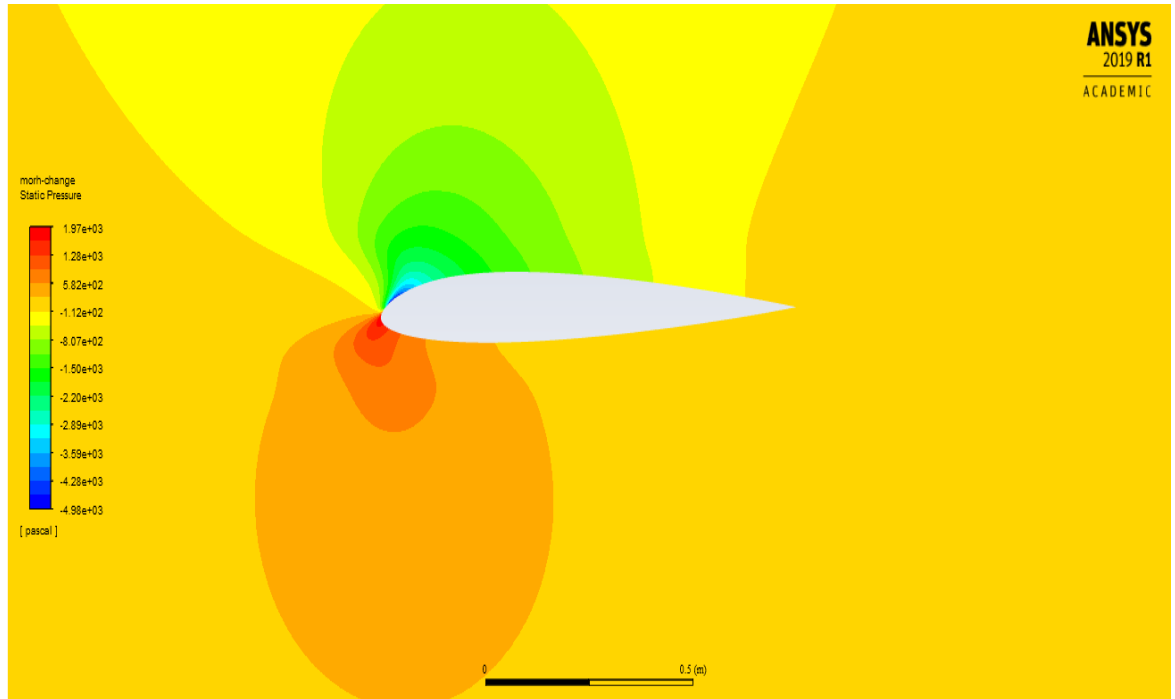


Şekil 4.33. 10° Hücüm açısı ile 50m/s dinamik basınç alanı



Şekil 4.34. 10° Hücüm açısı ile 50m/s profilde şekil değişikliği

Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.'de kullanılan adjoint solver ile birlikte oluşturulan ve kanat üzerinde yapılan simülasyon sonucu statik basınç alanı ile incelenmiştir. Statik Basınç alanını 1970 Pa ile -4980 Pa değerleri arasında değişmektedir.



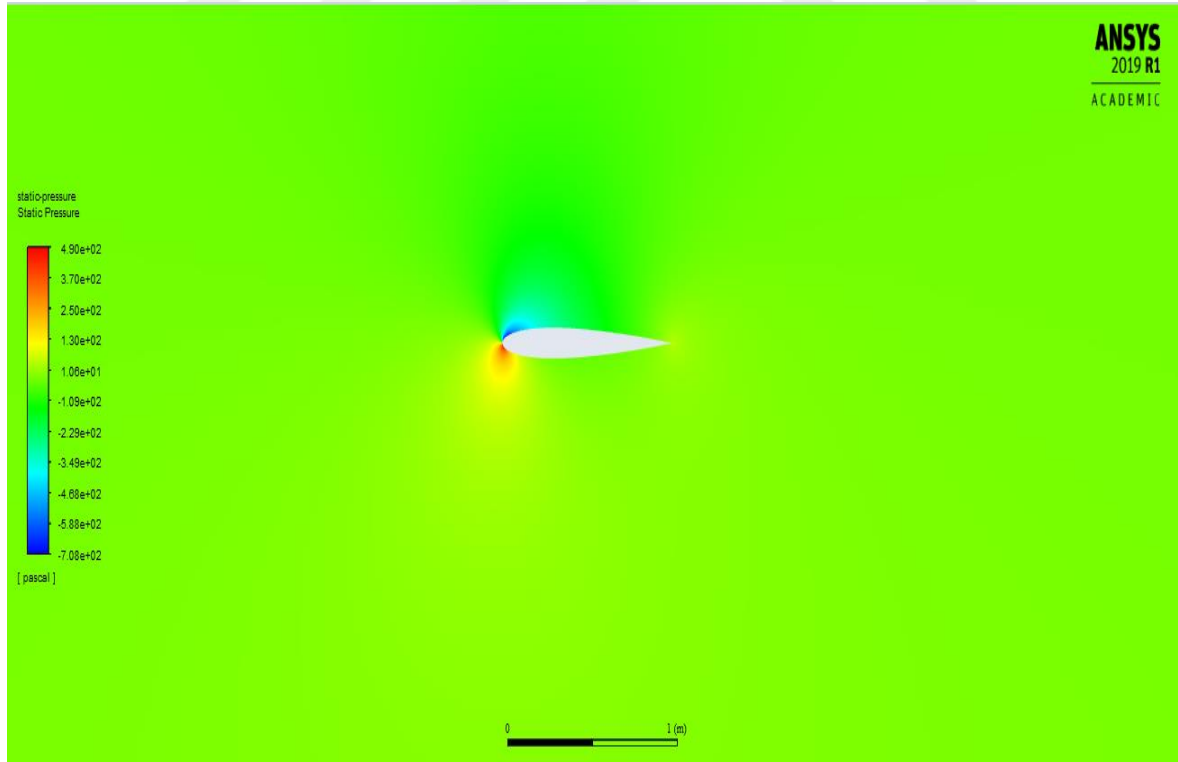
Şekil 4.35. 10° Hücüm açısı ile 50m/s profilde şekil değişikliği

#### 4.5. 4° Hücüm Açısı ile Çeşitli Hızlarda Kanat Profiline Şekil Değiştirmesi

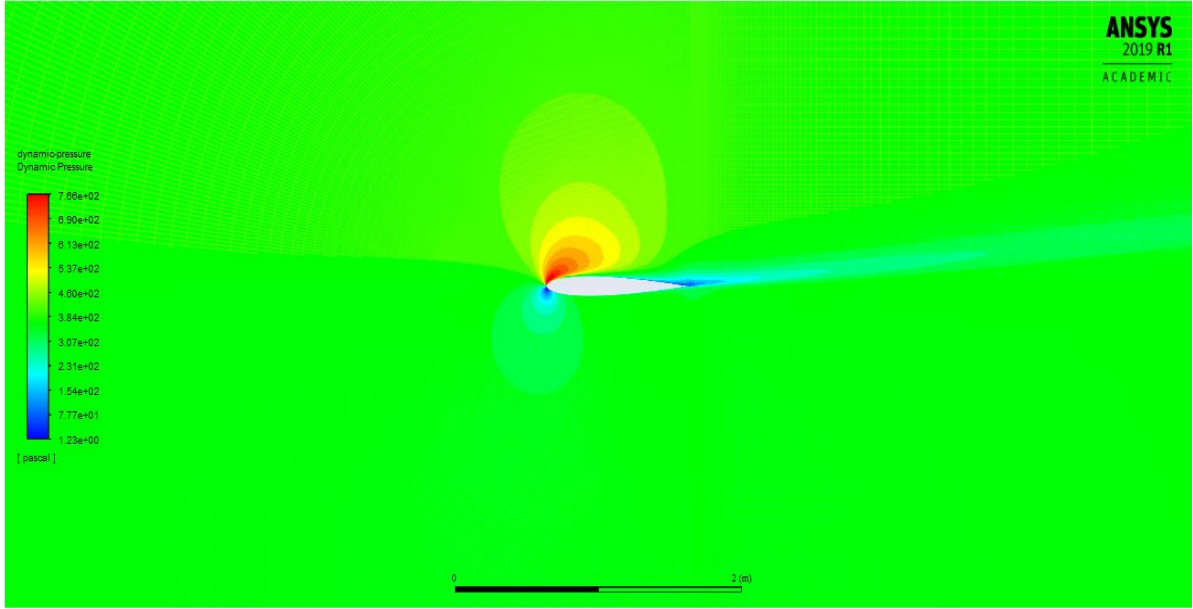
Kurulan çözüm ağının (mesh) üzerinden giriş (inlet) bölgesinden hücum açısı 4° olacak şekilde çeşitli hızlarda k-ε (Türbülans değeri bulunduran akış) şartları sağlanıp benzetim modeli denenmiştir. Benzetimler NACA0012 için lift değerinin en yüksek olduğu 4° hücum açısı ve rüzgâr türbinlerinin çalıştığı optimum noktalardan biri olan 25m/s hız için optimize edilmiştir.

##### 4.5.1. 4° Hücüm açısı ve 25m/s hız şartı için benzetim çalışması

4° hücum açısı ve 25m/s hız şartındaki benzetim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.36.'da kanat üzerinde statik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Statik basınç değerleri 1970 Pa ile -0,483 Pa değerleri arasında değişmektedir. Basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.37.'de kanat üzerindeki dinamik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Dinamik basınç değerleri 4240 Pa ile 0,0968 Pa değerleri arasında değişmektedir. Statik Basınç alanında olduğu gibi basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir.



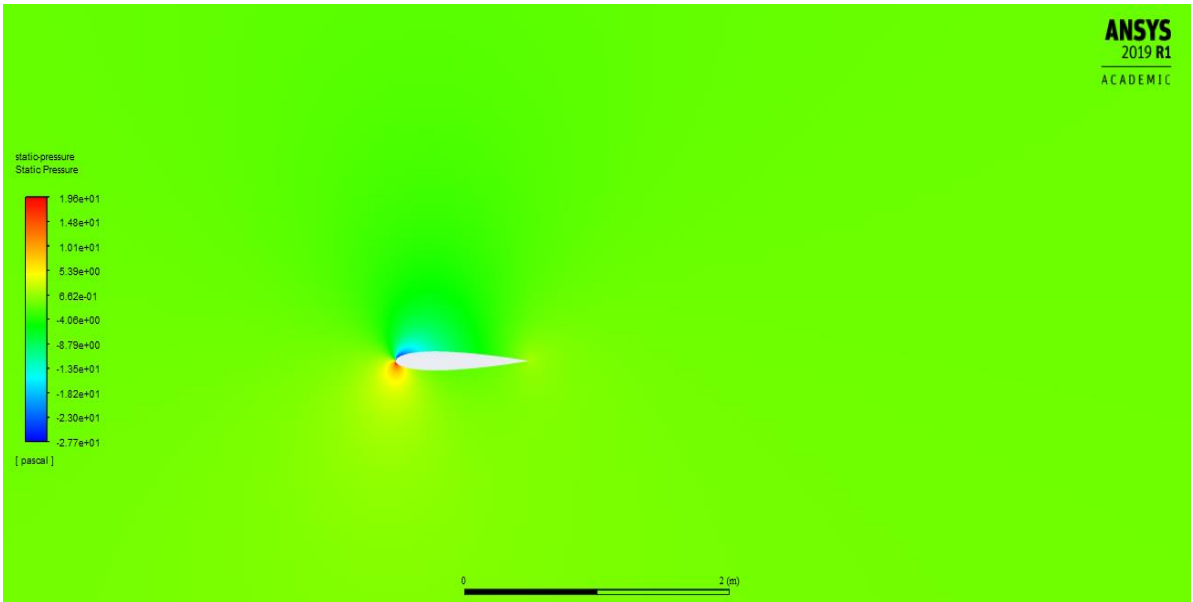
Şekil 4.36. 4° Hücüm açısı ile 25m/s statik basınç alanı



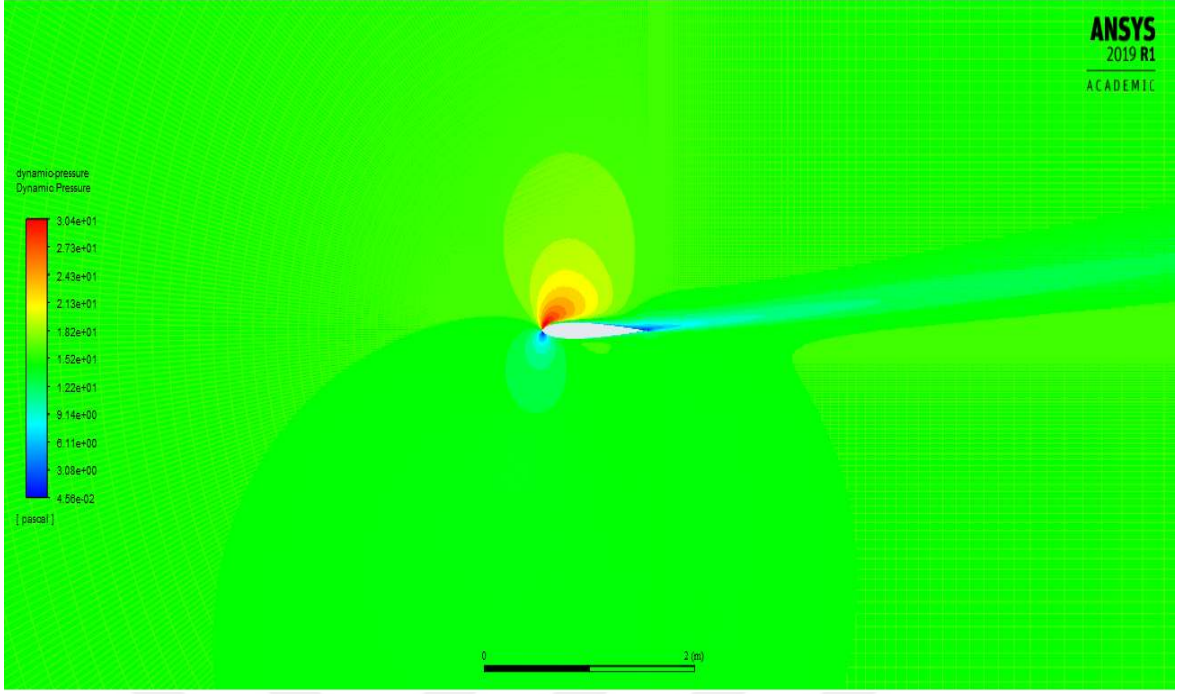
Şekil 4.37. 4° Hücüm açısı ile 25m/s dinamik basınç alanı

#### 4.5.2. 4° Hücüm açısı ve 5m/s hız şartı için benzetim çalışması

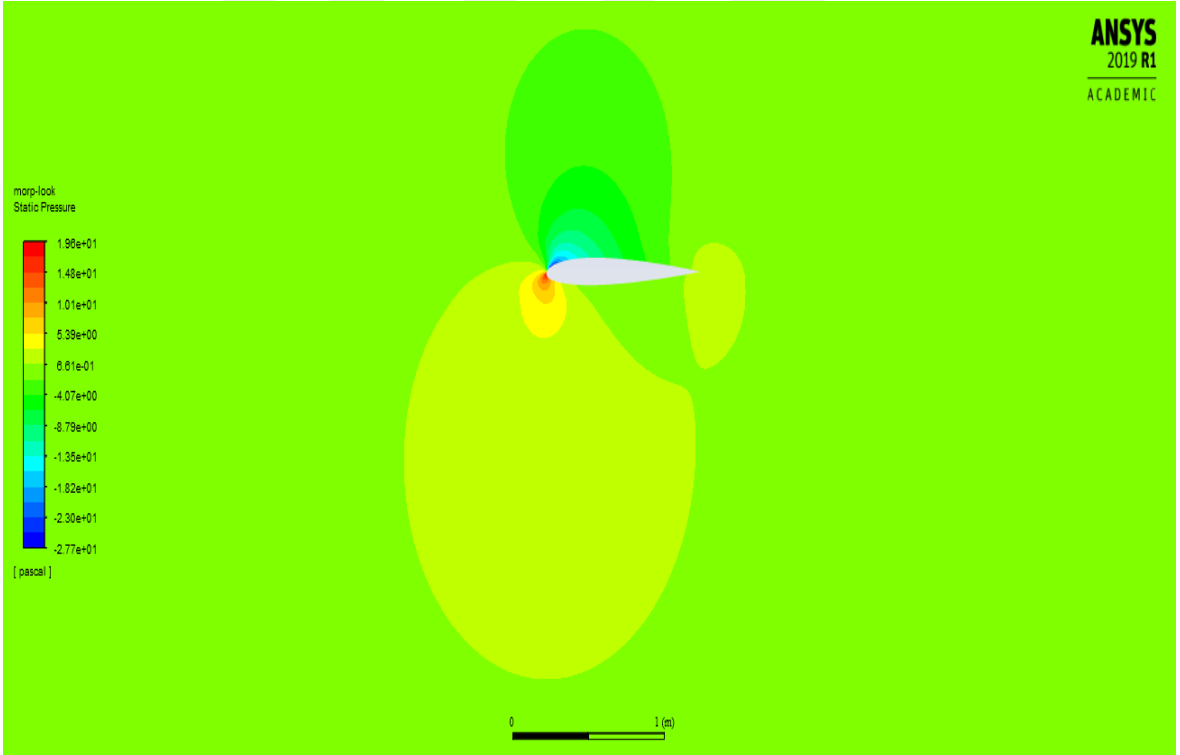
4° hücüm açısı ve 5m/s hız şartındaki benzetim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.38.'de kanat üzerinde statik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Statik basınç değerleri 19,6 Pa ile -27,7 Pa değerleri arasında değişmektedir. Basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.39.'da kanat üzerindeki dinamik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Dinamik basınç değeleri 30,4 Pa ile -27,7 Pa değerleri arasında değişmektedir. Statik Basınç alanında olduğu gibi basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir



Şekil 4.38. 4° Hücüm açısı ile 5m/s statik basınç alanı

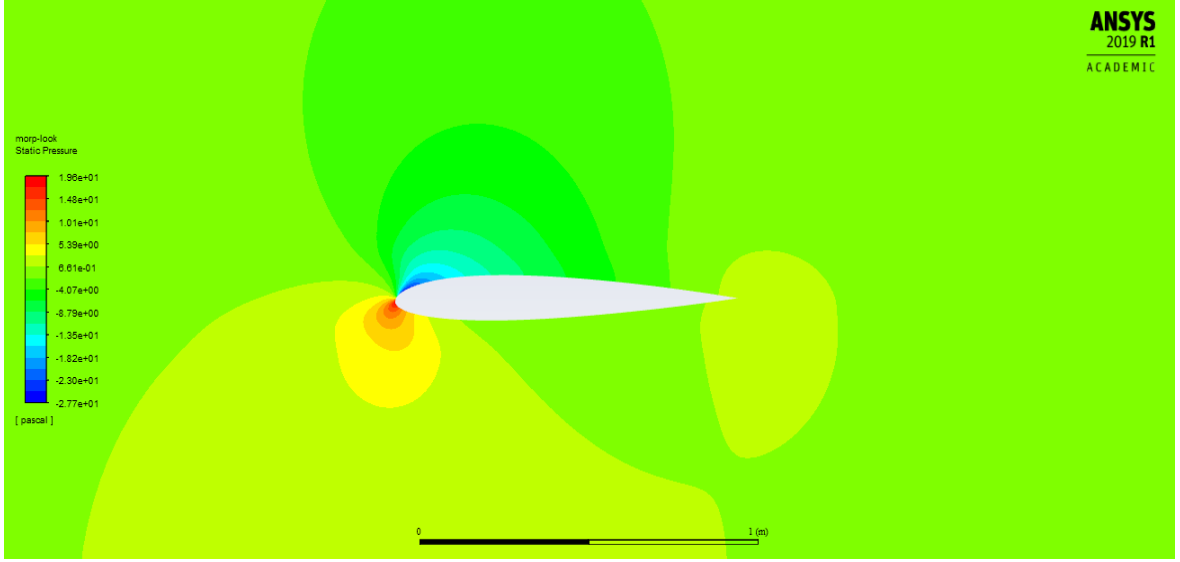


Şekil 4.39. 4° Hücüm açısı ile 5m/s dinamik basınç alanı



Şekil 4.40. 4° Hücüm açısı ile 5m/s profilde şekil değişikliği

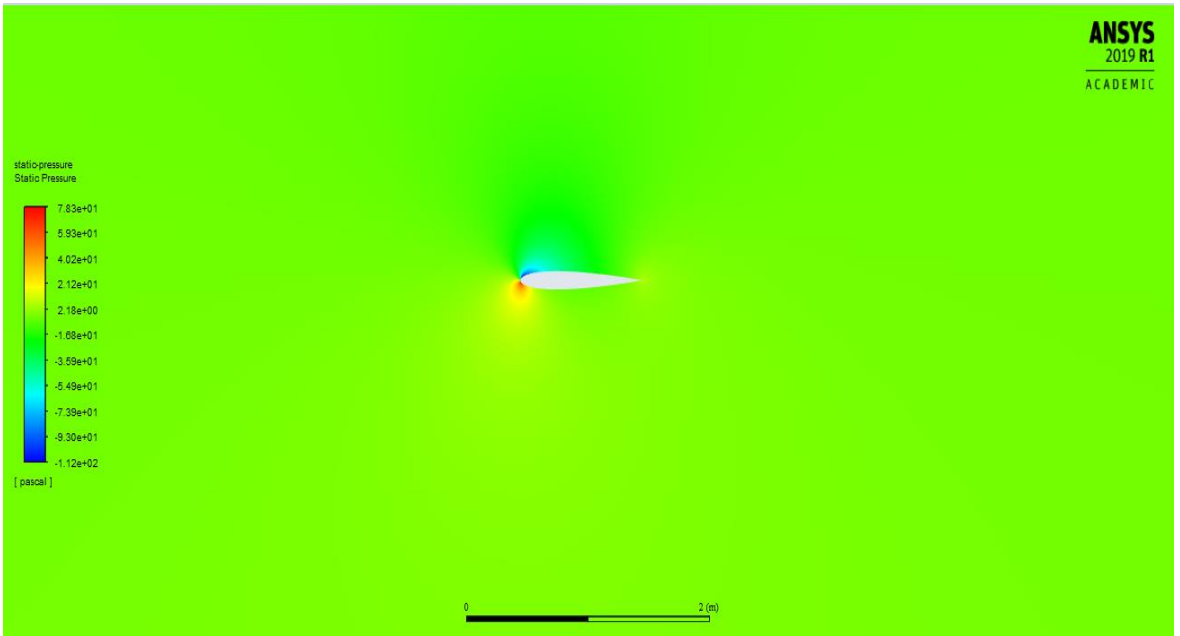
Şekil 4.40. ve Şekil 4.41.'de kullanılan adjoint solver ile birlikte oluşturulan ve kanat üzerinde yapılan simülasyon sonucu statik basınç alanı ile incelenmiştir. Statik Basınç alanını 19,6 Pa ile -27,7 Pa değerleri arasında değişmektedir.



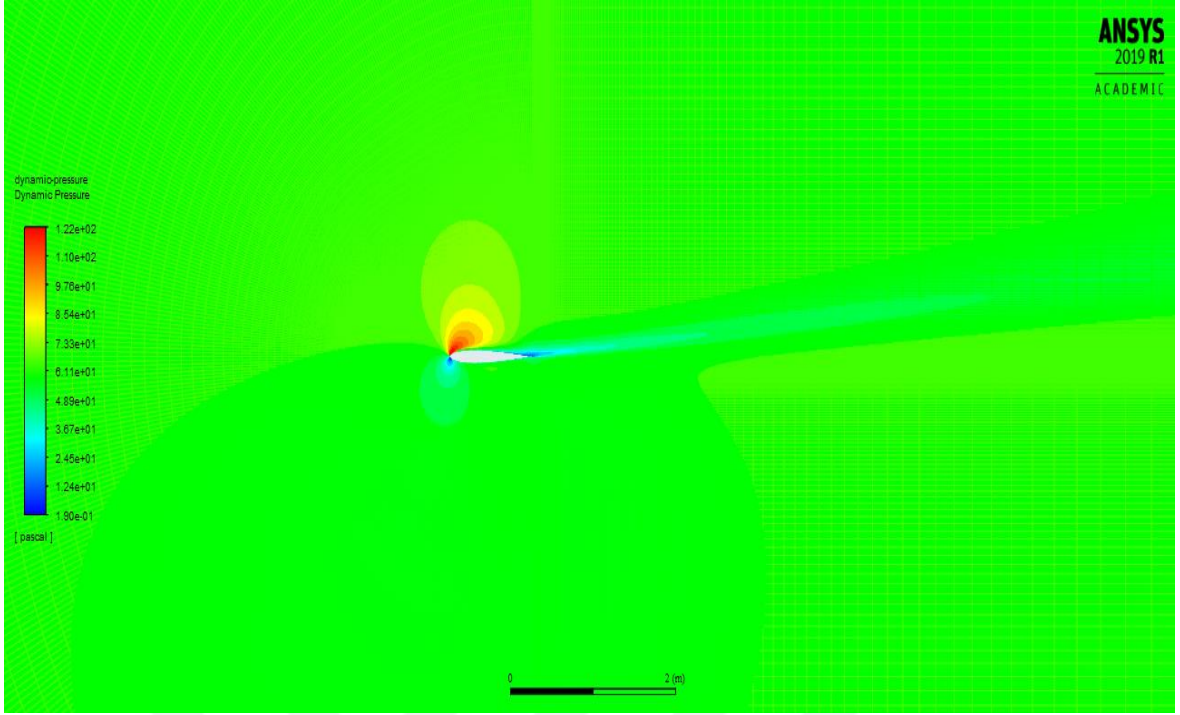
Şekil 4.41. 4° Hücüm açısı ile 5m/s profilede şekil değişikliği

#### 4.5.3. 4° Hücüm açısı ve 10m/s hız şartı için benzetim çalışması

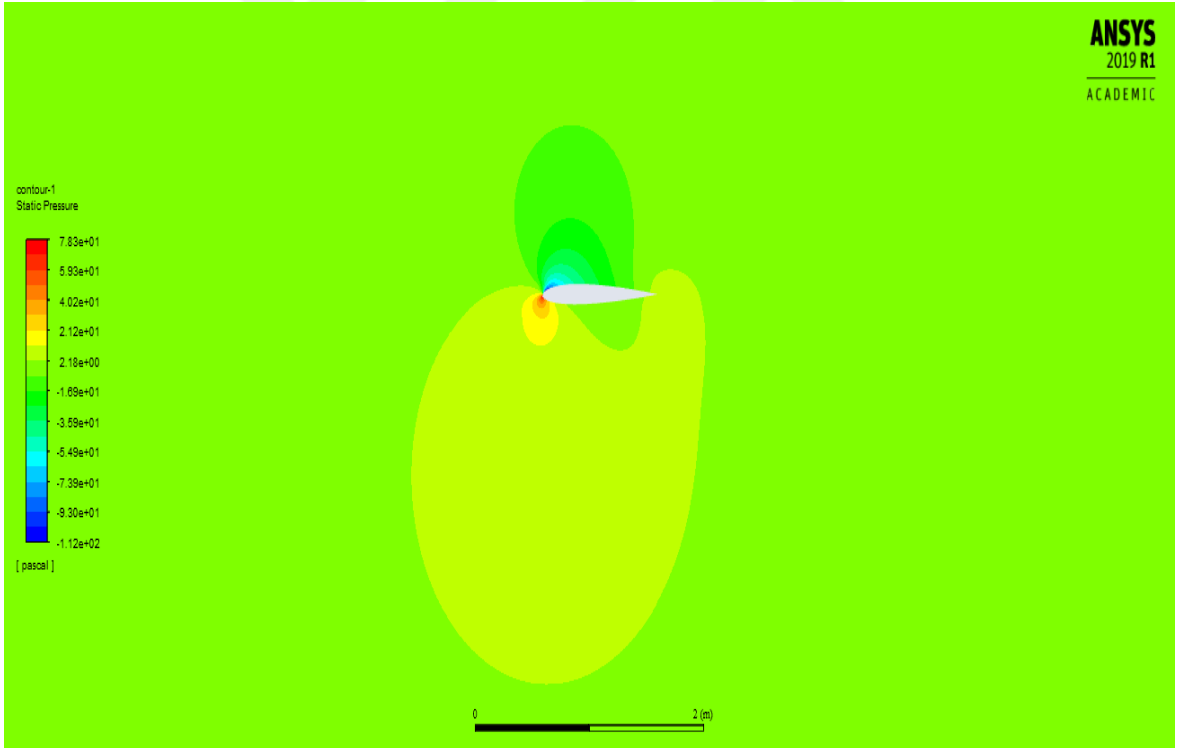
4° hücüm açısı ve 10 m/s hız şartındaki benzetim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.42.'de kanat üzerinde statik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Statik basınç değerleri 78,3 Pa ile -112 Pa değerleri arasında değişmektedir. Basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.43.'de kanat üzerindeki dinamik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Dinamik basınç değeleri 122 Pa ile 0,19 Pa değerleri arasında değişmektedir. Statik Basınç alanında olduğu gibi basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir.



Şekil 4.42. 4° Hücüm açısı ile 10m/s statik basınç alanı

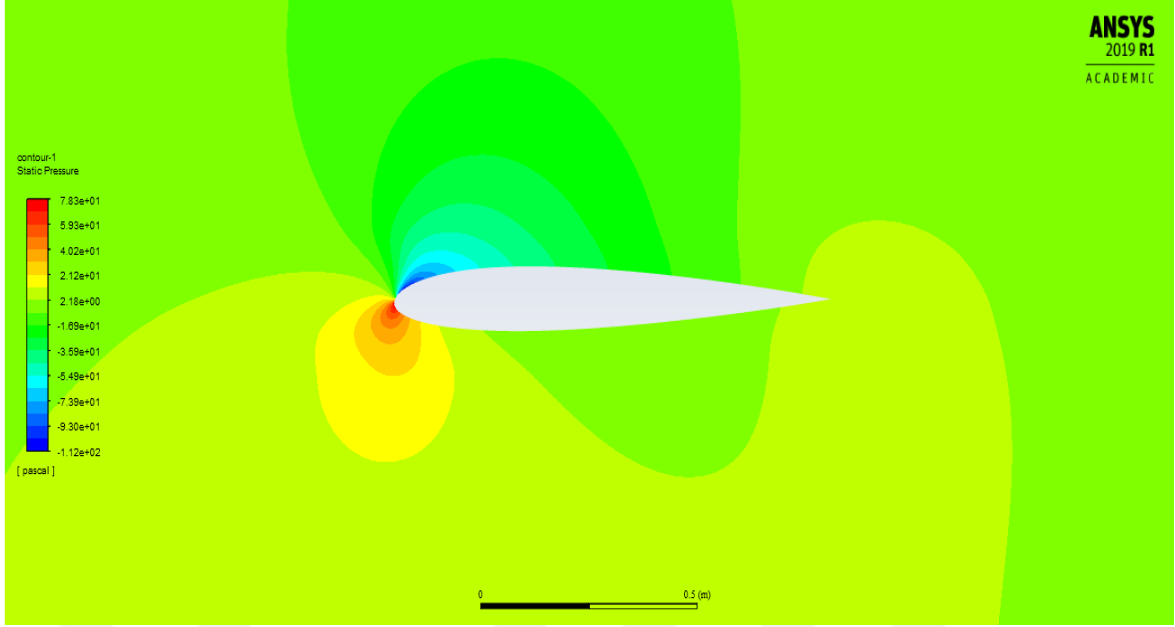


Şekil 4.43. 4° Hücüm açısı ile 10m/s dinamik basınç alanı



Şekil 4.44. 4° Hücüm açısı ile 10m/s profilde şekil değişikliği

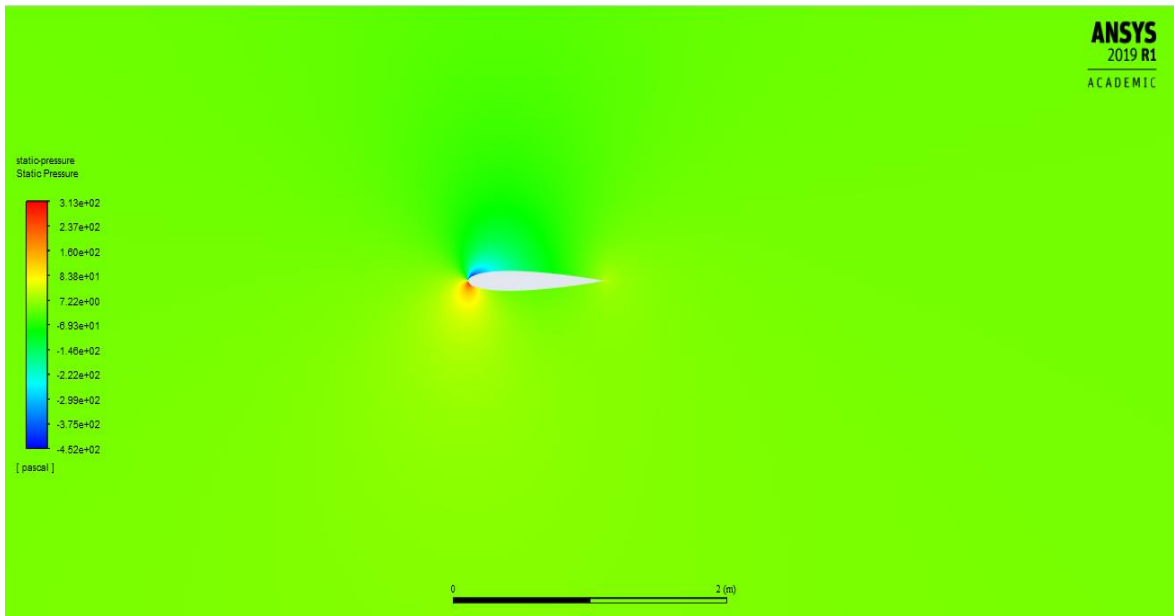
Şekil 4.44. ve Şekil 4.45.'de kullanılan adjoint solver ile birlikte oluşturulan ve kanat üzerinde yapılan simülasyon sonucu statik basınç alanı ile incelenmiştir. Statik Basınç alanını 78,3 Pa ile -112 Pa değerleri arasında değişmektedir.



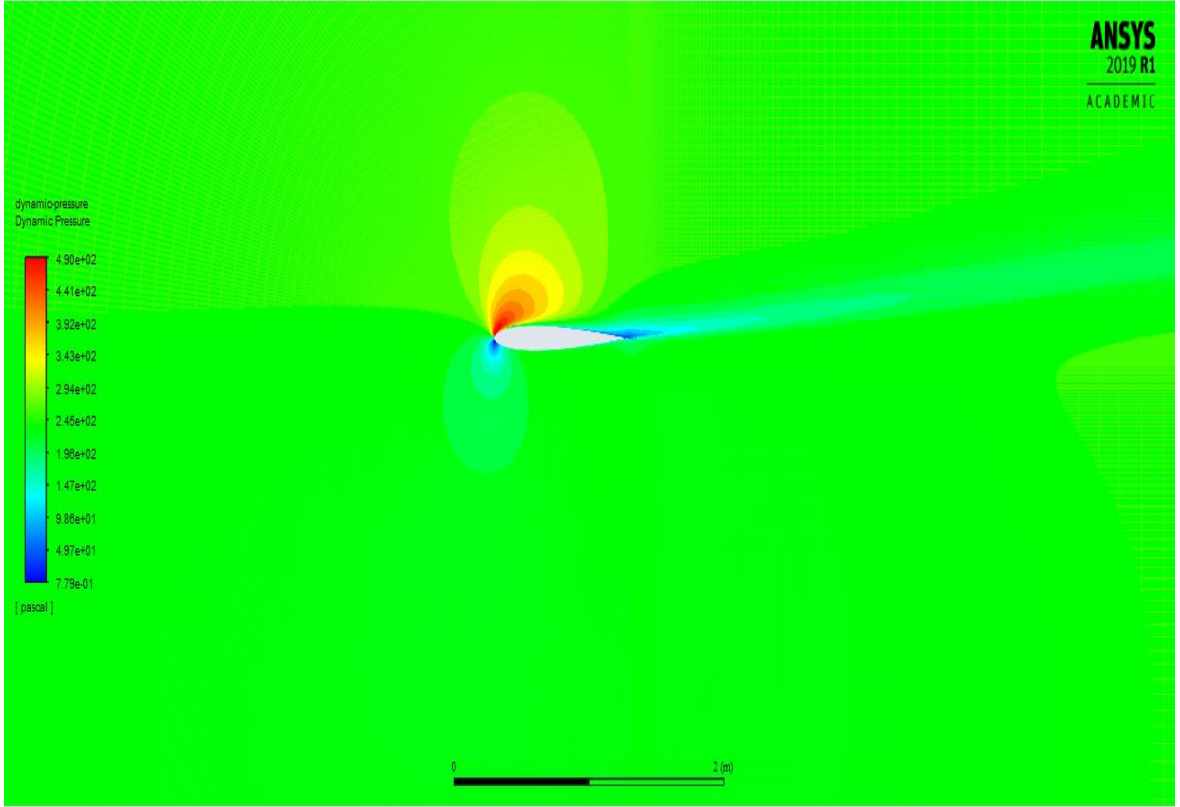
Şekil 4.45. 4° Hücüm açısı ile 10m/s profilde şekil değişikliği

#### 4.5.4. 4° Hücüm açısı ve 20m/s hız şartı için benzetim çalışması

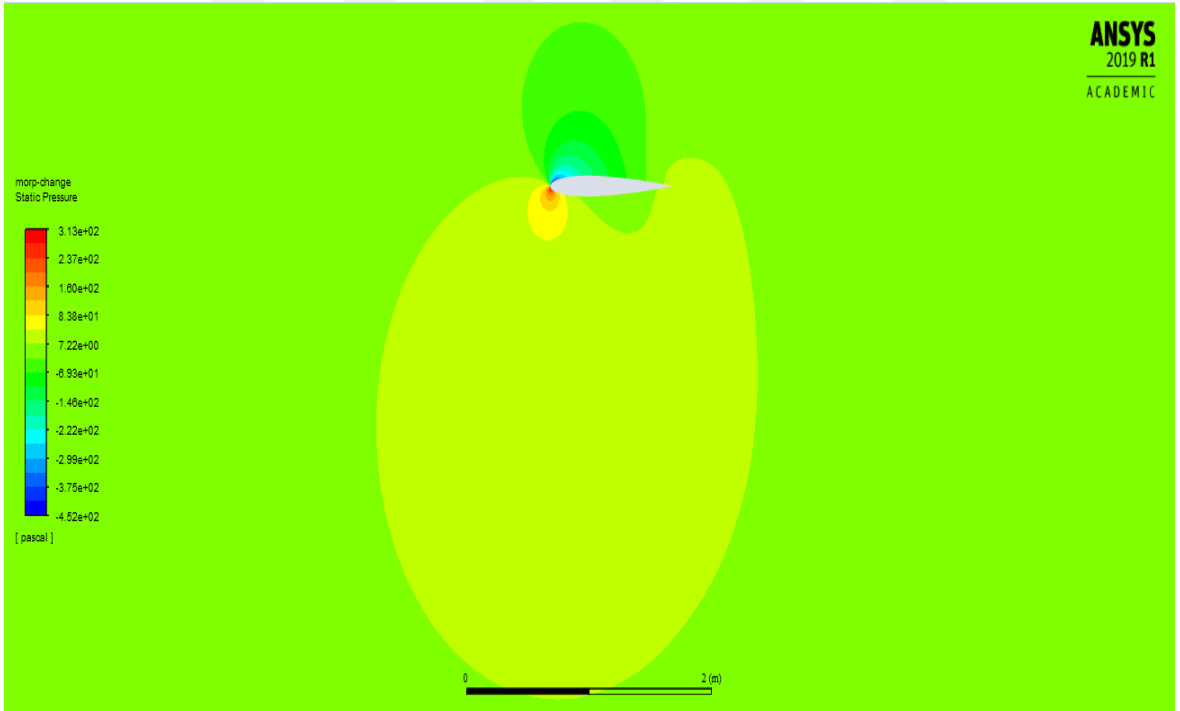
4° hücüm açısı ve 20m/s hız şartındaki benzetim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.46.’da kanat üzerinde statik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Statik basınç değerleri 1970 Pa ile -0,483 Pa değerleri arasında değişmektedir. Basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.47.’de kanat üzerindeki dinamik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Dinamik basınç değerleri 4240 Pa ile 0,0968 Pa değerleri arasında değişmektedir. Statik Basınç alanında olduğu gibi basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir.



Şekil 4.46. 4° Hücüm açısı ile 20m/s statik basınç alanı

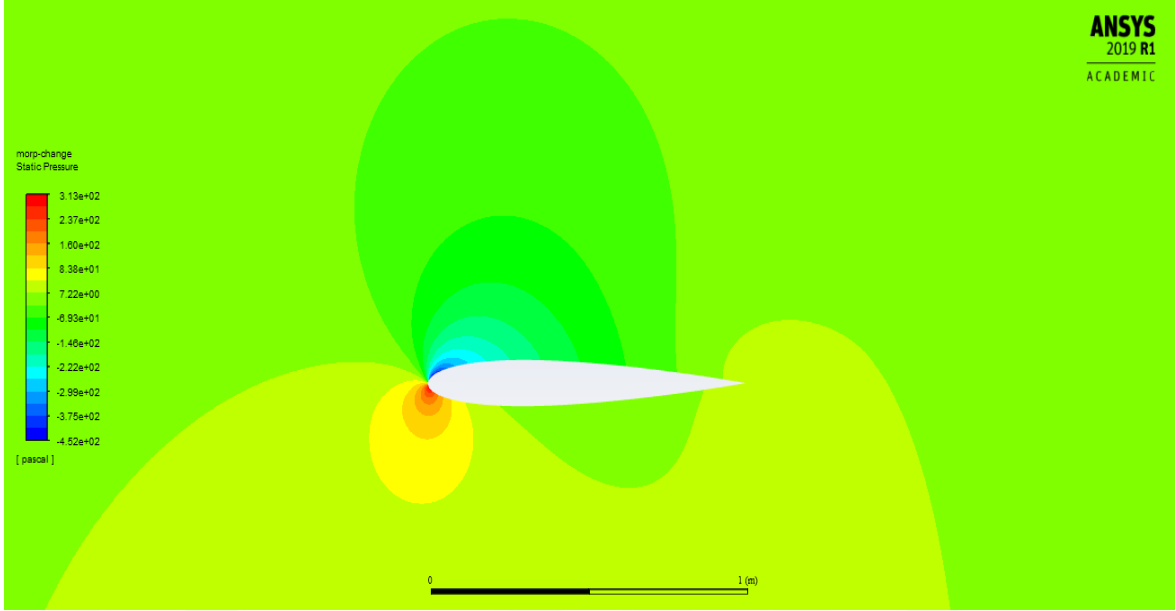


Şekil 4.47. 4° Hücüm açısı ile 20m/s dinamik basınç alanı



Şekil 4.48. 4° Hücüm açısı ile 20m/s profilde şekil değişikliği

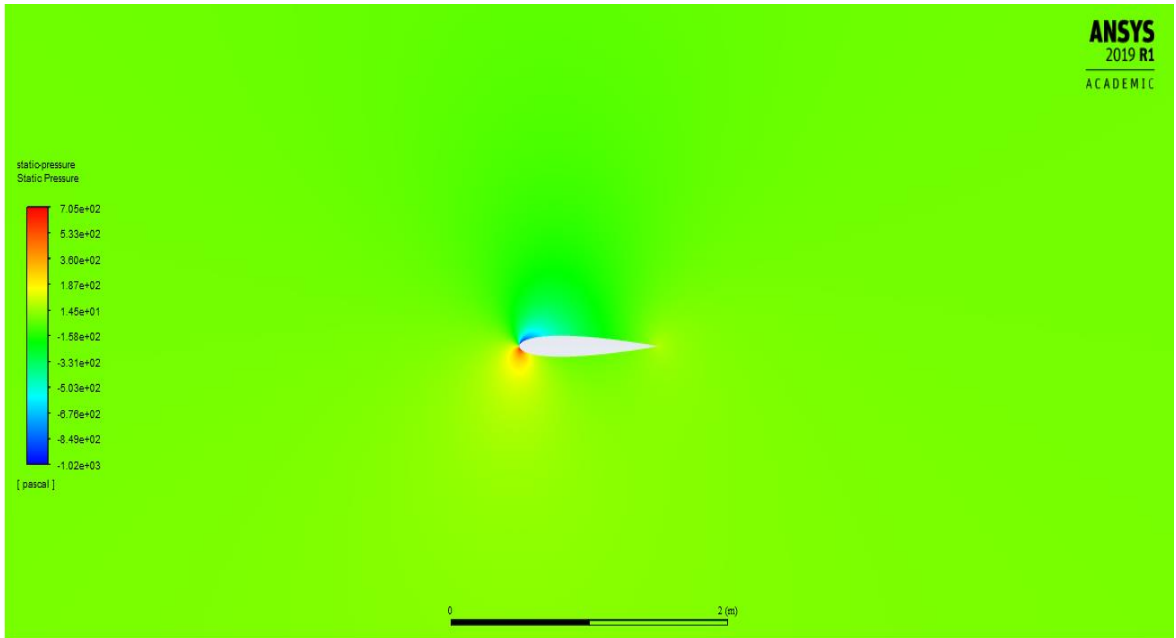
Şekil 4.48. ve Şekil 4.49.'da kullanılan adjoint solver ile birlikte oluşturulan ve kanat üzerinde yapılan simülasyon sonucu statik basınç alanı ile incelenmiştir. Statik Basınç alanını 313 Pa ile -452 Pa değerleri arasında değişmektedir.



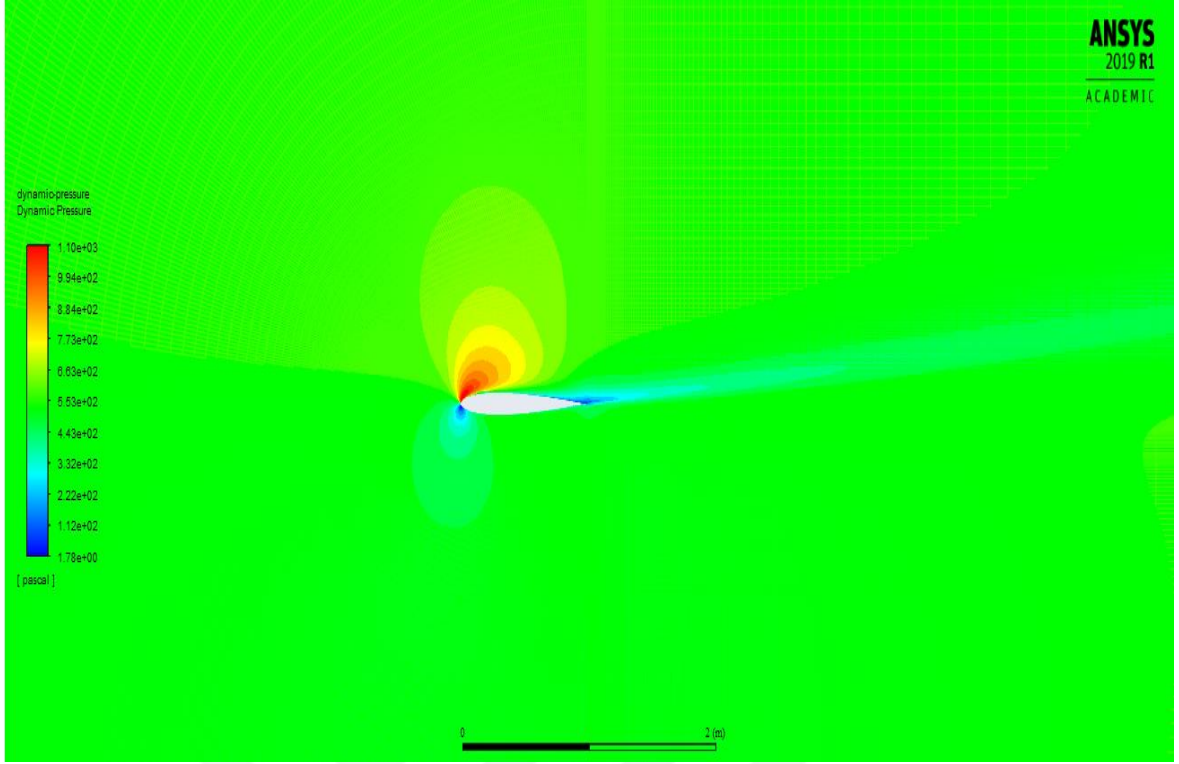
Şekil 4.49. 4° Hücüm açısı ile 20m/s profilde şekil değişikliği

#### 4.5.5. 4° Hücüm açısı ve 30m/s hız şartı için benzetim çalışması

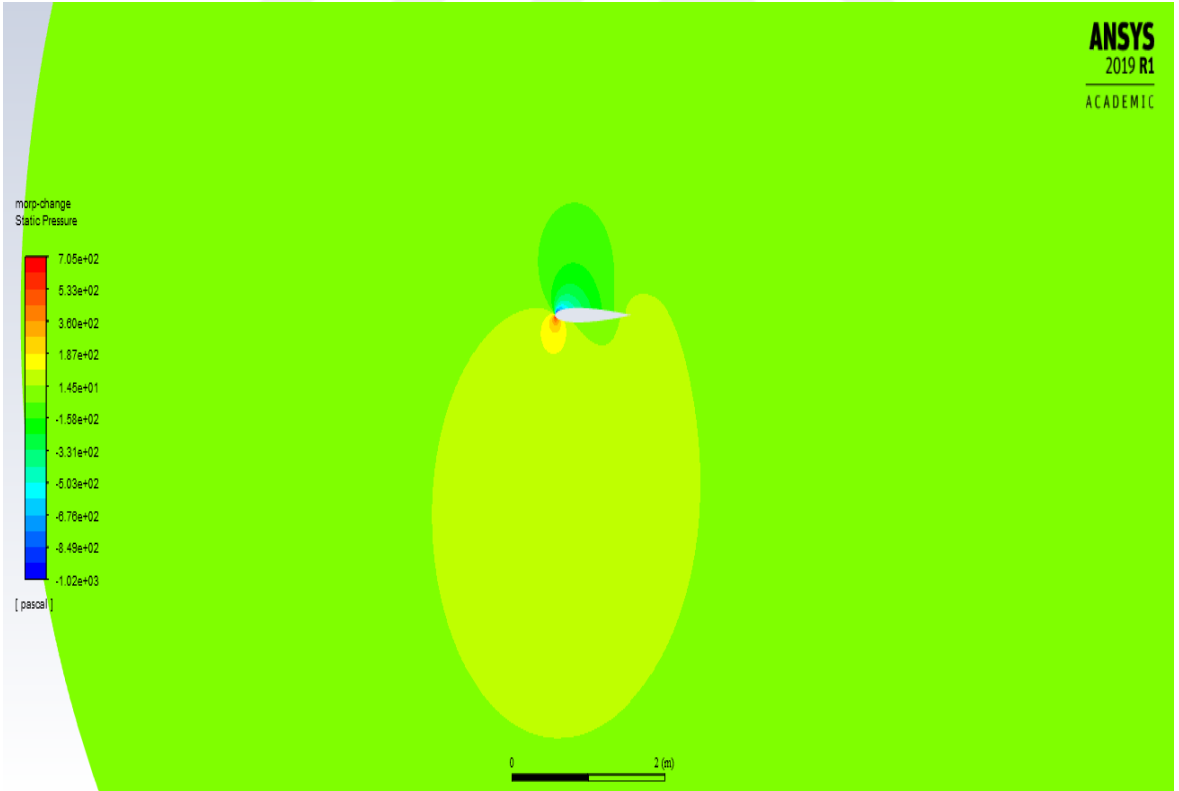
4° hücüm açısı ve 30m/s hız şartındaki benzetim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.50.’de kanat üzerinde statik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Statik basınç değerleri 705 Pa ile -1020 Pa değerleri arasında değişmektedir. Basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.51.’de kanat üzerindeki dinamik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Dinamik basınç değeleri 1100 Pa ile 1,78 Pa değerleri arasında değişmektedir. Statik Basınç alanında olduğu gibi basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir.



Şekil 4.50. 4° Hücüm açısı ile 30m/s statik basınç alanı

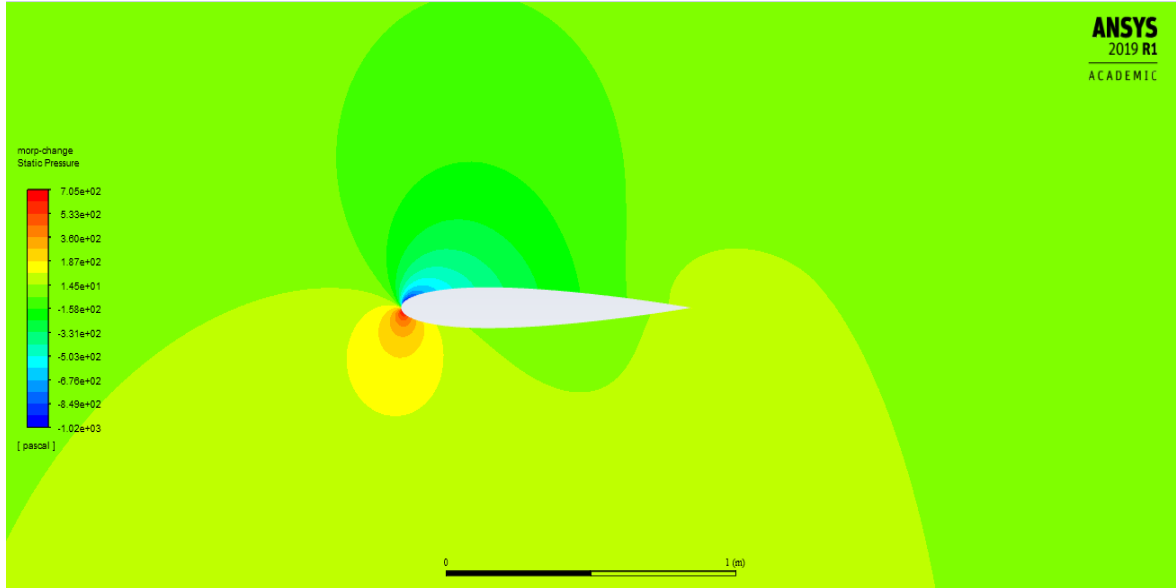


Şekil 4.51. 4° Hücüm açısı ile 30m/s dinamik basınç alanı



Şekil 4.52. 4° Hücüm açısı ile 30m/s profilde şekil değişikliği

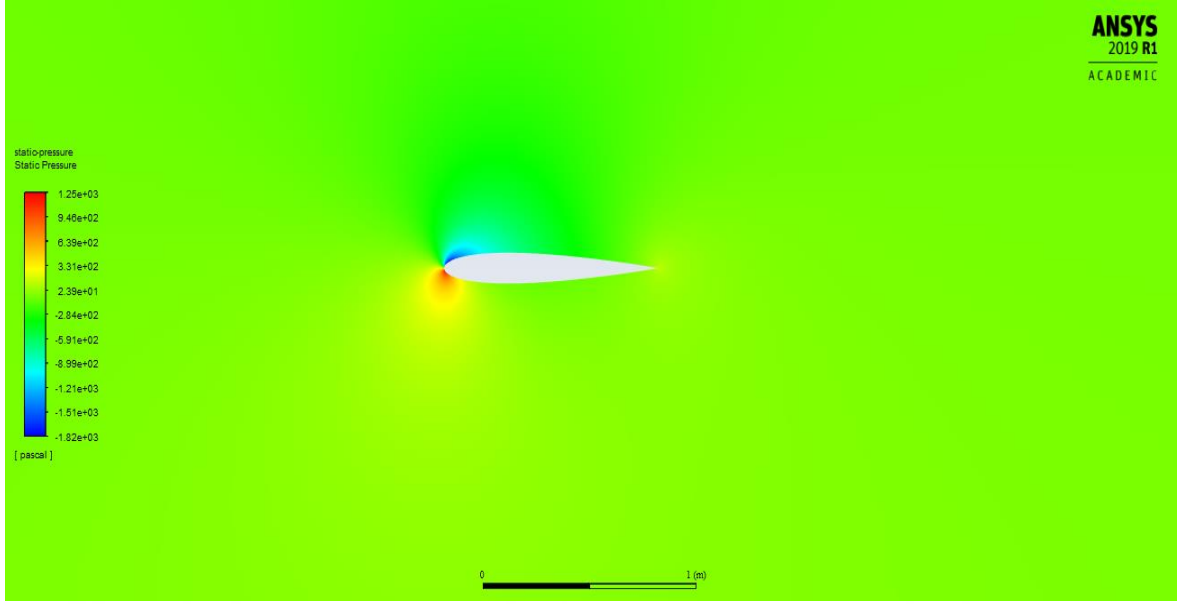
Şekil 4.52. ve Şekil 4.53.'de kullanılan adjoint solver ile birlikte oluşturulan ve kanat üzerinde yapılan simülasyon sonucu statik basınç alanı ile incelenmiştir. Statik Basınç alanını 705 Pa ile -1020 Pa değerleri arasında değişmektedir.



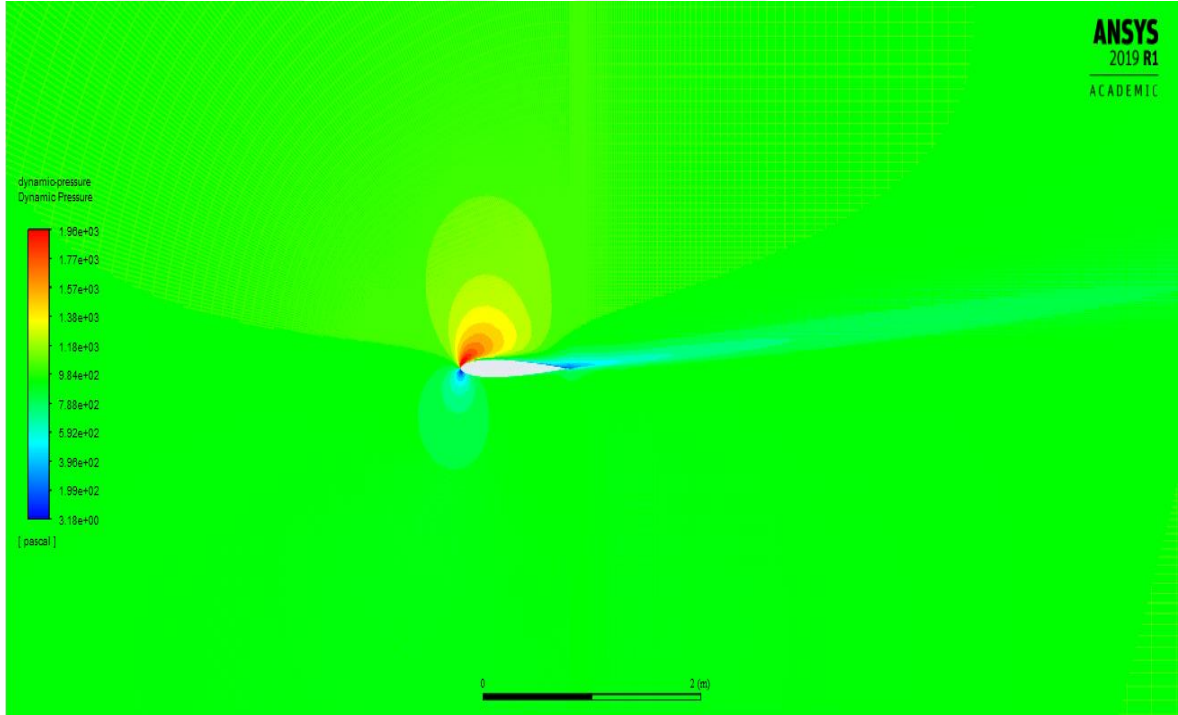
Şekil 4.53. 4° Hücüm açısı ile 30m/s profilde şekil değişikliği

#### 4.5.6. 4° Hücüm açısı ve 40m/s hız şartı için benzetim çalışması

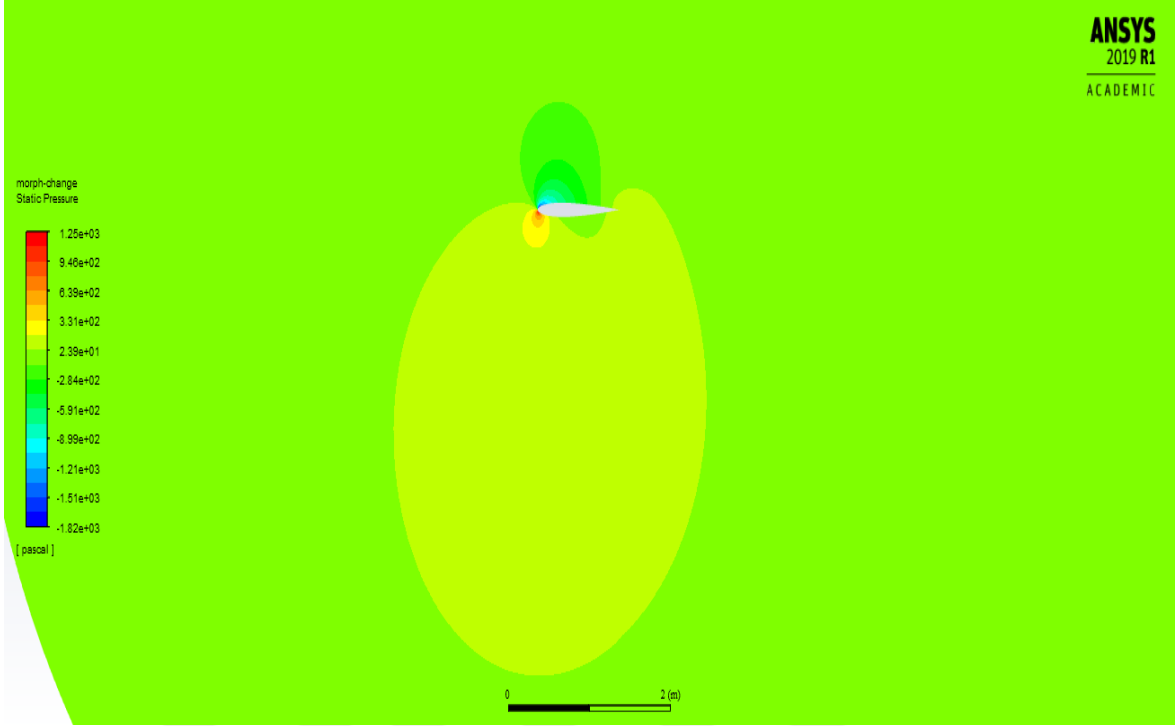
4° hücüm açısı ve 40m/s hız şartındaki benzetim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.54. de kanat üzerinde statik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Statik basınç değerleri 1250 Pa ile -1820 Pa değerleri arasında değişmektedir. Basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.55. da kanat üzerindeki dinamik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Dinamik basınç değeleri 1960 Pa ile 3,18 Pa değerleri arasında değişmektedir. Statik Basınç alanında olduğu gibi basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir.



Şekil 4.54. 4° Hücüm açısı ile 40m/s statik basınç alanı

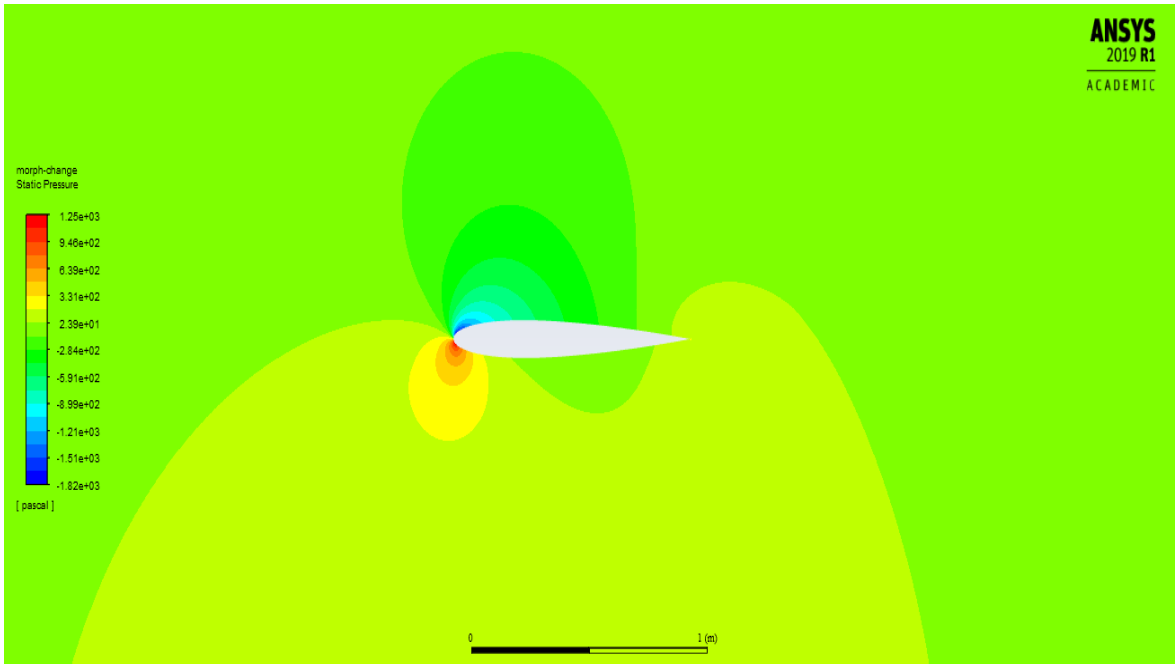


Şekil 4.55. 4° Hücüm açısı ile 40m/s dinamik basınç alanı



Şekil 4.56. 4° Hücüm açısı ile 40m/s profilde şekil değişikliği

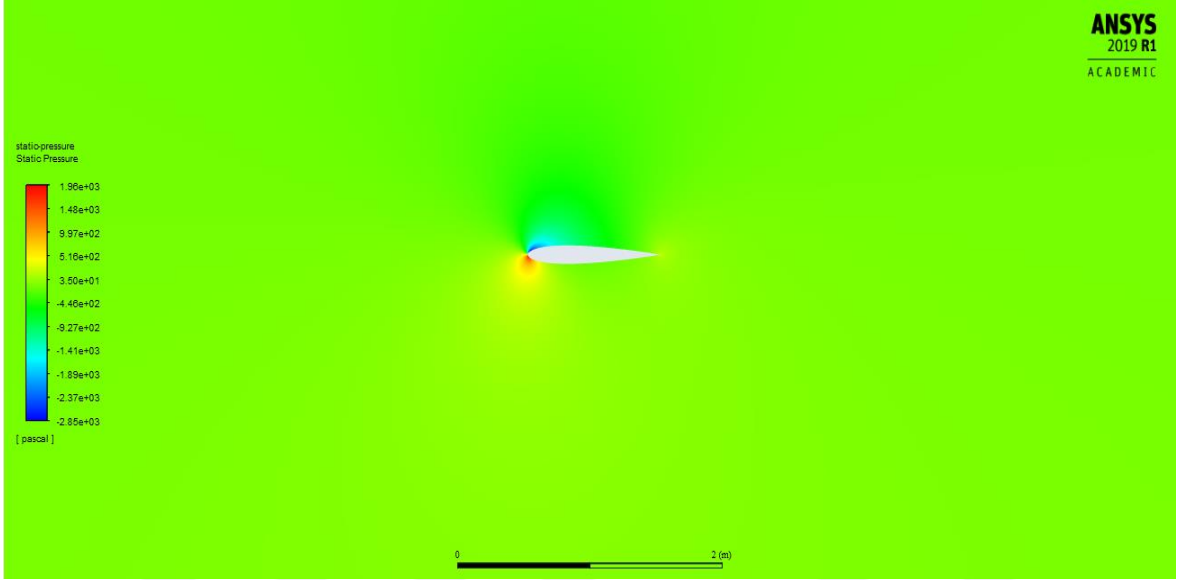
Şekil 4.56. ve Şekil 4.57.'de kullanılan adjoint solver ile birlikte oluşturulan ve kanat üzerinde yapılan simülasyon sonucu statik basınç alanı ile incelenmiştir. Statik Basınç alanını 1250 Pa ile -1820 Pa değerleri arasında değişmektedir.



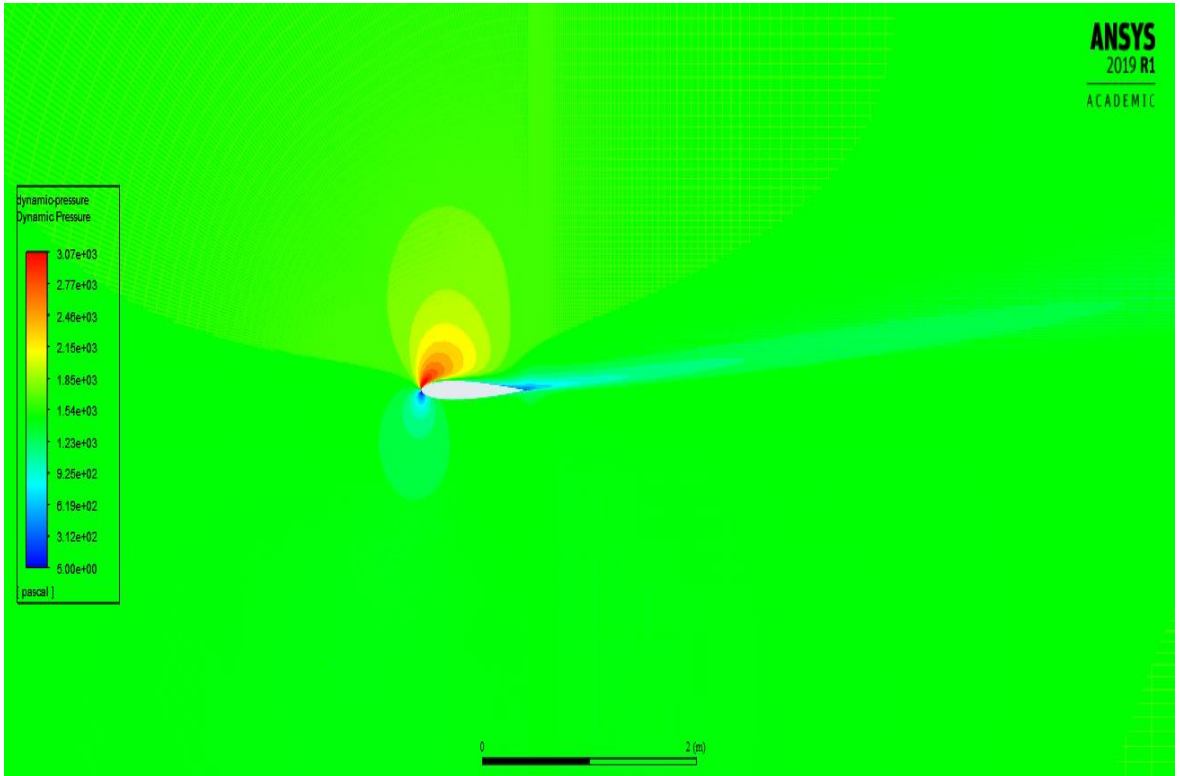
Şekil 4.57. 4° Hücüm açısı ile 40m/s profilde şekil değişikliği

#### 4.5.7. 4° Hücüm açısı ve 50m/s hız şartı için benzetim çalışması

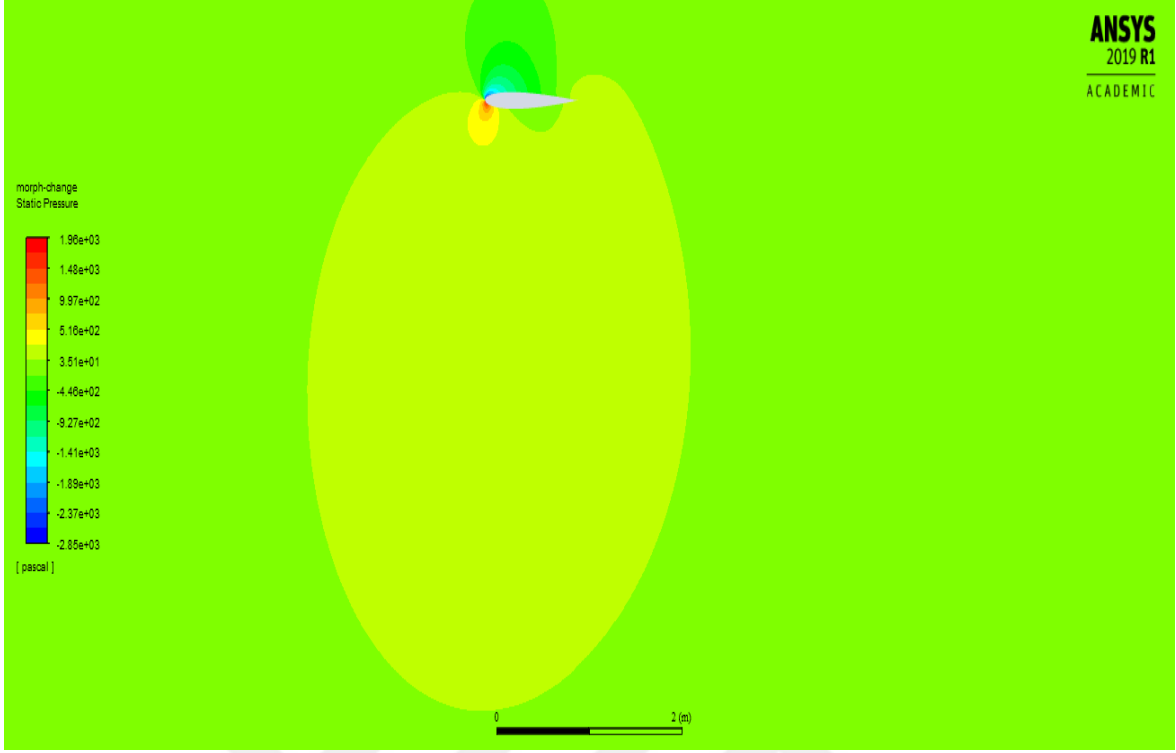
4° hücum açısı ve 50m/s hız şartındaki benzetim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.58.'de kanat üzerinde statik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Statik basınç değerleri 1960 Pa ile -2850 Pa değerleri arasında değişmektedir. Basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.59.'da kanat üzerindeki dinamik basınç alanı değerleri izlenmektedir. Dinamik basınç değerleri 3070 Pa ile 5 Pa değerleri arasında değişmektedir. Statik Basınç alanında olduğu gibi basınç alanları simetrik olmadığından kaldırma kuvveti elde edilebilmektedir.



Şekil 4.58. 4° Hücum açısı ile 50m/s statik basınç alanı

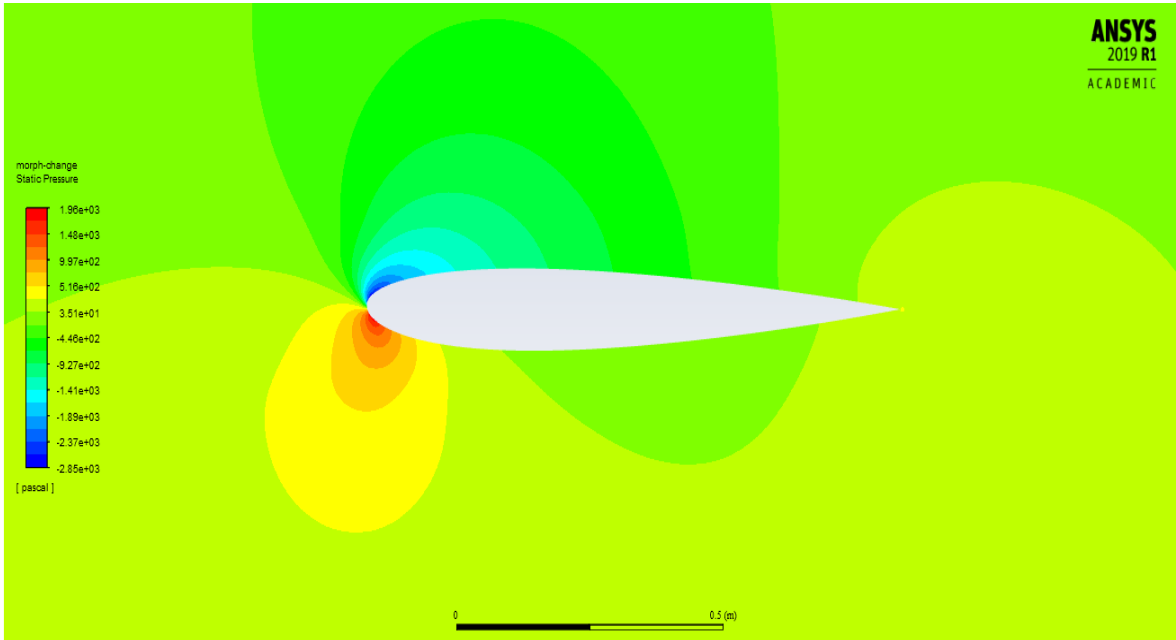


Şekil 4.59. 4° Hücum açısı ile 50m/s dinamik basınç alanı



Şekil 4.60 4° Hücüm açısı ile 50m/s profilde şekil değişikliği

Şekil 4.60. ve Şekil 4.61.'de kullanılan adjoint solver ile birlikte oluşturulan ve kanat üzerinde yapılan simülasyon sonucu statik basınç alanı ile incelenmiştir. Statik Basınç alanını 1960 Pa ile -2850 Pa değerleri arasında değişmektedir.



Şekil 4.61. 4° Hücüm açısı ile 50m/s profilde şekil değişikliği

## 5. SAYILSAL SONUÇLAR VE İRDELEME

Bu kısıtlar altında yapılan çalışma alt başlıklarda irdelenmiştir.

### 5.1. Profil Değiştirme Mekanizması

Profil değiştirebilen kanat tasarımı için öngörülen model HAD ortamında denenmiştir. Bunlar başlıca Perdovites ve ihtiyaca göre kanat profilinde ilgili değişikliklerin yapılmasıdır.

### 5.2. Doğrulama Çalışmaları Sonuçları

Benzetim modeli daha önce HAD ve deneysel çalışma yapılan Cornell Üniversitesi Confluence sayfası ile karşılaştırıldığında Inviscid Flow (İdeal akış) şartlarında %0,776563  $k-\epsilon$  şartlarında %4,85427 oranında benzerlik göstermektedir. İdel akışta görülen farklılık temel olarak kanat profilinde kullanılan dot dosyası farkından kaynaklanırken, Laminer-Geçiş-Türbülans akış şartlarında görünen farklılığın asıl nedeni akıştaki türbülans karakteristiğidir.

### 5.3. NACA0012 Profilinin Optimum Çalışma Noktası

NACA0012 simetrik bir profildir ve diğer rüzgâr profillerine göre daha incedir. Olası değişiklikler için diğer profillerden daha az değişme olanağı vardır. Optimizasyon çalışmasında daha karmaşık geometri şartları yerine çalışmanın genel doğruluğuna ulaşmak için daha basit bir kanat profili seçilmiştir. NACA0012 profilin'in en yüksek  $C_l/C_d$  oluşturduğu noktalardan birisi ise hücum açısı  $4^\circ$  ve 25m/s şartlarıdır.

### 5.4. $C_l/C_d$ ile Optimizasyon Çalışması

$C_l/C_d$  oranı ile optimizasyon yapılmasının sebebi  $C_l$  katsayısını arttırılmaya çalışırken bir taraftan  $C_d$  katsayısının önlenemez değişiklikler olmaktadır. Bu şartlar altında optimizasyon çalışması sadece  $C_l$  ile sağlanamaz. Böylelikle optimizasyon çalışması için  $C_l/C_d$  önemli bir parametredir. Ayrıca  $C_l/C_d$  oranı kanat profilinin verimi olarak da ifade edilmektedir.

### 5.5. $C_l/C_d$ Değerleri ve Kanat Profili Değişimi

Çalışmanın ilk kısmında kanat profillerinin değişikliğe uğramadan  $C_l/C_d$  oranı ve  $C_l$  değerleri bulunmuştur.  $10^\circ$  ve  $4^\circ$  hücum açılarına göre çeşitli hızlarda olan değerler Tablo 5.1' de tanımlanmıştır.

Kullanılan alt rutin ile birlikte kanat profili üzerinde  $C_l/C_d$  optimum değer olan 13.205625 ulaştırmak ve aynı anda  $C_l$  değerinin arışı hedeflenmiştir. Tablo 5.1. ve Tablo 5.2. de ilk değerlere ek olarak yapılması gereken değişiklikler  $\Delta C_l/C_d$  ile ifade edilmiştir. Bu değerlerde kaldırma kuvvetinde pozitif yönde etki yapan değerler yeşil ile negatif yönde etki yapan değerler ise kırmızı ile ifade edilmiştir.

Tablo 5.1.  $10^\circ$  Hücum açısına göre  $C_l/C_d$  ve  $C_l$  ilk değerleri ve değiştirilmiş değerler

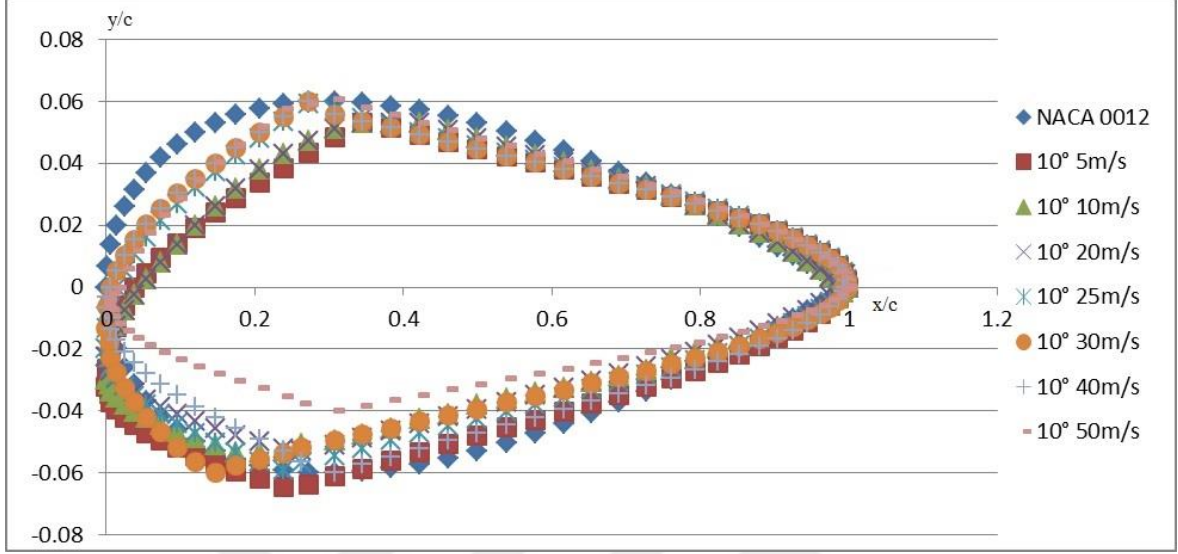
| Hız<br>(m/s) | $C_l/C_d$<br>İlk Değer | $\Delta C_l/C_d$ | $C_l/C_d$<br>Optimizasyon<br>Değeri |
|--------------|------------------------|------------------|-------------------------------------|
| 5            | 9,787826               | 3,417799         | 13,205625                           |
| 10           | 10,059530              | 3,148991         | 13,205625                           |
| 20           | 10,285000              | 2,949397         | 13,205625                           |
| 25           | 10,349620              | 2,856005         | 13,205625                           |
| 30           | 10,399910              | 2,805715         | 13,205625                           |
| 40           | 10,474970              | 2,753032         | 13,205625                           |
| 50           | 10,529850              | 2,677229         | 13,205625                           |

Tablo 5.2.  $4^\circ$  Hücum açısına göre  $C_l/C_d$  ve  $C_l$  ilk değerleri ve değiştirilmiş değerler

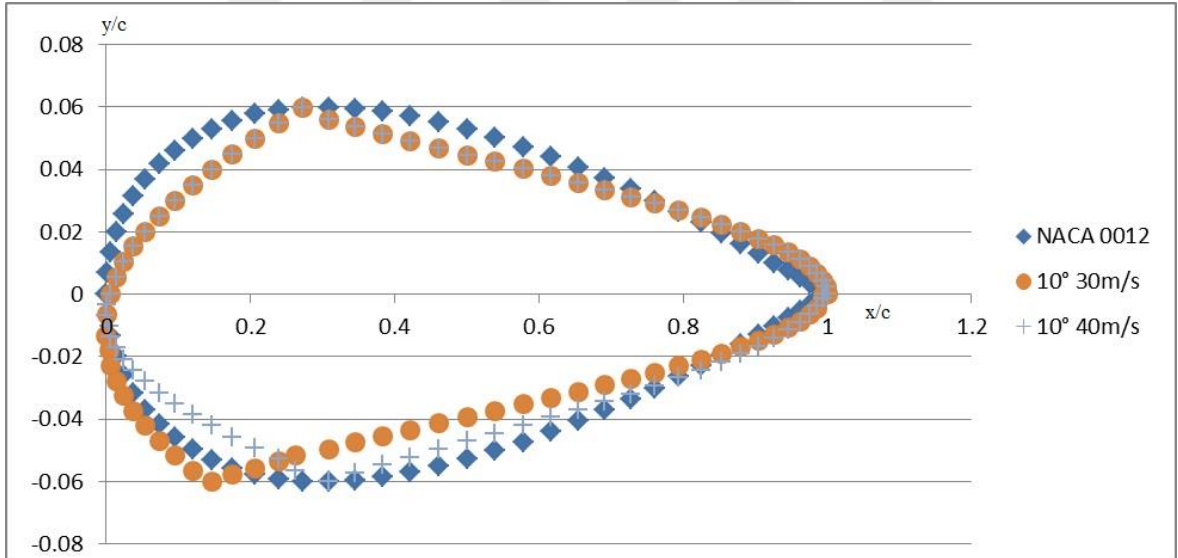
| Hız<br>(m/s) | $C_l/C_d$<br>İlk Değer | $\Delta C_l/C_d$ | $C_l/C_d$<br>Optimizasyon<br>Değeri |
|--------------|------------------------|------------------|-------------------------------------|
| 5            | 12,013490              | 1,212100         | 13,205625                           |
| 10           | 12,574420              | 1,075796         | 13,205625                           |
| 20           | 13,061780              | 0,115193         | 13,205625                           |
| 25           | 13,205625              | 0,000000         | 13,205625                           |
| 30           | 13,318910              | -0,011938        | 13,205625                           |
| 40           | 13,359180              | -0,122248        | 13,205625                           |
| 50           | 13,490370              | -0,317247        | 13,205625                           |

Pozitif yönde olan değişikliklerde  $C_l$  değeri ilk değerlerin 1,71328 ile 1,02404 katı arasında gerçekleşmiştir. Negatif yönde olan değişikliklerde ise  $C_l$  değeri ilk değerlerin 0,99751 ile 0,93379 katı olacak şekilde gerçekleşmiştir. Bu değişikliklerin olması ise kanat üzerinde olan değişiklikler ile sağlanmaktadır. Bu değişiklikler  $10^\circ$  ve  $4^\circ$  hücum açılarına

ve çeşitli hızlara göre incelenmiştir. Öncelikli olarak  $10^\circ$  hücum açısı için bütün değişiklikler listelenmiştir. Sonrasında ise aynı hücum açısı üzerinde hızlara göre ikili kıyaslamalar ve ana profil üzerinden devam etmiştir. Yatay eksen  $x/c$ 'yi ifade ederken dikey eksen  $y/c$ 'yi ifade etmektedir.



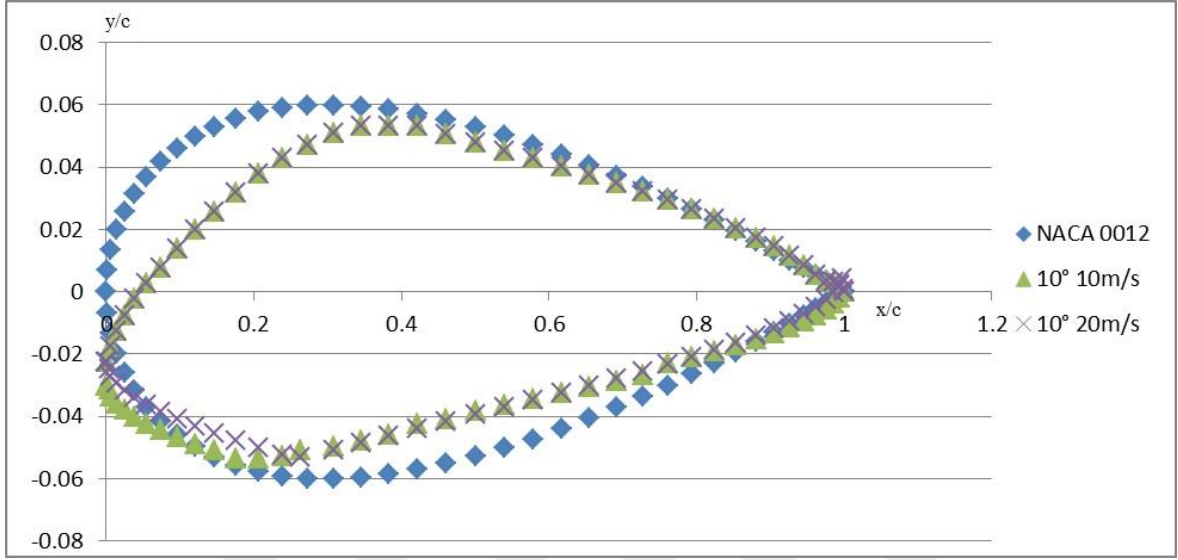
Şekil 5.1.  $10^\circ$  Hücum açısına göre yapılan kanat profil şekil değişikliklerinin toplam gösterimi



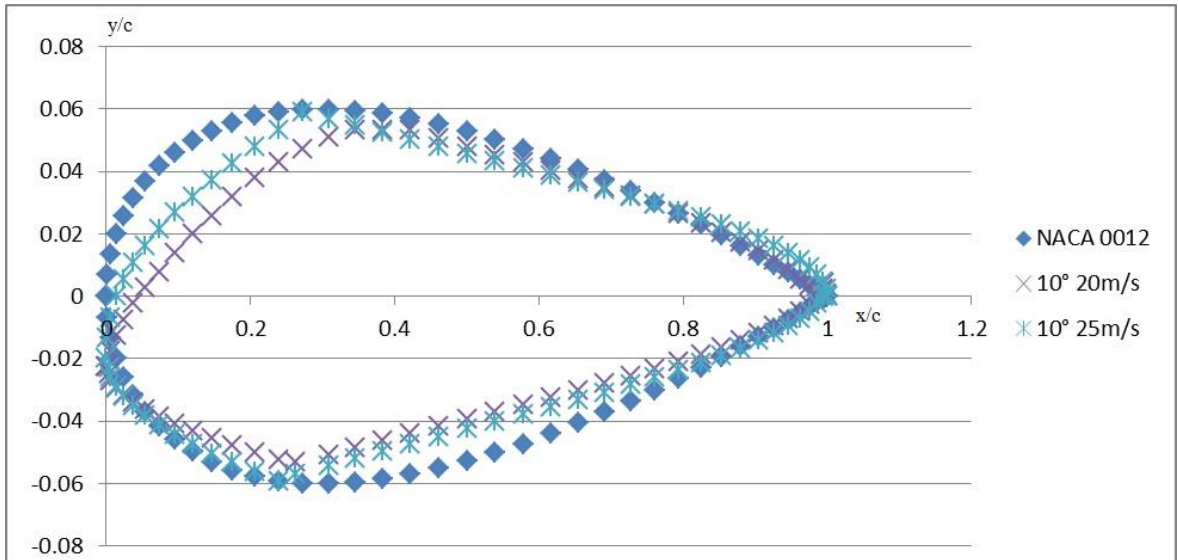
Şekil 5.2.  $10^\circ$  Hücum açısına göre 5m/s ve 10m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması

Şekil 5.2. incelendiğinde  $10^\circ$  hücum açısı için 5m/s ve 10m/s hızları incelendiğinde 5m/s hızında kanat profilinin değişiminin en fazla olduğu incelenmiştir. Bunun temel sebebi kötü sayılabilecek bir hücum açısı ve düşük rüzgâr hızından kaynaklanmaktadır. Çalışmada kaldırma kuvveti olan  $C_l$  değerinin en düşük alan bu nokta en yüksek pozitif  $\Delta C_l/C_d$  değerine sahiptir.

Şekil 5.3. incelendiğinde  $10^\circ$  hücum açısı için 10m/s ve 20m/s hızları incelendiğinde 10m/s hızında kanat profilinin değişiminin 20m/s'ye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. 10m/s için profilin burnu (0,0.-0,03) noktasındayken 20m/s için profilin burununun (0,0.-0,0225) noktasına yükseldiği gözlemlenmiştir. Hız daha düşük olduğu için 10m/s değeri için değişim miktarı daha fazladır. Yatay eksen x/c'yi ifade ederken dikey eksen y/c'yi ifade etmektedir.



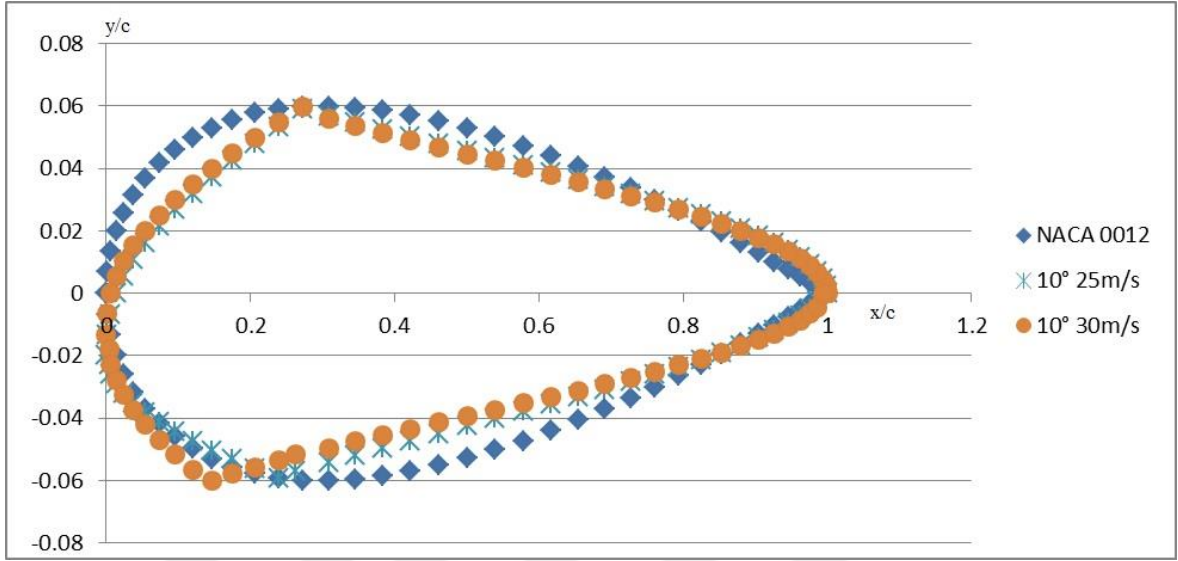
Şekil 5.3.  $10^\circ$  Hücum açısına göre 10m/s ve 20m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması



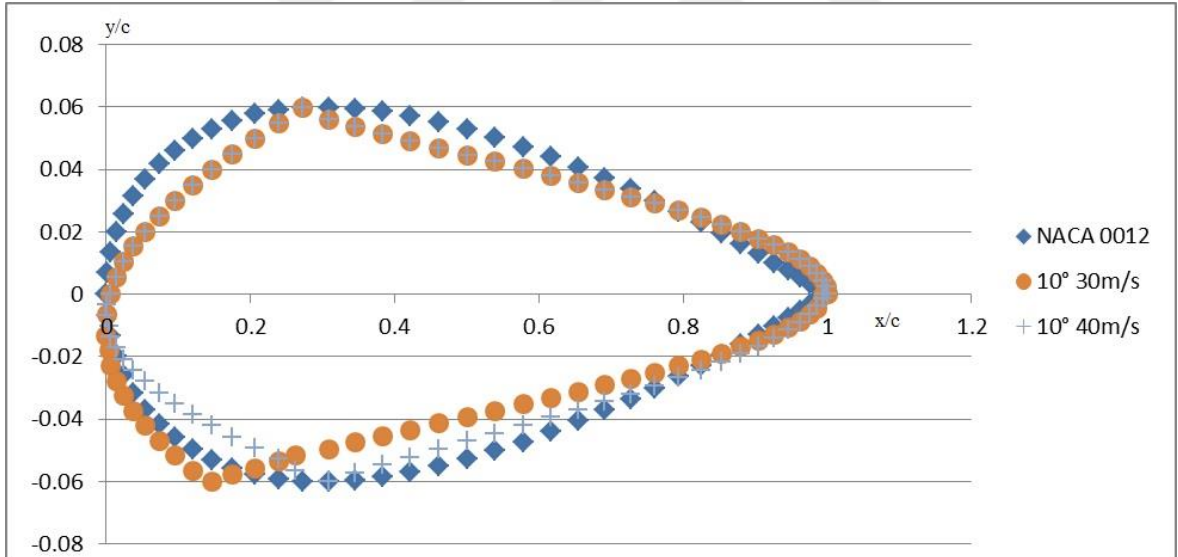
Şekil 5.4.  $10^\circ$  Hücum açısına göre 20m/s ve 25m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması

Şekil 5.4. incelendiğinde  $10^\circ$  hücum açısı için 20m/s ve 25m/s hızları incelendiğinde 20m/s hızında kanat profilinin değişiminin 25m/s'ye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Rüzgâr hızı arttığında kanat optimum değeri profil uç noktasını (0,0.-0,0225) noktasından (0,0.-0,1995) noktasına kaldırarak oluşturmuştur.

Şekil 5.5. incelendiğinde  $10^\circ$  hücum açısı için 25m/s ve 30m/s hızları incelendiğinde 25m/s hızında kanat profilinin değişiminin 30m/s'ye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Yatay eksen  $x/c$ 'yi ifade ederken dikey eksen  $y/c$ 'yi ifade etmektedir.



Şekil 5.5.  $10^\circ$  Hücum açısına göre 25m/s ve 30m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması

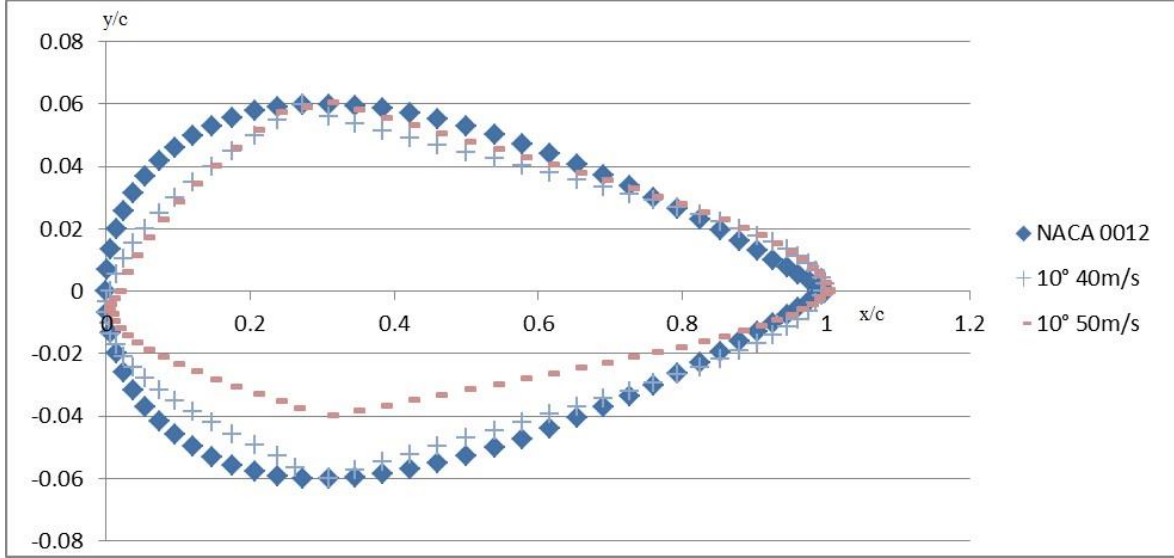


Şekil 5.6.  $10^\circ$  Hücum açısına göre 30m/s ve 40m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması

Şekil 5.6. incelendiğinde  $10^\circ$  hücum açısı için 30m/s ve 40m/s hızları incelendiğinde 30m/s hızında kanat profilinin değişiminin 40m/s'ye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Rüzgâr hızı arttığında kanat optimum değeri profil uç noktasını (0,0.-0,0133) noktasından (0,0.-0,00665) noktasına kaldırarak oluşturmuştur.

Şekil 5.7. incelendiğinde  $10^\circ$  hücum açısı için 40m/s ve 50m/s hızları incelendiğinde 40m/s hızında kanat profilinin değişiminin 50m/s'ye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Buradaki farklılığın temel sebebi 50m/s hızının emniyetli çalışma

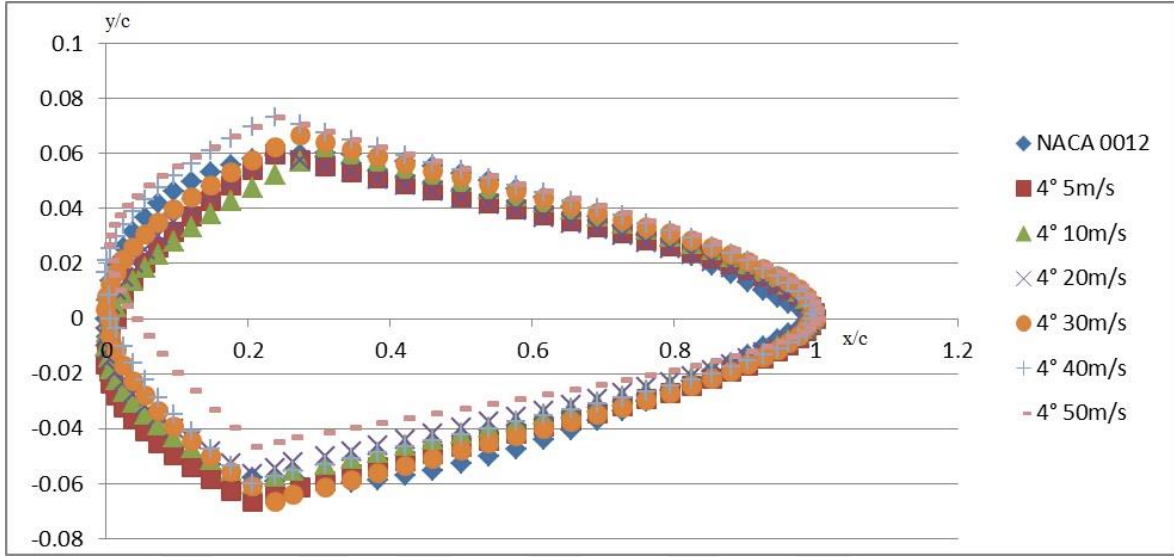
aralığının üst noktası olmasından kaynaklanmaktadır. Kanat profilinde yapılan değişikliklerle birlikte  $C_l$  değeri porifilin optimum çalışma noktası olan  $4^\circ$  hücum açısı ve 25m/s olan hızda elde edilen değere yaklaşmıştır. Yatay eksen  $x/c$ 'yi ifade ederken dikey eksen  $y/c$ 'yi ifade etmektedir.



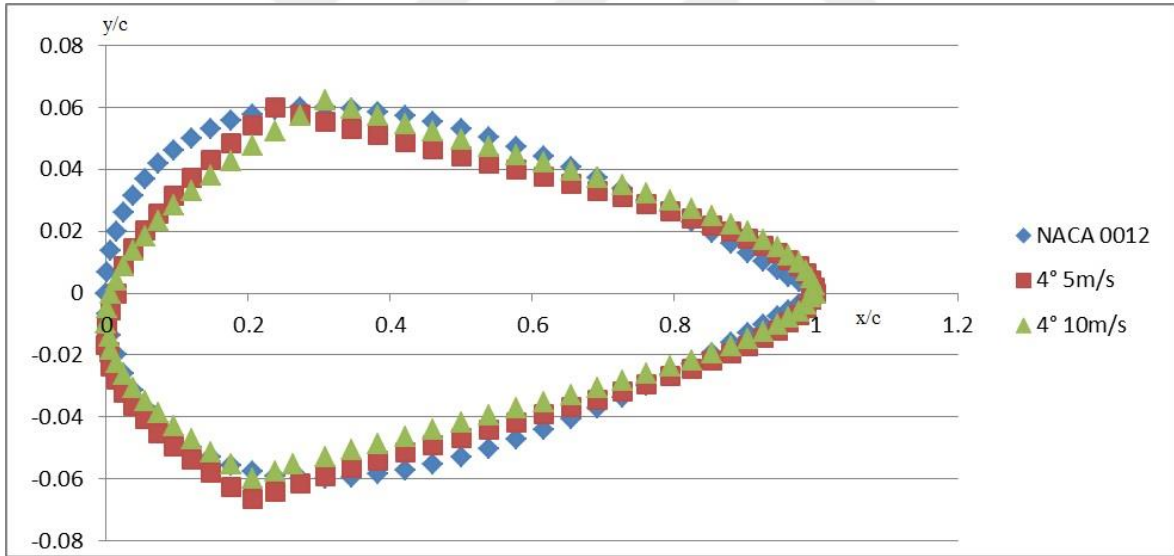
Şekil 5.7.  $10^\circ$  Hücum açısına göre 40m/s ve 50m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması

Çalışmanın devamında  $4^\circ$  hücum açısı ile hesaplamalara devam edilmiştir. Aynı hücum açısı üzerinde hızlara göre ikili ve ana profil üzerinden kıyaslamalar kullanılmıştır.  $4^\circ$  hücum açısı ve 5m/s hız için burun noktasının (0,0,-0,016623) noktasından başlayarak 25m/s hızı ulaşıldığında burun uç noktasının (0,0,0,0) değerini aldığı gözlenmektedir. Bunun temel sebebi  $4^\circ$  hücum açısı ve 25m/s hızı için kanadın tamamen NACA0012 profil özelliğinde olması istendiğinden kaynaklanmaktadır.  $4^\circ$  hücum açısı ve 25m/s için ayrı bir ikili kıyaslama yapılmamasının sebebi kanadın hali hazırda NACA0012 olarak grafiklerde bir temel noktası olarak belirtilmesinden kaynaklanmaktadır.  $4^\circ$  hücum açısı ve 25m/s şartından sonra kanat profili kendini yavaşlatmaya çalışmaktadır. Bunun sebebi kanat üzerinde ihtiyaç duyulan frenleme gücünden kazanmak ve olası fren kapasitesini rüzgâr türbini üzerinde bulunan frenden yararlanmadan direkt olarak kanat üzerinde düşürmektir. Böylelikle  $4^\circ$  hücum açısı 30m/s, 40m/s ve 50m/s hızlarında  $\Delta C_l/C_d$  değeri negatif değerler almaktadır. Böylelikle  $C_l$  katsayısı ilk değerlere göre 0,99751 ve 0,93379 katsayıları ile azalmaktadır. Bu azalma gözletilirken  $C_l/C_d$   $4^\circ$  hücum açısı ve 25m/s değeri baz alınmıştır. Öncelikli olarak Şekil 5.8.'de  $4^\circ$  hücum açısı için bütün değişiklikler gösterilmiş olup sonrasında ise aynı hücum açısı üzerinde hızlara göre ikili kıyaslamalar ve ana profil

üzerinden devam etmiştir. Yatay eksen  $x/c$ 'yi ifade ederken dikey eksen  $y/c$ 'yi ifade etmektedir.



Şekil 5.8. 4° Hücum açısına göre yapılan kanat profil şekil değişikliklerinin toplam gösterimi

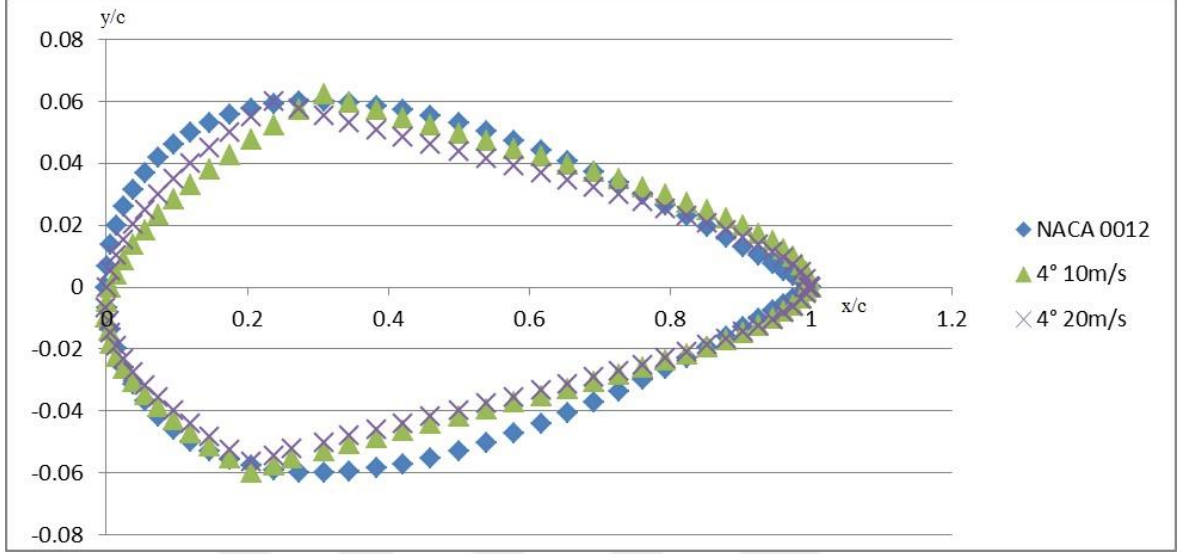


Şekil 5.9. 4° Hücum açısına göre 5m/s ve 10m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması

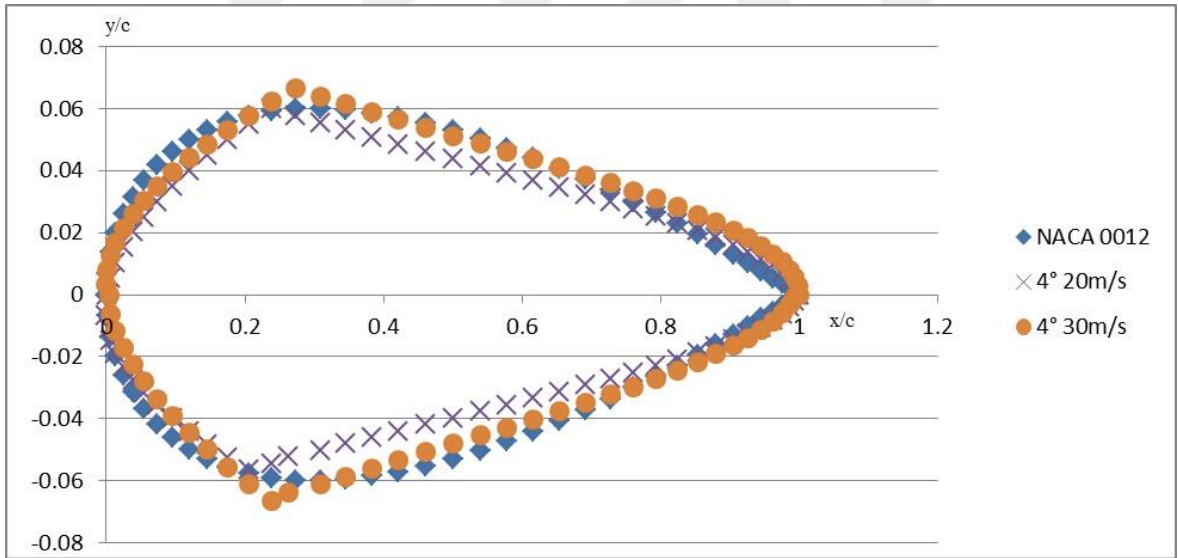
Şekil 5.9. incelendiğinde 4° hücum açısı için 5m/s ve 10m/s hızları incelendiğinde 5m/s hızında kanat profilinin değişiminin 10m/s'ye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Rüzgâr hızı arttığında kanat optimum değeri profil uç noktasını (0,0,-0,016623) noktasından (0,0,-0,00997) noktasına kaldırarak oluşturmıştır.

Şekil 5.10. incelendiğinde 4° hücum açısı için 10m/s ve 20m/s hızları incelendiğinde 5m/s hızında kanat profilinin değişiminin 10m/s'ye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Rüzgâr hızı arttığında kanat optimum değeri profil uç noktasını (0,0,-

0,016623) noktasından (0,0,-0,00997) noktasına kaldırarak oluşturmuştur. İkili kıyaslamada 4° hücum açısı için 25m/s ile kıyaslama yapılması yerine 4° hücum açısı için 20m/s ve 30m/s hızları kıyaslanarak devam edilmiştir. Yatay eksen  $x/c$ 'yi ifade ederken dikey eksen  $y/c$ 'yi ifade etmektedir.



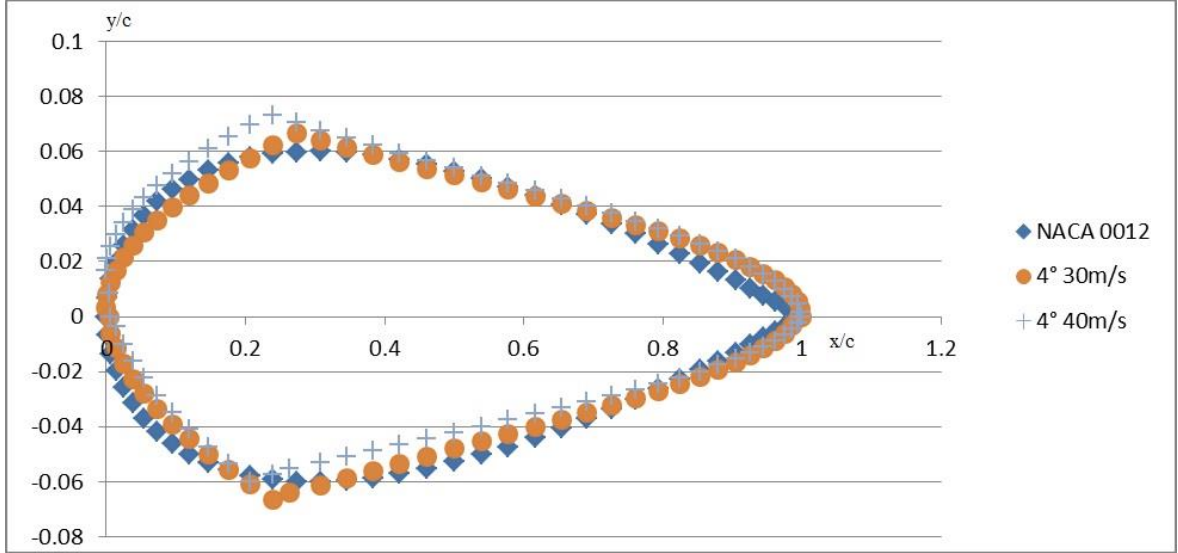
Şekil 5.10. 4° Hücum açısına göre 10m/s ve 20m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması



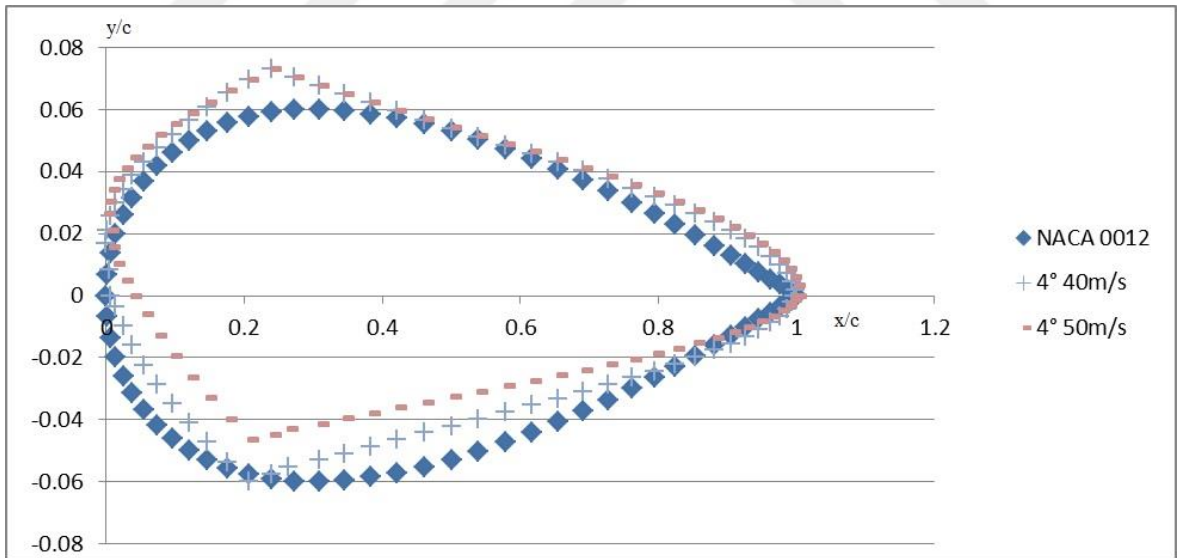
Şekil 5.11. 4° Hücum açısına göre 20m/s ve 30m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması

Şekil 5.11. incelendiğinde 4° hücum açısı için 20m/s ve 30m/s hızları incelendiğinde diğer değişimlerden farklı bir değişim göze çarpmaktadır. Bu farklılık 20m/s hızında  $\Delta C_l/C_d$  değeri pozitifken 30m/s için bu değer negatif olarak incelenmiştir. Bunun temel sebebi optimum noktadan daha yukarda olan bir değer için rüzgâr türbini üzerinden frenleme yapmak yerine kanat üzerinden kaldırma kuvvetinin azaltılarak sürekliliğin sağlanması hedeflenmiştir.

Şekil 5.12. incelendiğinde  $4^\circ$  hücum açısı için 30m/s ve 40m/s hızları incelendiğinde 40m/s için değişikliğin daha yüksek olduğu izlenmektedir. Bunu temel sebebi kaldırma kuvvetini azaltacak şekilde profilin (0,0.0,003325) noktasından (0,0.0,016623) noktasına yükselmesidir. Yatay eksen  $x/c$ 'yi ifade ederken dikey eksen  $y/c$ 'yi ifade etmektedir.



Şekil 5.12.  $4^\circ$  Hücum açısına göre 30m/s ve 40m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması

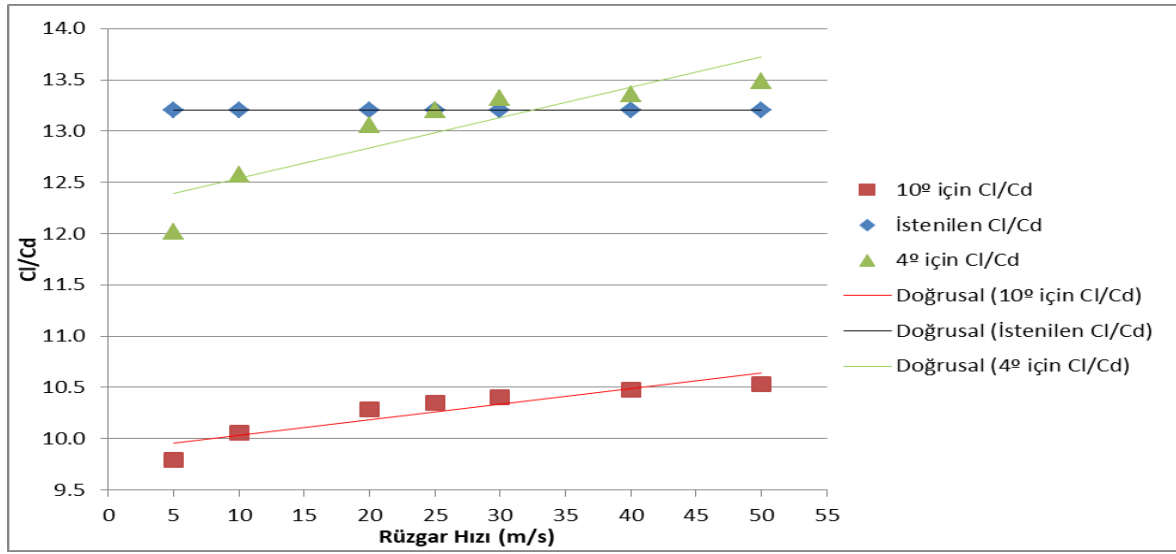


Şekil 5.13.  $4^\circ$  Hücum açısına göre 40m/s ve 50m/s hızlarındaki profil şekil değişikliklerinin kıyaslaması

Şekil 5.13. incelendiğinde  $4^\circ$  hücum açısı için 40m/s ve 50m/s hızları incelendiğinde 50m/s için değişikliğin daha yüksek olduğu izlenmektedir. Yüksek kaldırma kuvveti açısında olan ve emniyetli sınırın üzerine çıkan profil  $C_l$  katsayısını daha da düşürmek için (0,0.0,016623) noktasından (0,0.0,026596) noktasına yükseltmiştir.

Ayrıca yapılan değişiklikle kaldırma kuvvetini azaltmak için alt tarafta oluşan statik basıncı azaltacak yönde yukarı hareket izlenmiştir.

$C_l/C_d$  oranı verim değerini de tanımlayan bir parametredir. Şekil 5.14. incelendiğinde mavi çizgi istenilen  $C_l/C_d$  oranını göstermektedir. Kırmızı ve yeşil çizgiler ise ilk hesaplamalar sonucunda oluşan farklı hücum açıları ve hız değerli için  $C_l/C_d$  oranlarını göstermektedir. Yeşil çizgi ile tanımlanan  $4^\circ$  hücum açısı için 25m/s değerinden ve sonrasında artan hızlarda  $\Delta C_l/C_d$  kaldırma kuvveti  $C_l$ 'yi azalmaya yönelik hareket etmiştir. Geri kalan bölgelerde ise  $\Delta C_l/C_d$  kaldırma kuvveti  $C_l$ 'yi arttıracak şekilde hareket etmiştir.



Şekil 5.14.  $10^\circ$  ve  $4^\circ$  Hücum açılarında çeşitli hızlarda  $C_l/C_d$  değerlerinin optimum değere göre konumları

## 6. BULGULAR VE ÖNERİLER

### 6.1.Bulgular

Bu çalışmada daha önce yapılan çalışmaları göz önünde bulundurarak simülasyon modeli oluşturulmuş ve doğrulama çalışması yapılarak modelin geçerliliği kanıtlanmıştır. Çalışmanın devamında ise emniyet koşullarında kanat profilinin kaldırma kuvveti elde etmemesi için simetrik kanat ve rüzgâr akışına paralel olacak şekilde simetrik kanat kullanılmıştır ve belirtilen özelliklerde kanat profili üzerinde kaldırma kuvveti oluşmayacağı izlenmiştir. Çalışmanın devamında ise rüzgâr türbinin kanat profilinin optimum çalışma noktası olan  $4^\circ$  hücum açısı için 25m/s değeri türbülanslı akış koşullarında incelenmiş ve  $C_l/C_d$  değeri 13.205625 hesaplanmıştır. Çalışmada incelenen hızlarda  $C_l/C_d$  değeri istenilen optimum koşula getirilerek kanat üzerinde kaldırma kuvveti katsayısı incelenmiştir.  $10^\circ$  hücum açısı kanat profilinin çalışacağı düşük rüzgâr hızı ve ya verimsiz bir hücum açısını incelemek için seçilmiştir.  $10^\circ$  hücum açısı 5m/s koşulundan  $4^\circ$  hücum açısı 20m/s değerine kadar kanat profili kaldırma kuvvetini ve kaldırma kuvveti katsayısını arttıracak şekilde kendisini düzenlemiştir.  $4^\circ$  hücum açısı 25m/s optimum nokta olarak kabul edildiğinden kanat profili üzerinde değişiklik yapılmamıştır.  $4^\circ$  hücum açısı 30m/s koşulundan  $4^\circ$  hücum açısı 50m/s koşuluna kadar olan aralıkta ise kanat profili kaldırma kuvvetini ve kaldırma kuvveti katsayısını emniyet nedenlerinden ötürü azaltacak şekilde kendisini güncellemiştir. Böylelikle yapılan çalışmada perdövites karakteristiği işlenmiş, iki farklı hücum açısı ve çeşitli hız şartlarında istenilen verim değerine göre optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiş olup optimizasyon sonucunda kanat profili üzerindeki değişiklikler geometrik olarak ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda şekil değiştirebilen rüzgâr türbini kanadı sayesinde emniyet nedenleri ile rüzgâr türbininin enerji üretmesi perdovites ile engellenebilirken diğer bir yandan rüzgâr türbinlerinin enerji üretebileceği rüzgâr hızı aralığı genişletilerek türbinin kapasite faktörü ve yıllık enerji üretiminde artış sağlanacaktır.

### 6.2. İleride Yapılması Öngörülen Hesaplamalar ve Öneriler

İleride yapılması öngörülen çalışmalar maddeler halinde ifade edilmiştir. Yapılacak çalışmalar ışığında çeşitli patentler sözkonusu olabilir.

1.Sonsuz nokta sayısı ile kanat profili ifade edilerek matematiksel modellerin oluşturulması

2. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan profiller için olası biçim değiştirme kütüphanelerinin  $C_l/C_d$  değerline göre oluşturulması.
3. Genetik Algoritma ile en iyi profil olasılıklarının seçilmesi.
4. Olası yapısal mukavemet yeterlilik hesaplamalarının yapılması.
5. Yapay sinir ağları kullanılarak oluşturulacak yeni modeller ile optimizasyon yapılması.



## KAYNAKLAR

- [1] Ö. Özgener, “Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgâr Enerjisi Kullanımı,” *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2002. Erişim: 02.04.2018 <http://web.deu.edu.tr/fm d/s12 /1 2-13.pdf>.
- [2] S. Kırım “Rüzgâr Enerjisi ve Uygulamaları,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, 2002.
- [3] O. Türkyılmaz, ve Y. Bayrak, “Türkiye’nin Enerji Görünümü,” TMMOB Makine Mühendisleri Odası, No:691, Ankara s. 2-5, 2018.
- [4] GWEC, Annual Market Update 2017- Global Wind Report, Chapter One, “The Next Big Thing?” Brussels, Belgium, 2018.
- [5] Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği, “Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu,” Ankara, Türkiye, 2018.
- [6] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 13 Nisan 2017 tarih ve 3276/1-1 sayılı Karar “Rüzgâr Enerjisi Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları ve Bağlantılı Kapasitelerinin Tahsisine İlişkin Yarışma İlanı,” RG, 13 Nisan 2017, s.82, Sayı 30037, 2018.
- [7] “Duyurular-YEKA İhalesi Raporu,” <https://www.tureb.com.tr/turebsayfa/duyurular/ruzgar-enerjisi-yenilenebilir-enerji-kaynak-alanlari-yeka-ihalesi.>, 2017.
- [8] H. Sogukpınar, and I. Bozkurt, “Finding Optimum Airfoil Shape To Get Maximum Aerodynamic Efficiency For A Wind Turbine,” *Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress*, Bodrum-Turkey, pp. 107, 2017.
- [9] O. Bilgen, and M. I. Friswell, “Piezoceramic Composite Actuators For A Solid-State Variable-Camber Wing,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(7), pp. 806-817. 2013.

- [10] D. Li, S. Zhao, A. D. Ronch, J. Xiang, J. Drofelnik, Y. Li, R. D. A. Breuker, "Review Of Modelling And Analysis Of Morphing Wings," *Progress in Aerospace Sciences*, 100, 46-62., 2018.
- [11] J. Morgado, R. Vizinho, M. Silvestre, and J. Páscoa, "XFOIL vs HAD Performance Predictions For High Lift Low Reynolds Number Airfoils," *Aerospace Science and Technology*, 52, pp. 207-214., 2016.
- [12] Q. Wang, and Q. Zhao, "Rotor Airfoil Profile Optimisation For Alleviating Dynamic Stall Characteristics," *Aerospace Science and Technology*, 72, 502-515., 2018.
- [13] X. Lu, X. Huang, J. Song, and J. Li, "An Improved Geometric Parameter Airfoil Parameterization Method," *Aerospace Science and Technology*, 78, pp. 241-247., 2018.
- [14] H. Yang, J. Chen, X. Pang, and G. Chen, "A New Aero-Structural Optimisation Method For Wind Turbine Blades Used In Low Wind Speed Areas," *Composite Structures*, 207, pp. 446-459., 2019.
- [15] X. Wang, W. Zhou, and Z. Wu, "Feedback Tracking Control For Dynamic Morphing Of Piezocomposite Actuated Flexible Wings," *Journal of Sound and Vibration*, 416, pp. 17-28., 2018.
- [16] A. González, A. J. Cortadí, D. Galar, and L. Ciani, "Condition Monitoring Of Wind Turbine Pitch Controller: A Maintenance Approach," *Measurement*, 123, pp. 80-93., 2018.
- [17] S. E. Mouhsine, K. Oukassou, M. M. Ichenial, B. Kharbouch, and A. Hajraoui, "Aerodynamics and Structural Analysis Of Wind Turbine Blade," *Procedia Manufacturing*, 22, pp. 747-756., 2018.

- [18] K. O. Ronold, and C. J. Christensen, "Optimisation Of A Design Code For Wind-Turbine Rotor Blades In Fatigue," *Engineering Structures*, 23(8), pp. 993-1004., 2001.
- [19] T. Ashuri, M. B. Zaaijer, J. R. Martins, and J. Zhang, "Multidisciplinary Design Optimisation Of Large Wind Turbines-Technical, Economic, And Design Challenges," *Energy Conversion and Management*, 123, 56-70., 2016.
- [20] J. X. Neto, E. J. Junior, S. R. Moreno, H. V. Ayala, V. C. Mariani, and L. D. Coelho, "Wind Turbine Blade Geometry Design Based On Multi-Objective Optimisation Using Metaheuristics," *Energy*, 162, pp. 645-658., 2018.
- [21] M. Jureczko, M. Pawlak, and A. Mężyk, "Optimisation Of Wind Turbine Blades," *Journal of Materials Processing Technology*, 167(2-3), pp. 463-471., 2005.
- [22] J. Lee, Park, K. Oh, S. Ju, and J. Lee, "Transformation Algorithm Of Wind Turbine Blade Moment Signals For Blade Condition Monitoring," *Renewable Energy*, 79, pp. 209-218., 2015.
- [23] H. K. Nejadkhaki, and J. F. Hall, "A Design Methodology for a Flexible Wind Turbine Blade With an Actively Variable Twist Distribution to Increase Region 2 Efficiency," Volume 2A: *43rd Design Automation Conference*, 2017.
- [24] C. Thumthae, "Optimum Blade Profiles for a Variable-Speed Wind Turbine in Low Wind Area," *Energy Procedia*, 75, pp. 651-657., 2015.
- [25] H. H. Açikel, and M. S. Genç, "Control Of Laminar Separation Bubble Over Wind Turbine Airfoil Using Partial Flexibility On Suction Surface," *Energy*, 165, pp. 176-190. 2018.
- [26] A. A. Nada, and A. S. Al-Shahrani, "Shape Optimisation of Low Speed Wind Turbine Blades using Flexible Multibody Approach," *Energy Procedia*, 134, pp. 577-587., 2017.

- [27] D. W. Macphee, and A. Beyene, “Fluid–Structure Interaction Analysis Of A Morphing Vertical Axis Wind Turbine,” *Journal Of Fluids and Structures*, 60, pp. 143-159. 2016.
- [28] I. Marinić-Kragić, D. Vučina, and Z. Milas, “Concept Of Flexible Vertical-Axis Wind Turbine With Numerical Simulation And Shape Optimisation,” *Energy*, 2018.
- [29] M. Ataseven, ve S. Ataseven, “Senkron Rüzgâr Türbinleri ve Kontrol Sistemleri,” TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, [www.emo.org.tr/ekler/ce154e\\_9fd3ffefc\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/ce154e_9fd3ffefc_ek.pdf), 2010.
- [30] M. I. Blanco, “The Economics Of Wind Energy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), pp. 1372-1382, 2008.
- [31] P. J. Schubel, and R. J. Crossley, “Wind Turbine Blade Design,” *Energies*, 5(9), pp. 3425-3449., 2012.
- [32] J. F. Manwell, J. G. Mcgowan, And A. L. Rogers, “Wind Energy Explained: Theory, Design And Application,” John Wiley & Sons. Chichester, U.K., 2002.
- [33] “Flow Over An Airfoil-Verification and Validation,” Cornell University, <https://confluence.cornell.edu/pages/viewpage.action?pageId=144976461>., 2015.
- [34] “Airfoil Database Search,” Airfoil Tools, <http://airfoiltools.com/search/index>., 2015
- [35] C. Bak, “Airfoil Characteristics For Wind Turbines, Roskilde,” Denmark, Riso National Laboratory, 1999.

**EKLER**



## EK 1: KANAT PROFİL ŞEKİL DEĞİŞİKLİKLERİNİN NOKTA VERİLERİ

Tablo EK 1.1. NACA0012,  $\alpha=10^\circ$  5m/s ve  $\alpha=10^\circ$  10m/s değerlerine ait nokta verileri listesi

| NACA0012 |          | $\alpha=10^\circ$ , 5m/s |           | $\alpha=10^\circ$ , 10m/s |          |
|----------|----------|--------------------------|-----------|---------------------------|----------|
| 1        | 0        | 1                        | 0         | 1                         | 0,000102 |
| 0,998459 | 0,000224 | 0,998459                 | 0,0022312 | 0,998459                  | 0,001008 |
| 0,993844 | 0,000891 | 0,993844                 | 0,0044624 | 0,993844                  | 0,002192 |
| 0,986185 | 0,00199  | 0,986185                 | 0,0066936 | 0,986185                  | 0,002992 |
| 0,975528 | 0,003501 | 0,975528                 | 0,0089248 | 0,975528                  | 0,003392 |
| 0,96194  | 0,005399 | 0,96194                  | 0,011156  | 0,96194                   | 0,005464 |
| 0,945503 | 0,007651 | 0,945503                 | 0,0133872 | 0,945503                  | 0,008456 |
| 0,92632  | 0,010221 | 0,92632                  | 0,0156184 | 0,92632                   | 0,011448 |
| 0,904508 | 0,013071 | 0,904508                 | 0,0178496 | 0,904508                  | 0,01444  |
| 0,880203 | 0,016158 | 0,880203                 | 0,0200808 | 0,880203                  | 0,017432 |
| 0,853553 | 0,019438 | 0,853553                 | 0,022312  | 0,853553                  | 0,020424 |
| 0,824724 | 0,022869 | 0,824724                 | 0,0245432 | 0,824724                  | 0,023416 |
| 0,793893 | 0,026405 | 0,793893                 | 0,0267744 | 0,793893                  | 0,026408 |
| 0,761249 | 0,03     | 0,761249                 | 0,0290056 | 0,761249                  | 0,0294   |
| 0,726995 | 0,03361  | 0,726995                 | 0,0312368 | 0,726995                  | 0,032392 |
| 0,691342 | 0,037188 | 0,691342                 | 0,033468  | 0,691342                  | 0,034992 |
| 0,654508 | 0,040686 | 0,654508                 | 0,0356992 | 0,654508                  | 0,037592 |
| 0,616723 | 0,044055 | 0,616723                 | 0,0379304 | 0,616723                  | 0,040192 |
| 0,578217 | 0,047242 | 0,578217                 | 0,0401616 | 0,578217                  | 0,042792 |
| 0,53923  | 0,050196 | 0,53923                  | 0,0423928 | 0,53923                   | 0,045392 |
| 0,5      | 0,052862 | 0,5                      | 0,044624  | 0,5                       | 0,047992 |
| 0,46077  | 0,055184 | 0,46077                  | 0,0468552 | 0,46077                   | 0,050592 |
| 0,421783 | 0,057108 | 0,421783                 | 0,0490864 | 0,421783                  | 0,053192 |
| 0,383277 | 0,058582 | 0,383277                 | 0,0513176 | 0,383277                  | 0,053192 |
| 0,345492 | 0,059557 | 0,345492                 | 0,053192  | 0,345492                  | 0,053192 |
| 0,308658 | 0,059988 | 0,308658                 | 0,048312  | 0,308658                  | 0,051139 |
| 0,273005 | 0,059841 | 0,273005                 | 0,043432  | 0,273005                  | 0,047086 |
| 0,238751 | 0,059088 | 0,238751                 | 0,038552  | 0,238751                  | 0,043033 |
| 0,206107 | 0,057712 | 0,206107                 | 0,033672  | 0,206107                  | 0,03798  |
| 0,175276 | 0,055708 | 0,175276                 | 0,028792  | 0,175276                  | 0,031927 |
| 0,146447 | 0,053083 | 0,146447                 | 0,023912  | 0,146447                  | 0,025874 |
| 0,119797 | 0,049854 | 0,119797                 | 0,019032  | 0,119797                  | 0,019821 |
| 0,095492 | 0,046049 | 0,095492                 | 0,014152  | 0,095492                  | 0,013768 |
| 0,07368  | 0,041705 | 0,07368                  | 0,009272  | 0,07368                   | 0,007715 |
| 0,054497 | 0,036867 | 0,054497                 | 0,004392  | 0,054497                  | 0,002662 |
| 0,03806  | 0,03158  | 0,03806                  | 0         | 0,03806                   | -0,00239 |
| 0,024472 | 0,025893 | 0,024472                 | -0,005905 | 0,024472                  | -0,00744 |
| 0,013815 | 0,019854 | 0,013815                 | -0,01274  | 0,013815                  | -0,0125  |
| 0,006156 | 0,013503 | 0,006156                 | -0,019575 | 0,006156                  | -0,01755 |
| 0,001541 | 0,006877 | 0,001541                 | -0,02641  | 0,001541                  | -0,0226  |
| 0        | 0        | 0                        | -0,032068 | 0                         | -0,03    |

| NACA0012 |          |
|----------|----------|
| 0,001541 | -0,00688 |
| 0,006156 | -0,0135  |
| 0,013815 | -0,01985 |
| 0,024472 | -0,02589 |
| 0,03806  | -0,03158 |
| 0,054497 | -0,03687 |
| 0,07368  | -0,04171 |
| 0,095492 | -0,04605 |
| 0,119797 | -0,04985 |
| 0,146447 | -0,05308 |
| 0,175276 | -0,05571 |
| 0,206107 | -0,05771 |
| 0,238751 | -0,05909 |
| 0,273005 | -0,05984 |
| 0,308658 | -0,05999 |
| 0,345492 | -0,05956 |
| 0,383277 | -0,05858 |
| 0,421783 | -0,05711 |
| 0,46077  | -0,05518 |
| 0,5      | -0,05286 |
| 0,53923  | -0,0502  |
| 0,578217 | -0,04724 |
| 0,616723 | -0,04406 |
| 0,654508 | -0,04069 |
| 0,691342 | -0,03719 |
| 0,726995 | -0,03361 |
| 0,761249 | -0,03    |
| 0,793893 | -0,02641 |
| 0,824724 | -0,02287 |
| 0,853553 | -0,01944 |
| 0,880203 | -0,01616 |
| 0,904508 | -0,01307 |
| 0,92632  | -0,01022 |
| 0,945503 | -0,00765 |
| 0,96194  | -0,0054  |
| 0,975528 | -0,0035  |
| 0,986185 | -0,00199 |
| 0,993844 | -0,00089 |
| 0,998459 | -0,00022 |

| $\alpha=10^\circ$ , 5m/s |           |
|--------------------------|-----------|
| 0,003541                 | -0,034562 |
| 0,006156                 | -0,037056 |
| 0,013815                 | -0,03955  |
| 0,024472                 | -0,042044 |
| 0,03806                  | -0,044538 |
| 0,054497                 | -0,047032 |
| 0,07368                  | -0,049526 |
| 0,095492                 | -0,05202  |
| 0,119797                 | -0,054514 |
| 0,146447                 | -0,057008 |
| 0,175276                 | -0,059502 |
| 0,206107                 | -0,061996 |
| 0,238751                 | -0,06449  |
| 0,273005                 | -0,06386  |
| 0,308658                 | -0,06123  |
| 0,345492                 | -0,0586   |
| 0,383277                 | -0,05597  |
| 0,421783                 | -0,05334  |
| 0,46077                  | -0,05071  |
| 0,5                      | -0,04808  |
| 0,53923                  | -0,04545  |
| 0,578217                 | -0,04282  |
| 0,616723                 | -0,04019  |
| 0,654508                 | -0,03756  |
| 0,691342                 | -0,03493  |
| 0,726995                 | -0,0323   |
| 0,761249                 | -0,02967  |
| 0,793893                 | -0,02704  |
| 0,824724                 | -0,02441  |
| 0,853553                 | -0,02178  |
| 0,880203                 | -0,01915  |
| 0,904508                 | -0,01652  |
| 0,92632                  | -0,01389  |
| 0,945503                 | -0,01126  |
| 0,96194                  | -0,00863  |
| 0,975528                 | -0,006    |
| 0,986185                 | -0,00337  |
| 0,993844                 | -0,00074  |
| 0,996478                 | 0         |

| $\alpha=10^\circ$ , 10m/s |          |
|---------------------------|----------|
| 0,003541                  | -0,03139 |
| 0,006156                  | -0,03357 |
| 0,013815                  | -0,03575 |
| 0,024472                  | -0,03793 |
| 0,03806                   | -0,04011 |
| 0,054497                  | -0,04229 |
| 0,07368                   | -0,04447 |
| 0,095492                  | -0,04665 |
| 0,119797                  | -0,04883 |
| 0,146447                  | -0,05101 |
| 0,175276                  | -0,05349 |
| 0,206107                  | -0,05349 |
| 0,238751                  | -0,05286 |
| 0,263005                  | -0,05079 |
| 0,308658                  | -0,04959 |
| 0,345492                  | -0,04769 |
| 0,383277                  | -0,04579 |
| 0,421783                  | -0,0425  |
| 0,46077                   | -0,04099 |
| 0,5                       | -0,03809 |
| 0,53923                   | -0,03619 |
| 0,578217                  | -0,03429 |
| 0,616723                  | -0,03239 |
| 0,654508                  | -0,03049 |
| 0,691342                  | -0,02859 |
| 0,726995                  | -0,02679 |
| 0,761249                  | -0,02279 |
| 0,793893                  | -0,02089 |
| 0,824724                  | -0,01899 |
| 0,853553                  | -0,01709 |
| 0,880203                  | -0,01519 |
| 0,904508                  | -0,01329 |
| 0,92632                   | -0,01139 |
| 0,945503                  | -0,00949 |
| 0,96194                   | -0,00759 |
| 0,975528                  | -0,00569 |
| 0,986185                  | -0,00379 |
| 0,993844                  | -0,00189 |
| 0,996478                  | 0        |

Tablo EK 1.2.  $\alpha=10^\circ$  15m/s,  $\alpha=10^\circ$  20m/s ve  $\alpha=10^\circ$  25m/s değerlerine ait nokta verileri listesi

| $\alpha=10^\circ$ 15m/s |          |
|-------------------------|----------|
| 1                       | 0        |
| 0,998459                | 0,001008 |
| 0,993844                | 0,002192 |
| 0,986185                | 0,002992 |
| 0,975528                | 0,003392 |
| 0,96194                 | 0,005464 |
| 0,945503                | 0,008456 |
| 0,92632                 | 0,011448 |
| 0,904508                | 0,01444  |
| 0,880203                | 0,017432 |
| 0,853553                | 0,020424 |
| 0,824724                | 0,023416 |
| 0,793893                | 0,026408 |
| 0,761249                | 0,0294   |
| 0,726995                | 0,032392 |
| 0,691342                | 0,034992 |
| 0,654508                | 0,037592 |
| 0,616723                | 0,040192 |
| 0,578217                | 0,042792 |
| 0,53923                 | 0,045392 |
| 0,5                     | 0,047992 |
| 0,46077                 | 0,050592 |
| 0,421783                | 0,053192 |
| 0,383277                | 0,053192 |
| 0,345492                | 0,053192 |
| 0,308658                | 0,051139 |
| 0,273005                | 0,047086 |
| 0,238751                | 0,043033 |
| 0,206107                | 0,03798  |
| 0,175276                | 0,031927 |
| 0,146447                | 0,025874 |
| 0,119797                | 0,019821 |
| 0,095492                | 0,013768 |
| 0,07368                 | 0,007715 |
| 0,054497                | 0,002662 |
| 0,03806                 | -0,00239 |
| 0,024472                | -0,00744 |
| 0,013815                | -0,0125  |
| 0,006156                | -0,01755 |
| 0,001541                | -0,0226  |
| 0                       | -0,0225  |
| 0,003541                | -0,0248  |

| $\alpha=10^\circ$ 20m/s |          |
|-------------------------|----------|
| 1                       | 0        |
| 0,998459                | 0,002528 |
| 0,993844                | 0,004793 |
| 0,986185                | 0,007059 |
| 0,975528                | 0,009324 |
| 0,96194                 | 0,01159  |
| 0,945503                | 0,013855 |
| 0,92632                 | 0,016121 |
| 0,904508                | 0,018386 |
| 0,880203                | 0,020652 |
| 0,853553                | 0,022917 |
| 0,824724                | 0,025183 |
| 0,793893                | 0,027449 |
| 0,761249                | 0,029714 |
| 0,726995                | 0,03198  |
| 0,691342                | 0,034245 |
| 0,654508                | 0,036511 |
| 0,616723                | 0,038776 |
| 0,578217                | 0,041042 |
| 0,53923                 | 0,043307 |
| 0,5                     | 0,045573 |
| 0,46077                 | 0,047838 |
| 0,421783                | 0,050104 |
| 0,383277                | 0,052369 |
| 0,345492                | 0,054635 |
| 0,308658                | 0,0569   |
| 0,273005                | 0,059166 |
| 0,238751                | 0,053402 |
| 0,206107                | 0,048062 |
| 0,175276                | 0,042722 |
| 0,146447                | 0,037381 |
| 0,119797                | 0,032041 |
| 0,095492                | 0,026701 |
| 0,07368                 | 0,021361 |
| 0,054497                | 0,016021 |
| 0,03806                 | 0,01068  |
| 0,024472                | 0,00534  |
| 0,013815                | 0        |
| 0,006156                | -0,00664 |
| 0,001541                | -0,01328 |
| 0                       | -0,01995 |
| 0,003541                | -0,02298 |

| $\alpha=10^\circ$ 25m/s |          |
|-------------------------|----------|
| 1                       | 0        |
| 0,998459                | 0,002231 |
| 0,993844                | 0,004462 |
| 0,986185                | 0,006694 |
| 0,975528                | 0,008925 |
| 0,96194                 | 0,011156 |
| 0,945503                | 0,013387 |
| 0,92632                 | 0,015618 |
| 0,904508                | 0,01785  |
| 0,880203                | 0,020081 |
| 0,853553                | 0,022312 |
| 0,824724                | 0,024543 |
| 0,793893                | 0,026774 |
| 0,761249                | 0,029006 |
| 0,726995                | 0,031237 |
| 0,691342                | 0,033468 |
| 0,654508                | 0,035699 |
| 0,616723                | 0,03793  |
| 0,578217                | 0,040162 |
| 0,53923                 | 0,042393 |
| 0,5                     | 0,044624 |
| 0,46077                 | 0,046855 |
| 0,421783                | 0,049086 |
| 0,383277                | 0,051318 |
| 0,345492                | 0,053549 |
| 0,308658                | 0,05578  |
| 0,273005                | 0,059841 |
| 0,238751                | 0,054881 |
| 0,206107                | 0,049921 |
| 0,175276                | 0,044962 |
| 0,146447                | 0,040002 |
| 0,119797                | 0,035042 |
| 0,095492                | 0,030082 |
| 0,07368                 | 0,025122 |
| 0,054497                | 0,020163 |
| 0,03806                 | 0,015203 |
| 0,024472                | 0,010243 |
| 0,013815                | 0,005283 |
| 0,006156                | 0        |
| 0,001541                | -0,0065  |
| 0                       | -0,0133  |
| 0,003541                | -0,0181  |

| $\alpha=10^\circ$ 15m/s |          |
|-------------------------|----------|
| 0,006156                | -0,0271  |
| 0,013815                | -0,0294  |
| 0,024472                | -0,0317  |
| 0,03806                 | -0,034   |
| 0,054497                | -0,0363  |
| 0,07368                 | -0,0386  |
| 0,095492                | -0,0409  |
| 0,119797                | -0,0432  |
| 0,146447                | -0,0455  |
| 0,175276                | -0,0478  |
| 0,206107                | -0,0501  |
| 0,238751                | -0,0524  |
| 0,263005                | -0,05319 |
| 0,308658                | -0,0509  |
| 0,345492                | -0,04861 |
| 0,383277                | -0,04632 |
| 0,421783                | -0,04402 |
| 0,46077                 | -0,04173 |
| 0,5                     | -0,03944 |
| 0,53923                 | -0,03715 |
| 0,578217                | -0,03486 |
| 0,616723                | -0,03256 |
| 0,654508                | -0,03027 |
| 0,691342                | -0,02798 |
| 0,726995                | -0,02569 |
| 0,761249                | -0,0234  |
| 0,793893                | -0,0211  |
| 0,824724                | -0,01881 |
| 0,853553                | -0,01652 |
| 0,880203                | -0,01423 |
| 0,904508                | -0,01194 |
| 0,92632                 | -0,00964 |
| 0,945503                | -0,00735 |
| 0,96194                 | -0,00506 |
| 0,975528                | -0,00277 |
| 0,986185                | -0,00048 |
| 0,993844                | 0,001816 |
| 0,996478                | 0,004108 |

| $\alpha=10^\circ$ 20m/s |          |
|-------------------------|----------|
| 0,006156                | -0,02601 |
| 0,013815                | -0,02905 |
| 0,024472                | -0,03208 |
| 0,03806                 | -0,03511 |
| 0,054497                | -0,03815 |
| 0,07368                 | -0,04118 |
| 0,095492                | -0,04421 |
| 0,119797                | -0,04724 |
| 0,146447                | -0,05028 |
| 0,175276                | -0,05331 |
| 0,206107                | -0,05634 |
| 0,238751                | -0,05917 |
| 0,263005                | -0,0568  |
| 0,308658                | -0,05443 |
| 0,345492                | -0,05207 |
| 0,383277                | -0,0497  |
| 0,421783                | -0,04734 |
| 0,46077                 | -0,04497 |
| 0,5                     | -0,04261 |
| 0,53923                 | -0,04024 |
| 0,578217                | -0,03788 |
| 0,616723                | -0,03551 |
| 0,654508                | -0,03315 |
| 0,691342                | -0,03078 |
| 0,726995                | -0,02841 |
| 0,761249                | -0,02605 |
| 0,793893                | -0,02368 |
| 0,824724                | -0,02132 |
| 0,853553                | -0,01895 |
| 0,880203                | -0,01659 |
| 0,904508                | -0,01422 |
| 0,92632                 | -0,01186 |
| 0,945503                | -0,00949 |
| 0,96194                 | -0,00712 |
| 0,975528                | -0,00476 |
| 0,986185                | -0,00239 |
| 0,993844                | -2,8E-05 |
| 0,996478                | 0        |

| $\alpha=10^\circ$ 25m/s |          |
|-------------------------|----------|
| 0,006156                | -0,0229  |
| 0,013815                | -0,0277  |
| 0,024472                | -0,03251 |
| 0,03806                 | -0,03731 |
| 0,054497                | -0,04211 |
| 0,07368                 | -0,04691 |
| 0,095492                | -0,05171 |
| 0,119797                | -0,05652 |
| 0,146447                | -0,05984 |
| 0,175276                | -0,05779 |
| 0,206107                | -0,05575 |
| 0,238751                | -0,0537  |
| 0,263005                | -0,05165 |
| 0,308658                | -0,04961 |
| 0,345492                | -0,04756 |
| 0,383277                | -0,04551 |
| 0,421783                | -0,04347 |
| 0,46077                 | -0,04142 |
| 0,5                     | -0,03937 |
| 0,53923                 | -0,03732 |
| 0,578217                | -0,03528 |
| 0,616723                | -0,03323 |
| 0,654508                | -0,03118 |
| 0,691342                | -0,02914 |
| 0,726995                | -0,02709 |
| 0,761249                | -0,02504 |
| 0,793893                | -0,023   |
| 0,824724                | -0,02095 |
| 0,853553                | -0,0189  |
| 0,880203                | -0,01685 |
| 0,904508                | -0,01481 |
| 0,92632                 | -0,01276 |
| 0,945503                | -0,01071 |
| 0,96194                 | -0,00867 |
| 0,975528                | -0,00662 |
| 0,986185                | -0,00457 |
| 0,993844                | -0,00025 |
| 0,996478                | 0        |

Tablo EK 1.3.  $\alpha=10^\circ$  40m/s ve  $\alpha=10^\circ$  50m/s değerlerine ait nokta verileri listesi

| $\alpha=10^\circ$ 40m/s |          | $\alpha=10^\circ$ 50m/s |          |
|-------------------------|----------|-------------------------|----------|
| 1                       | 0        | 1                       | 0        |
| 0,998459                | 0,002231 | 0,998459                | 0,000278 |
| 0,993844                | 0,004462 | 0,993844                | 0,002794 |
| 0,986185                | 0,006694 | 0,986185                | 0,005309 |
| 0,975528                | 0,008925 | 0,975528                | 0,007825 |
| 0,96194                 | 0,011156 | 0,96194                 | 0,01034  |
| 0,945503                | 0,013387 | 0,945503                | 0,012856 |
| 0,92632                 | 0,015618 | 0,92632                 | 0,015371 |
| 0,904508                | 0,01785  | 0,904508                | 0,017887 |
| 0,880203                | 0,020081 | 0,880203                | 0,020402 |
| 0,853553                | 0,022312 | 0,853553                | 0,022918 |
| 0,824724                | 0,024543 | 0,824724                | 0,025433 |
| 0,793893                | 0,026774 | 0,793893                | 0,027949 |
| 0,761249                | 0,029006 | 0,761249                | 0,030464 |
| 0,726995                | 0,031237 | 0,726995                | 0,03298  |
| 0,691342                | 0,033468 | 0,691342                | 0,035495 |
| 0,654508                | 0,035699 | 0,654508                | 0,038011 |
| 0,616723                | 0,03793  | 0,616723                | 0,040526 |
| 0,578217                | 0,040162 | 0,578217                | 0,043042 |
| 0,53923                 | 0,042393 | 0,53923                 | 0,045557 |
| 0,5                     | 0,044624 | 0,5                     | 0,048073 |
| 0,46077                 | 0,046855 | 0,46077                 | 0,050588 |
| 0,421783                | 0,049086 | 0,421783                | 0,053104 |
| 0,383277                | 0,051318 | 0,383277                | 0,055619 |
| 0,345492                | 0,053549 | 0,345492                | 0,058135 |
| 0,308658                | 0,05578  | 0,308658                | 0,06065  |
| 0,273005                | 0,059841 | 0,273005                | 0,059166 |
| 0,238751                | 0,054881 | 0,238751                | 0,05745  |
| 0,206107                | 0,049921 | 0,206107                | 0,051735 |
| 0,175276                | 0,044962 | 0,175276                | 0,046019 |
| 0,146447                | 0,040002 | 0,146447                | 0,040304 |
| 0,119797                | 0,035042 | 0,119797                | 0,034588 |
| 0,095492                | 0,030082 | 0,095492                | 0,028873 |
| 0,07368                 | 0,025122 | 0,07368                 | 0,023157 |
| 0,054497                | 0,020163 | 0,054497                | 0,017442 |
| 0,03806                 | 0,015203 | 0,03806                 | 0,011726 |
| 0,024472                | 0,010243 | 0,024472                | 0,006011 |
| 0,013815                | 0,005283 | 0,013815                | 0        |
| 0,006156                | 0        | 0,006156                | -0,00203 |
| 0,001541                | -0,00333 | 0,001541                | -0,00406 |
| 0                       | -0,00665 | 0                       | -0,00609 |
| 0,003541                | -0,0102  | 0,003541                | -0,00704 |

| $\alpha=10^\circ$ 40m/s |          |
|-------------------------|----------|
| 0,006156                | -0,01376 |
| 0,013815                | -0,01731 |
| 0,024472                | -0,02086 |
| 0,03806                 | -0,02441 |
| 0,054497                | -0,02797 |
| 0,07368                 | -0,03152 |
| 0,095492                | -0,03507 |
| 0,119797                | -0,03863 |
| 0,146447                | -0,04218 |
| 0,175276                | -0,04573 |
| 0,206107                | -0,04929 |
| 0,238751                | -0,05284 |
| 0,263005                | -0,05639 |
| 0,308658                | -0,05984 |
| 0,345492                | -0,0573  |
| 0,383277                | -0,05476 |
| 0,421783                | -0,05222 |
| 0,46077                 | -0,04968 |
| 0,5                     | -0,04714 |
| 0,53923                 | -0,0446  |
| 0,578217                | -0,04205 |
| 0,616723                | -0,03951 |
| 0,654508                | -0,03697 |
| 0,691342                | -0,03443 |
| 0,726995                | -0,03189 |
| 0,761249                | -0,02935 |
| 0,793893                | -0,02681 |
| 0,824724                | -0,02427 |
| 0,853553                | -0,02173 |
| 0,880203                | -0,01919 |
| 0,904508                | -0,01664 |
| 0,92632                 | -0,0141  |
| 0,945503                | -0,01156 |
| 0,96194                 | -0,00902 |
| 0,975528                | -0,00648 |
| 0,986185                | -0,00394 |
| 0,993844                | -0,0014  |
| 0,996478                | 0        |

| $\alpha=10^\circ$ 50m/s |          |
|-------------------------|----------|
| 0,006156                | -0,00938 |
| 0,013815                | -0,01172 |
| 0,024472                | -0,01406 |
| 0,03806                 | -0,01639 |
| 0,054497                | -0,01873 |
| 0,07368                 | -0,02107 |
| 0,095492                | -0,02341 |
| 0,119797                | -0,02574 |
| 0,146447                | -0,02808 |
| 0,175276                | -0,03042 |
| 0,206107                | -0,03276 |
| 0,238751                | -0,0351  |
| 0,263005                | -0,03743 |
| 0,308658                | -0,03989 |
| 0,345492                | -0,03819 |
| 0,383277                | -0,03649 |
| 0,421783                | -0,03478 |
| 0,46077                 | -0,03308 |
| 0,5                     | -0,03137 |
| 0,53923                 | -0,02967 |
| 0,578217                | -0,02797 |
| 0,616723                | -0,02626 |
| 0,654508                | -0,02456 |
| 0,691342                | -0,02285 |
| 0,726995                | -0,02115 |
| 0,761249                | -0,01945 |
| 0,793893                | -0,01774 |
| 0,824724                | -0,01604 |
| 0,853553                | -0,01433 |
| 0,880203                | -0,01263 |
| 0,904508                | -0,01093 |
| 0,92632                 | -0,00922 |
| 0,945503                | -0,00752 |
| 0,96194                 | -0,00581 |
| 0,975528                | -0,00411 |
| 0,986185                | -0,00241 |
| 0,993844                | -0,0007  |
| 0,996478                | 0        |