



**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ KONTROLÜNE YÖNELİK OLARAK  
SENTETİK JET KULLANIMININ KANAT ÜZERİNDEKİ AKIŞA  
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Veli AŞICI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2019**

Veli AŞICI tarafından hazırlanan “İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ KONTROLÜNE YÖNELİK OLARAK SENTETİK JET KULLANIMININ KANAT ÜZERİNDEKİ AKIŞA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

**Başkan:** Prof. Dr. Selin ARADAĞ ÇELEBİOĞLU

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, TOBB Üniversitesi

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

.....

**Üye:** Doç. Dr. Oğuz TURGUT

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 16/09/2019

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

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

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

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

Veli AŞICI

16/09/2019

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ KONTROLÜNE YÖNELİK OLARAK SENTETİK  
JET KULLANIMININ KANAT ÜZERİNDEKİ AKIŞA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI  
(Yüksek Lisans Tezi)

Veli AŞICI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Eylül 2019

ÖZET

Bu çalışmada, bir insansız hava aracına ait salınımlı ve sabit NACA 0012 kanat profili üzerine yerleştirilen sentetik jet uygulaması ile aerodinamik katsayılar, akış karakteristikleri ve kanat kararlılığı hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodu kullanılarak incelenmiştir. Akış analizleri, sonlu hacimler yöntemi kullanan zamana bağlı Navier-Stokes çözücü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kanat üzerindeki akış,  $5 \times 10^5$  Reynolds sayısında,  $k-\omega$  SST türbülans modeli kullanılarak incelenmiştir. Sentetik jet, kanat hücum kenarından %2,5 giriş boyu uzaklıkta kanat yüzeyi üzerine yerleştirilmiştir. Jet geometrisi, genişliği %0,5 giriş boyunda ve derinliği %1,0 giriş boyunda olacak şekilde kanat yüzeyi üzerinde oluşturulmuştur. Akış denklemlerinin zamana bağlı çözümü, çözüm süresini kısaltmak amacıyla, zamandan bağımsız çözümlerin başlangıç şartı olarak kullanılması ile elde edilmiştir. Analizlerde boyutsuz sentetik jet hızı ve sentetik jet frekansı parametrik olarak incelenmiştir. Bu parametrelerin kaldırma katsayısı, sürüklenme katsayısı, moment katsayısına etkileri ve bu değerlerin salınımları incelenerek en iyi parametre aralıkları elde edilmiştir. Bu çalışmada incelenen parametre aralıklarındaki en etkili boyutsuz jet frekansı değeri ve en etkili boyutsuz jet hız değeri 2,0 olarak elde edilmiştir. Jet hızının, 2,0-4,0 aralığında, salınım frekansının etkisi altında kaldığı ortaya çıkmıştır. En etkili indirgenmiş salınım frekansının 1,0 olduğu tespit edilmiştir. En yüksek kaldırma katsayısı, jet frekans değerinin 2, Jet genliğinin 0,5 ve kanat indirgenmiş salınımlarının 1 olduğu durumda elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 93107  
Anahtar Kelimeler : İnsansız hava aracı, sentetik jet, kanat üzerinde akış, salınımlı kanat  
Sayfa Adedi : 165  
Danışman : Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SYNTHETIC JET USE ON WING FLOW FOR  
CONTROL OF UNMANNED AIRCRAFT

(M. Sc. Thesis)

Veli AŞICI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

SEPTEMBER 2019

ABSTRACT

In this study, aerodynamic coefficients, flow characteristics and wing stability are investigated by using computational fluid dynamics code with synthetic jet application placed on oscillating and fixed NACA 0012 wing profile of an unmanned air vehicle. Flow analyzes were performed using the time-dependent Navier-Stokes solvent using the finite volumes method. Flow over airfoil was investigated at Reynolds number of  $5 \times 10^5$  and  $k-\omega$  SST turbulence model. Synthetic jet was placed on the surface of wing at a distance of 2.5 % chord length away from the leading edge. The geometry of the jet was created on the surface of the wing at a width of 0.5% chord length and depth of 1.0 % chord length. Time dependent solutions of the flow equations were obtained using time independent solutions as initial condition to shorten the solution time. In the analyses, the dimensionless synthetic jet velocity and dimensionless synthetic jet frequency were examined parametrically. The effect of jet parameters on the lift coefficient, drag coefficient and moment coefficient, and the oscillations of these parameters were examined and the best parameter ranges were determined. The most effective dimensionless jet frequency value and the most effective dimensionless jet speed were obtained as 2.0 in the range of parameters investigated. Jet speed was found to be under the influence of jet frequency in the range of jet velocities of 2 and 4. The value of the most effective reduced oscillation frequency was determined as 1.0. The highest lift coefficient was obtained at the value of jet frequency of 2, jet amplitude of 0.5 and the reduced frequency of the oscillating wing of 1.

Science Code : 93107

Key Words : Unmanned aerial vehicle, synthetic jet, flow over wing, pitching airfoil

Page Number : 165

Supervisor : Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca yardımları ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU'na, Araştırma görevlisi Yüksek Makine Mühendisi Murat ERBAŞ'a, Özgün GÜNAY 'a, Ahmet Kutalmış ODABAŞ 'a, Çağlar AKKAYA ' ya ve her türlü desteklerini esirgemeyen aileme ve iş arkadaşlarıma teşekkürlerimi borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

|                                                         | Sayfa |
|---------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                              | iv    |
| ABSTRACT.....                                           | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                           | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                       | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                               | x     |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                 | xii   |
| SİMGELER ve KISALTMALAR .....                           | xix   |
| 1. GİRİŞ.....                                           | 1     |
| 2. PROBLEM TANIMI.....                                  | 5     |
| 2.1. Geometrik Veriler .....                            | 5     |
| 2.1.1. Jet geometrisi.....                              | 5     |
| 2.1.2. Kanat geometrisi.....                            | 6     |
| 2.1.3. Çözüm alanı.....                                 | 6     |
| 2.2. Giriş Şartları .....                               | 7     |
| 2.3. Analiz Parametreleri.....                          | 8     |
| 2.3.1. Kanat salınımı parametreleri .....               | 8     |
| 2.4. İncelenecek Durumlar .....                         | 9     |
| 2.5. Akış Çözüm Alanı.....                              | 10    |
| 2.6. Çalışmanın Motivasyonu .....                       | 10    |
| 3. AKTİF AKIŞ KONTROLÜ ve LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....   | 11    |
| 3.1. Aktif Akış Kontrolü .....                          | 11    |
| 3.2. Literatür Araştırması .....                        | 14    |
| 4. MATEMATİKSEL MODEL VE AĞ YAPININ OLUŞTURULMASI ..... | 23    |
| 4.1. Giriş.....                                         | 23    |

|                                                                                             | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 4.2. Model Denklemleri .....                                                                | 23           |
| 4.2.1. Türbülanslı akış ve türbülans modelleri .....                                        | 24           |
| 4.3. Çözüm Alanı Ağ Yapısı ve Sınır Şartları.....                                           | 30           |
| 4.3.1. Çözüm alanı ağ yapısı .....                                                          | 30           |
| 4.3.2. Ağ yapısından bağımsızlık .....                                                      | 31           |
| 4.3.3. Sınır şartları .....                                                                 | 32           |
| 4.4. UDF Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon .....                                                  | 38           |
| 5. SAYISAL SONUÇLARIN DOĞRULANMASI .....                                                    | 39           |
| 5.1. HAD Modelinin Doğrulanması.....                                                        | 39           |
| 5.1.1. Salınımsız kanat üzerindeki akış doğrulama analizleri .....                          | 39           |
| 5.1.2. Salınlı kanat üzerindeki akış doğrulama analizleri .....                             | 42           |
| 5.1.3. Sentetik jet uygulanmış kanat üzerindeki akış doğrulama analizleri .....             | 43           |
| 6. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI .....                                                           | 47           |
| 6.1. Giriş.....                                                                             | 47           |
| 6.2. Jet Hızının Etkisi .....                                                               | 50           |
| 6.3. Jet Frekansının Etkisi .....                                                           | 108          |
| 6.4. Kanat Salınımının Etkisi .....                                                         | 133          |
| 6.5. Diğer İncelenen Durumlar.....                                                          | 148          |
| 6.5.1. Sabit hücum açısında sentetik jet uygulaması .....                                   | 148          |
| 6.5.2. Salınlı kanatta sentetik jet etkileri .....                                          | 149          |
| 6.5.3. Reynolds sayısının sentetik jetli kanat aerodinamik katsayıları üzerine etkisi ..... | 151          |
| 7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME .....                                                          | 155          |
| KAYNAKLAR .....                                                                             | 159          |
| EKLER .....                                                                                 | 163          |
| EK-1. Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon .....                                                     | 164          |
|                                                                                             | <b>Sayfa</b> |

|                |     |
|----------------|-----|
| ÖZGEÇMİŞ ..... | 165 |
|----------------|-----|

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                            | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1 Sentetik jet geometrik veriler.....                                                    | 5     |
| Çizelge 2.2. Giriş şartları .....                                                                  | 8     |
| Çizelge 2.3. Kanat salınım parametreleri.....                                                      | 8     |
| Çizelge 2.4. Sentetik jet parametreleri .....                                                      | 8     |
| Çizelge 2.5. Sentetik jet ve kanat parametre tanımları .....                                       | 9     |
| Çizelge 2.6. Sentetik jet ve kanat parametre değerleri.....                                        | 9     |
| Çizelge 4.1. Çözüm alanı element ve nokta sayısı.....                                              | 32    |
| Çizelge 4.2. Çözüm alanı sınır şartları.....                                                       | 36    |
| Çizelge 4.3. Sentetik jet sınır şartları .....                                                     | 36    |
| Çizelge 5.1. Deneysel ve analiz sonuçların karşılaştırma tablosu .....                             | 41    |
| Çizelge 5.2. Luo D.H. sonuçları ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....                     | 45    |
| Çizelge 6.1. Parametrik boyutsuz değerler ve gerçek değerler.....                                  | 49    |
| Çizelge 6.2. $f_e^+=0,5$ için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları .....     | 51    |
| Çizelge 6.3. $f_e^+=0,5$ için $U_J^+$ değer aralıkları ve $C_L$ üzerine baskın etkiler .....       | 52    |
| Çizelge 6.4. $f_e^+=0,5$ için analiz parametreleri ve salınım hareketinin katsayı sonuçları.       | 60    |
| Çizelge 6.5. $f_e^+=1,0$ için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları .....     | 66    |
| Çizelge 6.6. $f_e^+=1,0$ için $U_J^+$ değer aralıkları ve $C_L$ üzerine baskın tepkileri .....     | 67    |
| Çizelge 6.7. $f_e^+=1,0$ için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları .....     | 69    |
| Çizelge 6.8. $f_e^+=1,5$ için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları .....     | 81    |
| Çizelge 6.9. $f_e^+=1,5$ için $U_J^+$ değer aralıkları ve $C_L$ üzerine baskın parametreler .....  | 81    |
| Çizelge 6.10. $f_e^+=1,5$ için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları ...      | 83    |
| Çizelge 6.11. $f_e^+=2,0$ için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları ...      | 99    |
| Çizelge 6.12. $f_e^+=2,0$ için $U_J^+$ değer aralıkları ve $C_L$ üzerine baskın parametreler ..... | 99    |
| Çizelge 6.13. $f_e^+=2,0$ için analiz parametreleri ve salınım hareketin katsayı sonuçları..       | 101   |

| <b>Çizelge</b>                                                                                     | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 6.14, $f_e^+=3,0$ için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları ...      | 103          |
| Çizelge 6.15. $f_e^+=3,0$ için $U_J^+$ değer aralıkları ve $C_L$ üzerine baskın parametreler ..... | 104          |
| Çizelge 6.16. $f_e^+=3,0$ için analiz parametreleri ve salınım hareketi katsayı sonuçları....      | 106          |
| Çizelge 6.17. Farklı kanat salınımlarında kaldırma katsayıları .....                               | 112          |
| Çizelge 6.18. $f_e^+=1,5$ için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları ...      | 118          |
| Çizelge 6.19. Fourier dönüşümü yapılan analizlerin parametreleri .....                             | 140          |
| Çizelge 6.20. Reynolds sayısı karşılaştırma analizleri katsayı sonuçları.....                      | 152          |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                             | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1.1. Sentetik jet çeşitleri.....                                                            | 2     |
| Şekil 2.1 NACA 0012 kanat profili .....                                                           | 6     |
| Şekil 2.2. Çözüm alanı, (a) O-tipi akış alanı, (b) sentetik jet bölgesi detay görünümü ..         | 7     |
| Şekil 3.1. Sentetik jet .....                                                                     | 12    |
| Şekil 3.2. Kanat üzeri sıralı jet yerleşimi .....                                                 | 13    |
| Şekil 4.1 Çözüm alanı .....                                                                       | 30    |
| Şekil 4.2. Sürüklenme katsayısının hücre sayısına göre değişimi .....                             | 31    |
| Şekil 4.3. Çözüm alanı ağ yapısı.....                                                             | 33    |
| Şekil 4.4. Dinamik alan ağ yapısı .....                                                           | 34    |
| Şekil 4.5. Kanat etrafında yoğunlaştırılmış ağ yapısı .....                                       | 35    |
| Şekil 4.6. Sentetik jet sıklaştırılmış ağ yapısı-1 .....                                          | 35    |
| Şekil 4.7. Sentetik jet sıklaştırılmış ağ yapısı-2.....                                           | 36    |
| Şekil 4.8. (a) Çözüm bölgesi sınır şartları (b) Sentetik jet sınır şartları.....                  | 37    |
| Şekil 5.1. Analiz ve deneysel sürüklenme katsayıları karşılaştırması .....                        | 41    |
| Şekil 5.2. Sürüklenme katsayılarının hücum açısına göre değişimi .....                            | 42    |
| Şekil 6.1. $f_e^+=0,5$ için yukarı yönlü harekette $C_L/C_D$ karşılaştırmaları .....              | 53    |
| Şekil 6.2. $f_e^+=0,5$ için yukarı yönlü harekette $C_L$ karşılaştırmaları.....                   | 53    |
| Şekil 6.3. $f_e^+=0,5$ için yukarı yönlü harekette $C_D$ karşılaştırmaları .....                  | 54    |
| Şekil 6.4. Analiz çalışmasının ve deneyin moment katsayılarının karşılaştırılması.....            | 55    |
| Şekil 6.5. Hücum açısı $\alpha=18,32^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri.....     | 56    |
| Şekil 6.6. Hücum açısı $\alpha=20,26^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri.....     | 56    |
| Şekil 6.7. Hücum açısı $\alpha=21,92^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri.....     | 57    |
| Şekil 6.8. Hücum açısı $\alpha=18,32^\circ$ için yukarı harekette üst-alt basınç dağılımları..... | 58    |
| Şekil 6.9. Hücum açısı $\alpha=20,26^\circ$ için yukarı harekette üst-alt basınç dağılımları..... | 58    |

| Şekil                                                                                              | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 6.10. Hücüm açısı $\alpha=21,92^\circ$ için yukarı harekette üst-alt basınç dağılımları..... | 59    |
| Şekil 6.11. Hücüm açısı $\alpha=18,32^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....         | 61    |
| Şekil 6.12. Hücüm açısı $\alpha=20,26^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....         | 61    |
| Şekil 6.13. Hücüm açısı $\alpha=21,92^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....         | 62    |
| Şekil 6.14. $f_e^+=0,5$ için döngüsel harekette $C_L/C_D$ karşılaştırmaları.....                   | 62    |
| Şekil 6.15. $f_e^+=0,5$ için döngüsel harekette $C_L$ karşılaştırmaları.....                       | 63    |
| Şekil 6.16. $f_e^+=0,5$ için döngüsel harekette $C_D$ karşılaştırmaları .....                      | 63    |
| Şekil 6.17. Hücüm açısı $\alpha=18^\circ$ için yukarı harekette hız dağılımları .....              | 64    |
| Şekil 6.18. Hücüm açısı $\alpha=19,98^\circ$ için yukarı harekette hız dağılımları .....           | 64    |
| Şekil 6.19. Hücüm açısı $\alpha=21,99^\circ$ için yukarı harekette hız dağılımları .....           | 65    |
| Şekil 6.20 Hücüm açısı $\alpha=19,98^\circ$ için aşağı harekette hız dağılımları .....             | 65    |
| Şekil 6.21. Hücüm açısı $\alpha=17,99^\circ$ için aşağı harekette hız dağılımları .....            | 66    |
| Şekil 6.22. $f_e^+=1,0$ için yukarı yönlü harekette $C_L/C_D$ karşılaştırmaları .....              | 67    |
| Şekil 6.23. $f_e^+=1,0$ için yukarı yönlü harekette $C_L$ karşılaştırmaları.....                   | 68    |
| Şekil 6.24. $f_e^+=1,0$ için yukarı yönlü harekette $C_D$ karşılaştırmaları .....                  | 68    |
| Şekil 6.25. $f_e^+=1,0$ için salınım hareketinde $C_L/C_D$ karşılaştırmaları .....                 | 69    |
| Şekil 6.26. $f_e^+=1,0$ için salınım hareketinde $C_L$ karşılaştırmaları .....                     | 70    |
| Şekil 6.27. $f_e^+=1,0$ için salınım hareketinde $C_D$ karşılaştırmaları .....                     | 70    |
| Şekil 6.28. Analiz çalışmasının ve deneyin moment katsayılarının karşılaştırılması.....            | 71    |
| Şekil 6.29. Hücüm açısı $\alpha=14^\circ$ için yukarı harekette hız dağılımları .....              | 71    |
| Şekil 6.30. Hücüm açısı $\alpha=16^\circ$ için yukarı harekette hız dağılımları .....              | 72    |
| Şekil 6.31. Hücüm açısı $\alpha=18^\circ$ için yukarı harekette hız dağılımları .....              | 72    |
| Şekil 6.32. Hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için yukarı harekette hız dağılımları .....              | 73    |
| Şekil 6.33. Hücüm açısı $\alpha=22^\circ$ için yukarı harekette hız dağılımları .....              | 73    |
| Şekil 6.34. Hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için aşağı harekette hız dağılımları .....               | 74    |
| Şekil 6.35. Hücüm açısı $\alpha=18^\circ$ için yukarı harekette hız dağılımları .....              | 74    |

| Şekil                                                                                       | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 6.36. Hücüm açısı $\alpha=16^\circ$ için yukarı harekette hız dağılımları .....       | 75    |
| Şekil 6.37. Hücüm açısı $\alpha=22^\circ$ için yukarı harekette hız dağılımları .....       | 75    |
| Şekil 6.38. Hücüm açısı $\alpha=14^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....     | 76    |
| Şekil 6.39. Hücüm açısı $\alpha=16^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....     | 77    |
| Şekil 6.40. Hücüm açısı $\alpha=18^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....     | 77    |
| Şekil 6.41. Hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....     | 78    |
| Şekil 6.42. Hücüm açısı $\alpha=22^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....     | 78    |
| Şekil 6.43. Hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için aşağı harekette girdap dağılımları.....      | 79    |
| Şekil 6.44. Hücüm açısı $\alpha=18^\circ$ için aşağı harekette girdap dağılımları.....      | 79    |
| Şekil 6.45. Hücüm açısı $\alpha=16^\circ$ için aşağı harekette girdap dağılımları.....      | 80    |
| Şekil 6.46. Hücüm açısı $\alpha=14^\circ$ için aşağı harekette girdap dağılımları.....      | 80    |
| Şekil 6.47. $f_e^+=1,5$ için yukarı hareketinde $C_L/C_D$ karşılaştırmaları .....           | 82    |
| Şekil 6.48. $f_e^+=1,5$ için yukarı yönlü hareketinde $C_L$ karşılaştırmaları.....          | 82    |
| Şekil 6.49. $f_e^+=1,5$ için yukarı yönlü hareketinde $C_D$ karşılaştırmaları .....         | 83    |
| Şekil 6.50. $f_e^+=1,5$ için salınım hareketinde $C_L/C_D$ karşılaştırmaları .....          | 84    |
| Şekil 6.51. $f_e^+=1,5$ için salınım hareketinde $C_L$ karşılaştırmaları .....              | 84    |
| Şekil 6.52. $f_e^+=1,5$ için salınım hareketinde $C_D$ karşılaştırmaları .....              | 85    |
| Şekil 6.53. Hücüm açısı $\alpha=14^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 86    |
| Şekil 6.54. Hücüm açısı $\alpha=16^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 86    |
| Şekil 6.55. Hücüm açısı $\alpha=18^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 87    |
| Şekil 6.56. Hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 87    |
| Şekil 6.57. Hücüm açısı $\alpha=22^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 88    |
| Şekil 6.58. Hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için aşağı harekette serbest akış çizgileri.....  | 88    |
| Şekil 6.59. Hücüm açısı $\alpha=18^\circ$ için aşağı harekette serbest akış çizgileri.....  | 89    |
| Şekil 6.60. Hücüm açısı $\alpha=16^\circ$ için aşağı harekette serbest akış çizgileri.....  | 89    |
| Şekil 6.61. Hücüm açısı $\alpha=14^\circ$ için aşağı harekette serbest akış çizgileri.....  | 90    |

| Şekil                                                                                              | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 6.62. Hücüm açısı $\alpha=14^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....            | 91    |
| Şekil 6.63. Hücüm açısı $\alpha=16^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....            | 91    |
| Şekil 6.64. Hücüm açısı $\alpha=18^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....            | 92    |
| Şekil 6.65. Hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....            | 92    |
| Şekil 6.66. Hücüm açısı $\alpha=22^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....            | 93    |
| Şekil 6.67. Hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için aşağı harekette girdap dağılımları.....             | 93    |
| Şekil 6.68. Hücüm açısı $\alpha=18^\circ$ için aşağı harekette girdap dağılımları.....             | 94    |
| Şekil 6.69. Hücüm açısı $\alpha=16^\circ$ için aşağı harekette girdap dağılımları.....             | 94    |
| Şekil 6.70. Hücüm açısı $\alpha=14^\circ$ için aşağı harekette girdap dağılımları.....             | 95    |
| Şekil 6.71. Jetsiz durumda hücüm açısı $\alpha=14^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları  | 96    |
| Şekil 6.72. Jetsiz durumda hücüm açısı $\alpha=16^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları  | 96    |
| Şekil 6.73. Jetsiz durumda hücüm açısı $\alpha=18^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları  | 97    |
| Şekil 6.74. Jetsiz durumda hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları  | 97    |
| Şekil 6.75. Jetsiz durumda hücüm açısı $\alpha=22^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları  | 98    |
| Şekil 6.76. Jetsiz durumda hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için aşağı harekette girdap dağılımları . | 98    |
| Şekil 6.77. $f_e^+=2,0$ için yukarı yönlü harekette $C_L/C_D$ karşılaştırmaları .....              | 100   |
| Şekil 6.78. $f_e^+=2,0$ için yukarı yönlü harekette $C_L$ karşılaştırmaları.....                   | 100   |
| Şekil 6.79. $f_e^+=2,0$ için yukarı yönlü harekette $C_D$ karşılaştırmaları .....                  | 101   |
| Şekil 6.80. $f_e^+=2,0$ için salınım hareketinde $C_L/C_D$ karşılaştırmaları .....                 | 102   |
| Şekil 6.81. $f_e^+=2,0$ için salınım hareketinde $C_L$ karşılaştırmaları .....                     | 102   |
| Şekil 6.82. $f_e^+=2,0$ için salınım hareketinde $C_D$ karşılaştırmaları .....                     | 103   |
| Şekil 6.83. $f_e^+=3,0$ için yukarı yönlü hareketinde $C_L/C_D$ karşılaştırmaları .....            | 104   |
| Şekil 6.84. $f_e^+=3,0$ için yukarı yönlü hareketinde $C_L$ karşılaştırmaları.....                 | 105   |
| Şekil 6.85. $f_e^+=3,0$ için yukarı yönlü hareketinde $C_D$ karşılaştırmaları .....                | 105   |
| Şekil 6.86. $f_e^+=3,0$ için salınım hareketinde $C_L/C_D$ karşılaştırmaları .....                 | 106   |
| Şekil 6.87. $f_e^+=3,0$ için salınım hareketinde $C_L$ karşılaştırmaları .....                     | 107   |

| Şekil                                                                                        | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 6.88. $f_e^+=3,0$ için salınım hareketinde $C_D$ karşılaştırmaları .....               | 107   |
| Şekil 6.89. Analiz çalışmasının ve deneyin moment katsayılarının karşılaştırılması.....      | 108   |
| Şekil 6.90. $C_L$ ve boyutsuz zaman grafiği.....                                             | 111   |
| Şekil 6.91. Hücum açısı $\alpha=14^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri.....  | 113   |
| Şekil 6.92. Hücum açısı $\alpha=16^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri.....  | 114   |
| Şekil 6.93. Hücum açısı $\alpha=18^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri.....  | 114   |
| Şekil 6.94. Hücum açısı $\alpha=20^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri.....  | 115   |
| Şekil 6.95. Salınım hareketi anlık serbest akış çizgileri, Analiz-9, $22^\circ$ yukarı ..... | 115   |
| Şekil 6.96. Hücum açısı $\alpha=20^\circ$ için aşağı harekette serbest akış çizgileri.....   | 116   |
| Şekil 6.97. Hücum açısı $\alpha=18^\circ$ için aşağı harekette serbest akış çizgileri.....   | 116   |
| Şekil 6.98. Hücum açısı $\alpha=14^\circ$ için aşağı harekette serbest akış çizgileri.....   | 117   |
| Şekil 6.99. Hücum açısı $\alpha=14^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri.....  | 119   |
| Şekil 6.100. Hücum açısı $\alpha=16^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 119   |
| Şekil 6.101. Hücum açısı $\alpha=18^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 120   |
| Şekil 6.102. Hücum açısı $\alpha=20^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 120   |
| Şekil 6.103. Hücum açısı $\alpha=22^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 121   |
| Şekil 6.104. Hücum açısı $\alpha=20^\circ$ için aşağı harekette serbest akış çizgileri.....  | 121   |
| Şekil 6.105. Hücum açısı $\alpha=18^\circ$ için aşağı harekette serbest akış çizgileri.....  | 122   |
| Şekil 6.106. Hücum açısı $\alpha=16^\circ$ için aşağı harekette serbest akış çizgileri.....  | 122   |
| Şekil 6.107. Hücum açısı $\alpha=14^\circ$ için aşağı harekette serbest akış çizgileri.....  | 123   |
| Şekil 6.108. Hücum açısı $\alpha=14^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....     | 124   |
| Şekil 6.109. Hücum açısı $\alpha=16^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....     | 124   |
| Şekil 6.110. Hücum açısı $\alpha=18^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....     | 125   |
| Şekil 6.111. Hücum açısı $\alpha=20^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....     | 125   |
| Şekil 6.112. Hücum açısı $\alpha=22^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....     | 126   |
| Şekil 6.113. Hücum açısı $\alpha=20^\circ$ için aşağı harekette girdap dağılımları.....      | 126   |

| <b>Şekil</b>                                                                                 | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 6.114. Hücüm açısı $\alpha=18^\circ$ için aşağı harekette girdap dağılımları.....      | 127          |
| Şekil 6.115. Hücüm açısı $\alpha=16^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....     | 127          |
| Şekil 6.116. Hücüm açısı $\alpha=14^\circ$ için yukarı harekette girdap dağılımları.....     | 128          |
| Şekil 6.117. Hücüm açısı $\alpha=14^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 129          |
| Şekil 6.118. Hücüm açısı $\alpha=16^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 129          |
| Şekil 6.119. Hücüm açısı $\alpha=18^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 130          |
| Şekil 6.120. Hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 130          |
| Şekil 6.121. Hücüm açısı $\alpha=22^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 131          |
| Şekil 6.122. Hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için aşağı harekette serbest akış çizgileri.....  | 131          |
| Şekil 6.123. Hücüm açısı $\alpha=18^\circ$ için aşağı harekette serbest akış çizgileri.....  | 132          |
| Şekil 6.124. Hücüm açısı $\alpha=16^\circ$ için aşağı harekette serbest akış çizgileri.....  | 132          |
| Şekil 6.125. Kanat profili yunuslama salınım hareketi.....                                   | 133          |
| Şekil 6.126. Hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 135          |
| Şekil 6.127. Hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 135          |
| Şekil 6.128. Hücüm açısı $\alpha=22^\circ$ için yukarı harekette serbest akış çizgileri..... | 136          |
| Şekil 6.129. Hücüm açısı $\alpha=18^\circ$ için yukarı harekette hız dağılımları .....       | 136          |
| Şekil 6.130. Hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ için yukarı harekette hız dağılımları .....       | 137          |
| Şekil 6.131. Hücüm açısı $\alpha=22^\circ$ için yukarı harekette hız dağılımları .....       | 137          |
| Şekil 6.132. Farklı hücüm açıları için $C_L$ karşılaştırma grafiği .....                     | 138          |
| Şekil 6.133. Farklı hücüm açıları için $C_D$ karşılaştırma grafiği .....                     | 138          |
| Şekil 6.134. Farklı hücüm açıları için $C_L/ C_D$ karşılaştırma grafiği .....                | 139          |
| Şekil 6.135. Salınım hareketinde kaldırma katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği .....        | 140          |
| Şekil 6.136. Salınım hareketinde sürüklenme katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği ..         | 141          |
| Şekil 6.137. Salınım hareketinde momentum katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği ..           | 141          |
| Şekil 6.138. Bağlı titreşim şiddeti karşılaştırma grafiği .....                              | 142          |
| Şekil 6.139. Salınım hareketinde kaldırma katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği .....        | 142          |

| <b>Şekil</b>                                                                             | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 6.140. Salınım hareketinde sürüklenme katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği ..     | 143          |
| Şekil 6.141. Salınım hareketinde momentum katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği ..       | 143          |
| Şekil 6.142. Salınım hareketinde kaldırma katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği .....    | 144          |
| Şekil 6.143. Salınım hareketinde sürüklenme katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği ..     | 144          |
| Şekil 6.144. Salınım hareketinde sürüklenme katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği ..     | 145          |
| Şekil 6.145. Salınım hareketinde kaldırma katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği .....    | 145          |
| Şekil 6.146. Salınım hareketinde sürüklenme katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği ..     | 146          |
| Şekil 6.147 Salınım hareketinde momentum katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği ...       | 146          |
| Şekil 6.148. Salınım hareketinde kaldırma katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği .....    | 147          |
| Şekil 6.149. Salınım hareketinde sürüklenme katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği ..     | 147          |
| Şekil 6.150. Salınım hareketinde momentum katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği ..       | 148          |
| Şekil 6.151. Hücum açısı $20^\circ$ için kaldırma katsayısı karşılaştırmaları .....      | 149          |
| Şekil 6.152. Hücum açısı $20^\circ$ için sürüklenme katsayısı karşılaştırmaları .....    | 149          |
| Şekil 6.153. Salınımlı kanatta kaldırma katsayıları karşılaştırması .....                | 150          |
| Şekil 6.154. Salınımlı kanatta sürüklenme katsayıları karşılaştırması .....              | 150          |
| Şekil 6.155. Salınımlı kanatta kaldırma katsayıları karşılaştırması .....                | 151          |
| Şekil 6.156. Salınımlı kanatta sürüklenme katsayıları karşılaştırması .....              | 151          |
| Şekil 6.157. Farklı Reynolds sayılarında kaldırma katsayılarının karşılaştırılması.....  | 153          |
| Şekil 6.158. Farklı Reynolds sayılarında sürüklenme katsayılarının karşılaştırılması ... | 153          |
| Şekil 6.159. Farklı Reynolds sayılarında momentum katsayılarının karşılaştırılması....   | 154          |

## SİMGELER ve KISALTMALAR

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

| Simgeler                           | Açıklamalar                                            |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>b</b>                           | Sentetik jet deliğinin genişliği (m)                   |
| <b>c</b>                           | Kanat profili giriş uzunluğu (m)                       |
| <b>C<sub>D</sub></b>               | Sürüklenme katsayısı                                   |
| <b>C<sub>L</sub></b>               | Kaldırma katsayısı                                     |
| <b>C<sub>μ</sub></b>               | Jet momentum katsayısı                                 |
| <b>C<sub>p</sub></b>               | Basınç katsayısı                                       |
| <b>C<sub>L</sub>/C<sub>D</sub></b> | Kaldırma/Sürüklenme oranı                              |
| <b>D</b>                           | Sürüklenme kuvveti                                     |
| <b>I</b>                           | Türbülans yoğunluğu                                    |
| <b>L</b>                           | Kaldırma kuvveti <sub>l</sub>                          |
| <b>M<sub>∞</sub></b>               | Mach sayısı                                            |
| <b>f<sub>a</sub></b>               | Kanat salınım zorlama frekansı                         |
| <b>f<sub>e</sub></b>               | Sentetik jet aktüatörün zorlama frekansı               |
| <b>f<sub>e</sub><sup>+</sup></b>   | Bağıl zorlama frekansı, f <sub>e</sub> /f <sub>s</sub> |
| <b>f<sub>s</sub></b>               | Doğal girdap dökülme frekansı                          |
| <b>f<sub>+</sub></b>               | Boyutsuz frekans, f <sub>s</sub> c/U <sub>∞</sub>      |
| <b>p</b>                           | Statik basınç (pa)                                     |
| <b>p<sub>∞</sub></b>               | Serbest akış basıncı (Pa)                              |
| <b>q<sub>∞</sub></b>               | Dinamik basınç (Pa)                                    |
| <b>Re</b>                          | Reynolds sayısı                                        |
| <b>S</b>                           | Alan (m <sup>2</sup> )                                 |
| <b>St<sub>sina</sub></b>           | Strouhal Sayısı                                        |
| <b>t</b>                           | Zaman (s)                                              |
| <b>T<sub>w</sub></b>               | Duvar kayma gerilmesi (Pa)                             |
| <b>u<sub>i</sub></b>               | Dalgalı akış hızı bileşenleri (m/s)                    |
| <b>U<sub>i</sub></b>               | Zaman ortalama akış hızı bileşenleri (m/s)             |
| <b>U<sub>j</sub></b>               | Jet üfleme hızı (m/s)                                  |

**Simgeler****Açıklamalar**

|            |                                                                |
|------------|----------------------------------------------------------------|
| $U_j^+$    | Göreceli jet üfleme hızı, ( $U_j/U_\infty$ )                   |
| $U_\infty$ | Serbest akış hızı (m/s)                                        |
| $x_i$      | Uzay Kartezyen koordinatları                                   |
| $X$        | Kanat profilinin hücum kenarına göre akış yönündeki koordinatı |
| $y$        | Duvara göre dik uzaklık (m)                                    |
| $y^+$      | Boyutsuz duvar uzaklığı                                        |
| $\Delta t$ | Zaman adımı (s)                                                |
| $\Delta y$ | Ağ ilk noktasının kanat yüzeyine normal mesafesi (m)           |
| $u$        | X eksen yönünde hız bileşeni (m/s)                             |
| $w$        | Y eksen yönünde hız bileşeni (m/s)                             |
| $z$        | Ters yön için xxartezyen mesafesi                              |
| $\alpha$   | Hücum açıcı (Derece)                                           |
| $\gamma$   | Özgöl ısı                                                      |
| $\mu$      | Dinamik viskosite (kg/m.s)                                     |
| $\nu$      | Kinematik viskosite (m <sup>2</sup> /s)                        |
| $\rho$     | Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )                                  |
| $\alpha_a$ | Salınım genliği                                                |
| $\infty$   | Serbest değerler                                               |
| <b>jet</b> | Jet değerleri                                                  |
| <b>*</b>   | Ölçü parametreleri                                             |

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

|                |                                   |
|----------------|-----------------------------------|
| <b>2B</b>      | 2 Boyutlu                         |
| <b>3B</b>      | 3 Boyutlu                         |
| <b>AFC</b>     | Aktif Akış Kontrolü               |
| <b>CFD-HAD</b> | Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği   |
| <b>DNS</b>     | Direkt nümerik simülasyonu        |
| <b>PIV</b>     | Parça Hız Takibi                  |
| <b>PVM</b>     | Parallel Virtual Machine          |
| <b>RANS</b>    | Reynolds Ortalamalı Navier Stokes |

**Kısaltmalar****Açıklamalar****RSM**

Tepki yüzey metodolojisi

**SST**

Kayma Gerilmesi Taşınımı

**UAV**

İnsansız hava aracı

**URANS**

Kararsız Reynold Ortalamalı Navier-Stokes

**ZNMF**

Sıfır Net Kütle Akışı

## 1. GİRİŞ

Kanat üzeri akış kontrolü yapılarak aerodinamik performansın geliştirilmesi için 20. Yüzyılın başlarından itibaren yoğun çalışmalar yürütülmüştür. 1904 yılında, Prandtl sınır tabakası ve akış ayrılması kavramları tanımlamış ve silindir etrafında üfleli jetler kullanarak deneyler yapmıştır [1]. Son yıllarda, aerodinamik performansların geliştirilmesi için kanat üzeri akışların kontrollerine yönelik çalışmalar yoğunlaşmıştır. İkinci Dünya Savaşı yıllarında, askeri ihtiyaçların artışından dolayı, manevra kabiliyetini artırma, sürüklenme kuvvetini azaltma ve laminar akış kontrolüne yönelik çalışmalar artmıştır [2]. Bu çalışmalar, 90'lı yıllardan itibaren bilgisayar teknolojisinin gelişmesine paralel olarak, karmaşık akış denklemlerinin sayısal olarak çözülmesine katkı sağlamıştır.

Kanat üzeri akışlarda, sınır tabakasının kanat yüzeyinden ayrılması konusunda çok ileri gelişmeler kaydedilmiştir. Ancak, sınır tabakasının kararlılığının sağlanması önemli bir konu olarak araştırılmaya devam etmektedir. Yüksek hızlarda ve yüksek hücum açılarında sınır tabakasının kanat üzerinden ayrılması, kanat performansını düşürücü, hız kesici ve yük kapasitesini olumsuz yönde etkileyici bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu üç parametre de hem sivil hem askeri havacılık sektöründe önem arz eden alanları oluşturmaktadır.

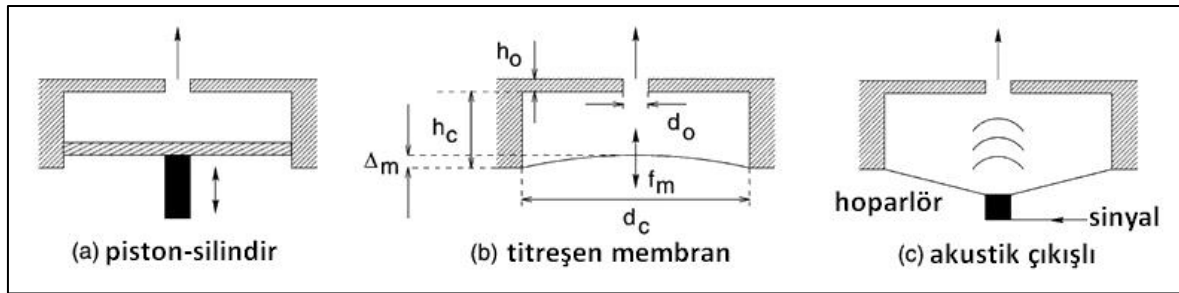
Sivil havacılık sektöründe, akış ayrılmasının geciktirilmesi ile sürüklenme kuvvetinin azalması sağlanarak yakıt tüketiminin azaltılması ve çevreye duyarlı sistemlerin kullanılması amaçlanmaktadır. Askeri havacılık sektöründe, akış ayrılmasının geciktirilmesi ve sınır tabaka kararlılığı, akış kontrol üstünlüğünün sağlanması ve manevra kabiliyetinin artırılması açısından geliştirilmeye değer konular olarak görülmektedir.

Kanat üzeri sentetik jet uygulamaları ile aktif akış kontrolü, aerodinamik katsayıların performansa olan etkilerinin araştırılması ve geliştirilmesi, bu katsayıların iyileştirilme yöntemleri kullanılarak parametreler arası etkileşimden en verimli performansın elde edilmesi açısından önem arz etmektedir. Kararsız akışlarda aktif kontrol, jetler ile bir açıklıktan yapılan dış akışlardaki dengesizliklerin giderilmesinde uygulanan yöntemleri içermektedir. Son yıllarda, insansız hava araçlarındaki gelişmelere yönelik olarak, uçuş mesafelerinin ve yük kaldırma yeteneğinin artırılması ve daha fazla manevra kabiliyetine

ulaşılması için yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır. Uluslararası ve ulusal kurumlarda bu konuda çalışmaların gelişmesi için teşvik edici çalıştaylar düzenlemektedir.

Sentetik jet, bir orifisten akışın periyodik olarak emme ve üfleme hareketi ile geçmesi sonucu oluşur. Emme ve üfleminin ardışık olarak yapıldığı durumda, birim hacimden geçen net akı sıfırlanır ve bu sırada oluşan akışkan jetine, Sıfır Net Kütle Akı (ZNMF) Jeti denilmektedir. [3]. Net akı sıfır olmakla birlikte bu olay esnasında momentum transferi söz konusudur. Oluşturulma şekillerine bağlı olarak sentetik jetler, piezo-elektrik, elektromanyetik, akustik ve mekanik (piston) teknikler ile oluşturulabilir.

Piston silindir mekanizmalı sentetik jetler, elektrik motoruna bağlı krank diskinin bir devir dönmesi ile pistonun emme ve üfleme hareketinin bir periyoduna karşılık gelmektedir. Şekil 1.1. de görüldüğü üzere krank diski üzerinde bulunan deliklere biyel kolunun bağlanması ile deliğin yarıçapında biyel kolu dönmekte ve bu dönme hareketiyle oluşan çapın uzunluğu kadar dairesel hareket doğrusal harekete dönüşerek piston stroku elde edilmektedir. Pnömatik silindirin üzerinde bulunduğu kızak mekanizması sayesinde silindirin krank diskine olan uzaklığı ayarlanabilmekte ve böylece piston silindir mekanizmasının ön ölü hacmi istenildiği şekilde değiştirilebilmektedir.



Şekil 1.1. Sentetik jet çeşitleri

Piezo-elektrik olarak elde edilen sentetik jetler, piezo-elektrik diyaframa elektrik akımı gönderildiğinde, diyafram belirli bir düzeyde hareket etmeye ve şekil değiştirmeye başlar. Şekil değiştirme işleminin süresi yani diyaframın akıma cevap süresi genellikle milisaniye düzeyinin altındadır. Salınım yapmaya başlayan diyafram kısa bir sürede havayı boşluğa çekme ve geri dışarıya gönderme işlemini yapar. Emilen tüm hava diyafram hareketiyle tekrar üflendiği için, cihazın ağız bölümünden giren ve çıkan net kütle akışı sıfırdır. Buna ek olarak diyafram, pistonla nazaran daha hafiftir ve daha az enerji ile çalışabilir.

Akustik titreşimle elde edilen sentetik jet, genellikle bir sinyal şartlandırıcıdan gönderilen sinüzoidal sinyal ile, hoparlör sisteminin frekansı ayarlanarak kontrol edilir. Böylece hacmin ortama açıldığı orifisten periyodik olarak üfleme ve emme akışı oluşturulur.

Bu tezde yapılan çalışmalar, bölümlere göre aşağıda özetlenmiştir. Giriş olarak adlandırılan birinci bölümde, akış ayrılmasının geciktirilmesi ve sınır tabaka kararlılığının önemi, uygulama alanları hakkında genel bilgiler verilerek konunun güncel durumu ortaya konulmuştur. Ayrıca, sentetik jetler ve uygulamaları hakkında genel bilgi verilmiştir. İkinci bölümde, bu çalışmada incelenecek olan problem tanıtılmış ve çalışmanın yapılmasını motive eden etmenler vurgulanmıştır. Dördüncü bölümde, problemin matematiksel formülasyonu yapılarak sınır şartları belirlenmiş ve sayısal çözüm için gerekli olan ağ yapı oluşturulmuştur.

Beşinci bölümde, modelin sayısal çözüm sonuçlarının doğruluğu deneysel verilerle karşılaştırılarak kontrol edilmiştir. Sonuç doğrulama çalışmaları hem statik ve salınlı kanat hem de sentetik jetli statik kanat için yapılmıştır. Altıncı bölümde, sayısal analiz sonuçları parametrik analiz yapılarak sunulmuştur. Öncelikle, analizi yapılacak parametreler belirlenmiştir. Bu parametrelerin analiz üzerindeki etkilerinin karşılaştırılmaları Taguchi tablosu ile yapılmıştır. Sentetik jet boyutsuz frekansı, sentetik jet boyutsuz genliği ve kanat salınımlı indirgenmiş frekansının analizler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yedinci bölümde, analiz sonuçlarının değerlendirmesi yapılarak parametrelerin kaldırma katsayısına ve sürüklenme katsayısına olan kazanımları ile kanat aerodinamik verimine olan katkıları belirlenmiştir. Parametrelerin analiz sonuçları üzerindeki etkili ve etkisiz değer aralıkları belirlenmiştir.



## 2. PROBLEM TANIMI

Bu tezin amacı, kanat profilinin uçuş esnasındaki kararlılığını sağlayacak parametre aralıklarının belirlenmesi ve kanat performansının en iyi şartlara getirilmesine yönelik olarak parametre aralıklarının belirlenmesini kapsamaktadır. Bu amaçla, NACA 0012 kanat profili geometrisinde, 2 boyutlu kararlı akış şartlarında, kanat profili üzerine sentetik jet yerleştirilmiş ve kanat profili aerodinamik merkez çevresinde yaptığı salınım hareketindeki aerodinamik etkilerini incelenmiştir. Bu çalışmada izlenecek yöntem aşağıda sunulmuştur:

1. NACA 0012 kanat profiline ait geometrinin [4] 2B çizimi ve analiz programına aktarılması,
2. Kanat profili üzerine sentetik jetlerin yerleştirilmesi,
3. Kanat performansının iyileştirilmesi ve stabilitesinin sağlanmasına yönelik parametrik çalışma: (Sentetik jet parametrelerinin belirlenmesi); sürüklenme katsayısı ve kaldırma katsayısı, akış ayrılması, serbest akış çizgileri, hız dağılımı, basınç dağılımı
  - Sentetik jet kullanılmadığı durum.
  - Sentetik jetin kullanıldığı durumlar: (a)  $18^\circ$  sabit hücum açısında (b)  $8^\circ$  salınım etkisi altında.

### 2.1. Geometrik Veriler

#### 2.1.1. Jet geometrisi

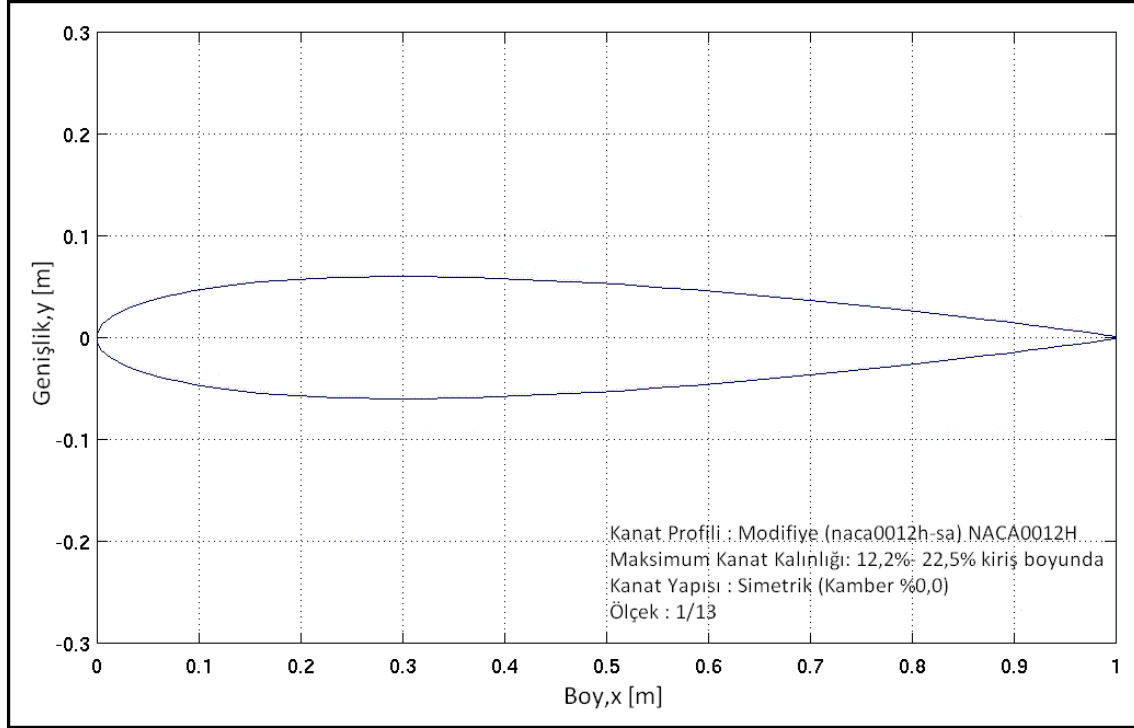
Çizelge 2.1. de boyutları verilen sentetik jet Şekil 2.2. (b) de gösterilmiştir. Boyutlar kanat giriş boyu ( $c=0,375$  m) cinsinden belirtilmiştir.

Çizelge 2.1. Sentetik jet geometrik veriler

| Jet geometri verileri | Boyutlar |
|-----------------------|----------|
| Jet genişliği         | %0,5c    |
| Jet derinliği         | %1,0c    |
| Jet konumu            | %2,5c    |

### 2.1.2. Kanat geometrisi

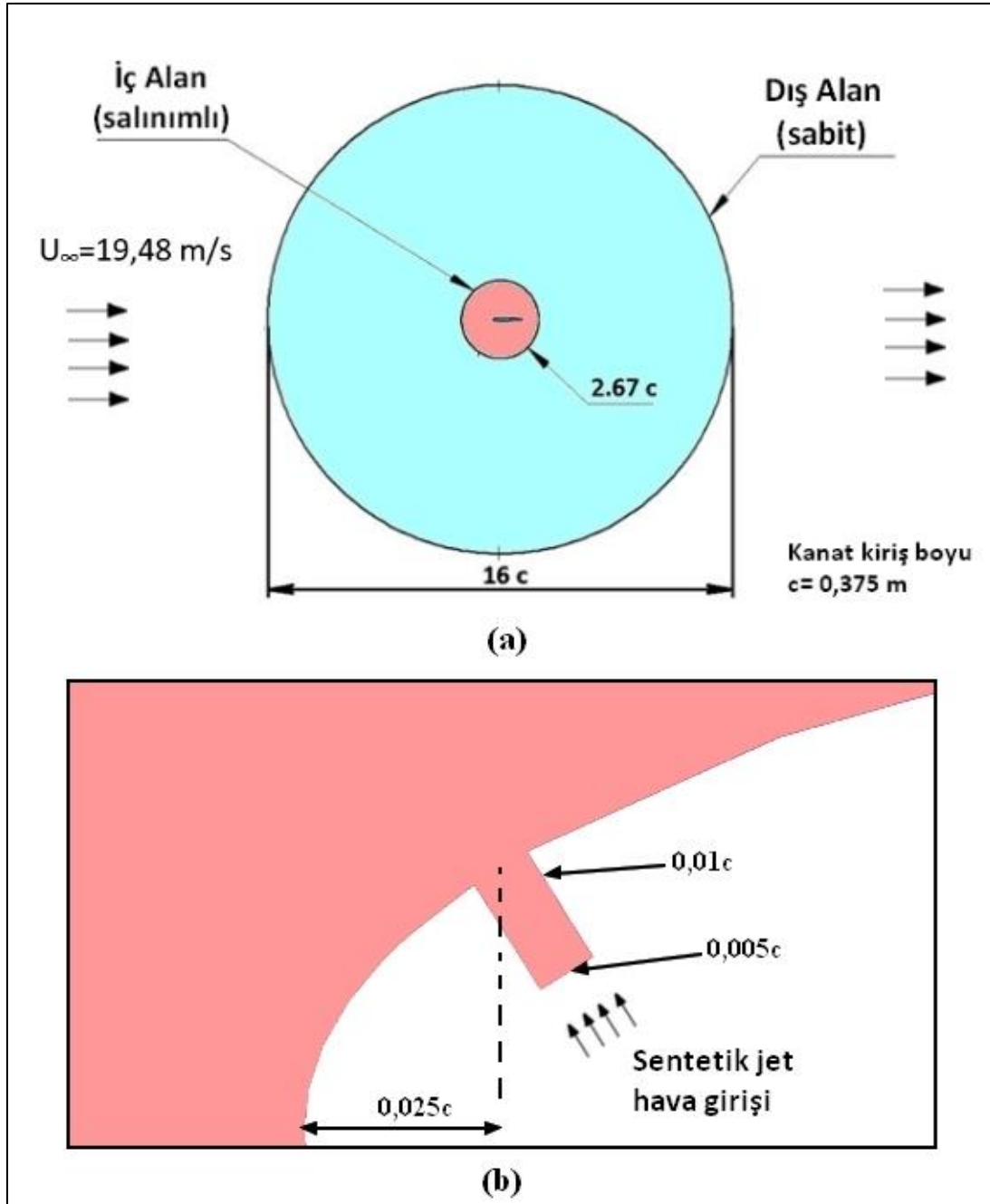
Bu çalışmada, NACA 0012 kanat profili kullanılmıştır ve şematik çizimi 1/13 ölçekli olarak Şekil 2.1. de gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kanat profilinin giriş boyu 0,375 m olarak alınmıştır.



Şekil 2.1 NACA 0012 kanat profili

### 2.1.3. Çözüm alanı

Statik çözüm alanı kanat giriş boyunun 16 katı (6 m) alınmıştır. Çözüm alanının giriş boyunun 16 katı alınması ile kanat etrafından geçen akışkanın kuyruk akışındaki sınır şartından etkilenmemesi amaçlanmıştır. Dinamik çözüm alanı, kanat giriş boyunun 2,67 katı (1 m) alınmıştır. Çözüm alanı Şekil 2.2 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Çözüm alanı, (a) O-tipi akış alanı, (b) sentetik jet bölgesi detay görünümü

## 2.2. Giriş Şartları

Akış alanı için giriş şartları Çizelge 2.2. de belirtilmiştir.

Çizelge 2.2. Giriş şartları

| Şartlar                   | Açıklamalar         |
|---------------------------|---------------------|
| Akış Giriş Hızı (Re)      | 19,48 m/s (500.000) |
| Giriş türbülans yoğunluğu | %0,5                |
| Ortam Basıncı             | 101,325 kPa         |

### 2.3. Analiz Parametreleri

Bu çalışmada, analiz parametreleri olarak, kanat salınım boyutsuz frekansı, kanat salınım genliği, boyutsuz jet frekansı ve boyutsuz jet genliği alınmıştır.

#### 2.3.1. Kanat salınımı parametreleri

Çizelge 2.3. de kanat profilinin aerodinamik merkez (Şekil 6.116) etrafındaki indirgenmiş salınım frekansı aralıkları ve salınım genlik açısı belirtilmiştir.

Çizelge 2.3. Kanat salınım parametreleri

| Kanat Salınım Parametreleri            | Aralık  |
|----------------------------------------|---------|
| Kanat salınım boyutsuz frekansı, $k$ : | 0,1-1,0 |
| Kanat salınım genliği, $\alpha_a$      | 8°      |

#### 2.3.2. Sentetik jet parametreleri

Çizelge 2.4. de hücum kenarında %2,5 kanat kiriş boyu uzaklığa tanımlanan sentetik jetin boyutsuz jet frekans aralığı ve boyutsuz jet genlik aralığı belirtilmiştir.

Çizelge 2.4. Sentetik jet parametreleri

| Sentetik Jet Parametreleri     | Aralık  |
|--------------------------------|---------|
| Boyutsuz jet frekansı, $f_e^+$ | 0,5-3,0 |
| Boyutsuz jet genliği, $U_j^+$  | 0,2-4,0 |

## 2.4. İncelenecek Durumlar

Bu çalışmada, boyutsuz jet frekansı, boyutsuz jet genliği kanat salınım frekansı ve kanat salınım genliğinin kaldırma katsayısı, sürüklenme katsayısı, basınç dağılımları, akış ayrılımlarına olan etkileri incelenecektir.

Çizelge 2.5. de analiz parametrelerinin isimleri, simgeleri, formülleri ve aralıkları verilmiştir.

Çizelge 2.5. Sentetik jet ve kanat parametre tanımları

| Boyutsuz parametreler |                              |                        |         |
|-----------------------|------------------------------|------------------------|---------|
| Sembol                | Parametre Adı                | Formül                 | Aralık  |
| $f_e^+$               | Boyutsuz jet frekansı        | $f_e/f_s$              | 0,5-3,0 |
| $U_j^+$               | Boyutsuz jet genliği         | $U_j/U_\infty$         | 0,2-4,0 |
| $k$                   | İndirgenmiş salınım frekansı | $k=\omega c/2u_\infty$ | 0,1-1,0 |

Çizelge 2.6. da sentetik jet ve kanat salınımındaki kullanılan parametre değerleri belirtilmiştir.

Çizelge 2.6. Sentetik jet ve kanat parametre değerleri

| Sentetik jet hız giriş parametreleri |         | Kanat salınım parametreleri |                        |
|--------------------------------------|---------|-----------------------------|------------------------|
| $f_e^+$                              | $U_j^+$ | $k$                         | $\alpha_a$             |
| 0,50                                 | 0,20    | 0,10                        | $18^\circ \pm 4^\circ$ |
| 1,00                                 | 0,50    | 0,15                        | $18^\circ \pm 4^\circ$ |
| 1,50                                 | 1,00    | 0,20                        | $18^\circ \pm 4^\circ$ |
| 2,00                                 | 2,00    | 0,50                        | $18^\circ \pm 4^\circ$ |
| 3,00                                 | 4,00    | 1,00                        | $18^\circ \pm 4^\circ$ |

## 2.5. Akış Çözüm Alanı

Bu çalışmada, çözüm alanı dairesel (O-tip) olarak belirlenmiştir. Statik çözüm alanı, kanat giriş boyunun 16 kat büyüklüğünde, salınım hareketinde ağ yapısının hareketli bölüm alanı 2,67 kanat girişi boyunda seçilmiştir.

Şekil 2.2. de çözüm alanı gösterilmiştir. Serbest akış hızı,  $U_{\infty}$ , 19,48 m/s ( $Re=500.000$ ) olarak alınmıştır. Serbest akış şartlarındaki havanın yoğunluğu,  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , ve viskozitesi  $1,7894 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$  olarak alınmıştır.

## 2.6. Çalışmanın Motivasyonu

Bu çalışmada motivasyon kaynağı, sentetik jet kullanımı ile farklı frekanslarda salınım yapan NACA 0012 kanat profilinin akış verimliliğinin artırılması ve kanat stabilitesinin sağlanmasının mümkün olmasıdır. Kanat profilinin akış verimliliği ve stabilitesi için;

- Kanat toplam taşıma yük kapasitesinin artırılması
- Kanat yere yaklaşım anındaki titreşim etkilerini azaltmak amacı ile aktif kontrol sağlanması
- Mevcut kanatların daha yüksek kapasitelere ulaşarak yakıt tüketimini azaltması
- Yakıt sarfiyatının azalması ile daha uzun mesafe ve fazla uçuş sürelerine ulaşılması
- Yakıt sarfiyatı ile uçuş maliyetlerinin düşürülmesi
- Yakıt sarfiyatının azalması ile daha az çevre kirliliğine imkân sağlaması

hedeflenmektedir.

### 3. AKTİF AKIŞ KONTROLÜ ve LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

#### 3.1. Aktif Akış Kontrolü

Akış kontrolü, uçak, turbo makineler ve gemi gibi mühendislik uygulamalarında kapsamlı olarak araştırılmaktadır.

Serbest jetler birçok endüstriyel uygulamalarda (pompalar ve yakıcılar), havacılık mühendisliği (jet motorları) ve daha pek çok alanda uzun bir süredir kullanılmaktadır. Bu jetlerle yapılan kontrol çalışmaları birçok sayıda araştırmanın çalışma alanı olmuştur. Bazı kontrol teknikleri (aktif veya pasif), karışımların geliştirilmesi, gürültünün azaltılması, havacılıkta itme ile yönlendirme ve laminlerden türbülanslı akışa geçişin kontrolü gibi amaçlarla geliştirilmiştir. İki baskın pasif akış kontrolü yöntemi dairesel olmayan nozülleri veya nozül çıkışında çıkıntılarının kullanımını içerir. Bu teknikler serbest kayma akışlarını değiştirmede etkili olurlar ve kalıcı olarak monte edilirler; bu yüzden, ihtiyaç olmadığında veya koşullar aniden değiştiğinde performans düşürme etkileri oluşmaktadır [5].

Aktif akış kontrolü, enerjiye ihtiyaç duyulmayan pasif akış kontrol tekniklerinden farklıdır ve ihtiyaca yönelik olarak farklı geometrik yapılara sahiptirler [6].

Sentetik jet, harici bir akışkan gerektirmez, ayrıca sıfır net akı ile momentum üretebilir. Bu nedenle, sentetik jetler ‘sıfır net kütle akış’ jeti olarak da adlandırılır. Sentetik jet, basit veya kompakt konfigürasyon yapıları, hafifliği, düşük maliyeti, uygun bakım özellikleri ile ileri derece avantaj sağlamaktadır [7].

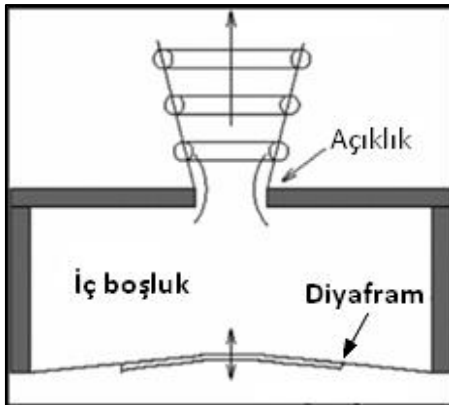
Akış kontrol yöntemlerinde pasif ve aktif yöntemler uygulanmaktadır. Vorteks üretimi, sabit üfleme veya emme özellikli cihazların kullanıldığı pasif yöntemlerin, türbülans ve dengesizliklerin olduğu daha karmaşık akış şartlarında daha sınırlı kapasitede verimler elde edilmekte ve bazen negatif etki yaratabilmektedir [3]. Aktif akış kontrollerinde, kanat profilini sanal olarak değiştirerek akış ayrılmalarının engellenmesi amaçlanmaktadır. Bu sistemlerde, emme ve üfleme için güç gereksiniminin yanı sıra bölgeye uygulanması için geniş hacimlere ihtiyaç duymaktadır [8].

Aktif akış kontrol teknikleri arasında sürekli üfleme kontrol jetleri, salınlımlı sınırlar, akustik çalıştırma ve sentetik jetler bulunur [8]. Dış akış için en etkili kontrol tekniklerinden biri olan sentetik jet, akış ayrımını ertelenmesi, ısı transferini geliştirilmesi, sürtünmenin azaltılması, laminar akıştan türbülanslı akışa geçişin ertelenmesinde ve gürültü berterafında kullanılmaktadır [7].

Akış kontrol stratejilerinin uygulanmasıyla, kaldırma, sürüklenme veya salınım momenti gibi kanat profili karakteristik özellikleri, hücum açısını veya kanat sapmasını değiştirmeden optimize edilebilir. Sonuç olarak, aktif akış kontrol yöntemleri çok çeşitli problemlerin çözümünde uygulanabilir. Örneğin; döner kanatlı uçaklar için kaldırma kuvveti, alçak hız radar uçuş avantajı sağlanması, maksimum kaldırma kuvvetini artırmak için aerodinamik tutunma kaybının geciktirilmesi [9].

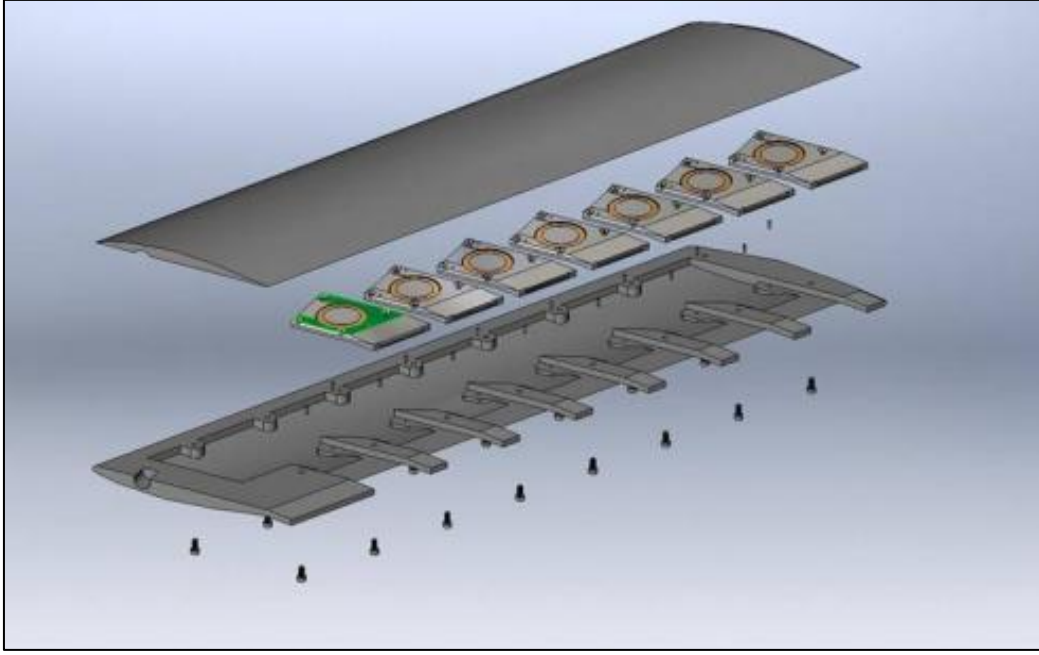
Sentetik jetlerin çalışma prensibi çok basittir. Aynı zamanda esnek zara bağlı bir salınlımlı piston diyafram olarak adlandırılan bir akışkan jet üretir. Akışkan jet, alternatif emme ve küçük bir delik bölümlerinden üflemeden kaynaklanan darbeleri bir harekete sahiptir. Belirli bir jet Reynolds sayısında, sıvı delik ağzından ayrılır ve bunun üstündeki sıvıya uyumlu bir jet oluşumu ile sonuçlanır. Yeterince yüksek genlikler için, net kütle enjeksiyonu olmadan, momentum kaynağı yaratan simetrik olmayan veya yönlendirilmiş bir akış oluşturulur [9].

Sentetik jet geometrisi Şekil 3.1. de bölümleri ile birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Sentetik jet

Şekil 3.2. de sentetik jetlerin bir sıra ile kanat üzerinde yerleşimi 3 boyutlu olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Kanat üzeri sıralı jet yerleşimi

Bir yüzeydeki aktif akış kontrolünü karakterize eden ana parametreler; kuvvet zorlama genliği ve sıklığı, dalga formu tipi (sinüzoidal, patlama modu veya modüle edilmiş genlik), Reynolds sayısı, slot genişliği ve aktüatörün akış aşağısı karakteristik yüzey uzunluğudur. Aktüatörler genellikle akış ayrılmasının olduğu bölgenin akış yukarısına yerleştirilir [10].

Ayrılmış akışın, Reynolds sayısından bağımsız olduğu yüksek Reynolds sayılarında, akışı karakterize eden iki boyutsuz parametre; momentum katsayısı ve indirgenmiş frekans kullanılır.  $h$  genişliğindeki bir jetin momentum katsayısı  $C\mu$ , jet momentumunun serbest akış momentumuna oranı olarak tanımlanır [10].

Sentetik jet aktüatörler, sınır tabakayı stabilize etmek için kullanılır. Dikey yapıların oluşumu ile sınır katmanına momentum akışının periyodik olarak eklenmesi/uzaklaştırılması sınır katmanını stabilize edebilir. Herhangi bir sentetik jetin performansı ve verimliliği büyük ölçüde frekans genliği ve jet konumu gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Kontrol parametrelerinin optimize edilmesi için kapsamlı bir parametrik çalışması gereklidir [9].

Aktif akış kontrol yöntemi, rotorun (kanat profili) aerodinamik özelliklerini iyileştirmede yeni bir yaklaşımdır ve gelecek nesil rotor uçakları için yenilikçi teknolojilerden biri olarak kabul edilir. Ayrıca, bu yöntem minimum bir radar kesitinin korunmasına yardımcı olan,

herhangi bir yön değiştirme kontrol yüzeyi olmadan kanatların aerodinamik özelliklerini önemli ölçüde geliştirme potansiyeline sahiptir [11].

Son zamanlarda, sentetik jet aktüatörleri kullanarak yeni bir aktif akış kontrolü yönteminin deneysel olarak, özellikle döner kanatlı uçaklar için en umut verici aktif akış kontrolü yöntemlerinden biri olduğu gösterilmiştir. Bunun nedeni, sentetik jet aktüatörün, sıfır net kütle enjeksiyonlu akıştan yüksek frekanslı bir jet üretmesidir. Sentetik jet aktüatörü, 1994 yılında Smith ve Glezer tarafından üretilmiştir. Bir pistonun veya piezoelektrik bir diyafram kullanılarak bir boşluğun bir tarafının periyodik olarak sürülmesiyle sentetik bir jet oluşturulur ve jet, oluşan dönen çiftlerin etkileşimleriyle sentezlenir [11].

Bir açıklıktan iç boşluğun dışına çıkan hava akışı ile çevre akış arasında bir kayma tabakası oluşturur. Bu girdap tabakası, dikdörtgen bir aktüatör durumunda iki paralel girdap oluşturmak için yuvarlanır. Diyafram havanın boşluğa geri çekilmesi için diyafram açıklıktan uzaklaşmaya başlar ve girdaplar yeterince uzağa taşınmış olur [11].

Böylece aktüatör tarafından bir vorteks çifti dizini oluşturulur. Bu nedenle, bir sentetik jet kütle enjeksiyonu gerektirmez, sadece elektrik gücü gerektirir. Rotor ve kanatçık üzerindeki akış kontrolü için uygundur. Birçok deneysel ve sayısal sonuç, uygun parametre kombinasyonlarına sahip olan bir sentetik jetin, rotor kanatlarının üzerindeki ayırma akışını yeniden elde edebileceğini veya ayrılmasını geciktirebildiğini, 1,4-10'un, kanatların aerodinamik özelliklerini geliştirmesine ve tutunma kaybı açısını genişleterek durdurabileceğini göstermektedir [11].

Sabit üfleme veya emme ile karşılaştırıldığında, sentetik jetlerin veya sıfır net kütle akılı jetlerin temel avantajı, aynı kaldırma kuvvetini elde etmek için daha az enerji gerektirmeleri ve karmaşık bir boru sistemine ihtiyaç duymamalarıdır [12].

### **3.2. Literatür Araştırması**

Bu bölümde, sentetik jet uygulanan kanat profillerinin, aktif kontroller ile aerodinamik tepkilerinin incelendiği bilimsel çalışmalar özetlenmiştir. Bu kapsamda hem sabit hücum açısındaki hem de salınım yapan kanat profilleri incelenmiştir. Araştırılan bilimsel çalışmalarda, İHA (İnsansız Hava Araçları), akış ayrılmasının kontrol edilmesi, kanat

salınımları, salınımlı kanatların yere yaklaşımı, dış akış kontrolü, kaldırma kuvvetinin artırılması, tutunma kaybının engellenmesi gibi sentetik jet uygulamaları incelenmiştir.

İnsansız hava araçları, düşük hız aralıklarında (8-24 m/s) uçuşlar gerçekleştirmektedir. İnsansız hava araçlarında önemli bir konu olan yük taşıma kapasitesinin artırılması amacıyla kanat toplam yük kapasitesinin artırılması araştırılmaya değer bir konu olarak görülmektedir. ‘Silent Falcon UAV’ ve ‘SoLong’ isimli insansız hava araçlarının uçuş hızları 12-24 m/s olarak belirtilmiştir. Orta irtifa yüksek süreli uçuş şartlarında analizlerin yapıldığı, R. Riza ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, daha yüksek aralıktaki hızlarda NACA 0012 kanat profili kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir [13].

‘Silent Falcon’, 5 saate kadar uçabilen ve güneş enerjisi sistemi ile çalışan küçük bir İnsansız Uçak Sistemidir. Güneş enerjisi sistemi, ince film foto voltaik güneş enerjisi toplayıcıları ve enerji depolaması için lityum polimer pil ile oluşturulmuştur. Kamu güvenliği, askeri ve güvenlik uygulama görevleri için tasarlanmıştır. Uçuş koşullarına bağlı olmasına rağmen, ‘Silent Falcon’ güneş enerjisi tahrikinin verdiği yetenekle 5 saate kadar uçabilmektedir. Uçağı hafifletmek için ana malzeme olarak karbon fiber kullanılmıştır. Bu hafiflik sayesinde havada taşınması ve manevra yapılması kolaydır. Bu hava aracı 15-100 km menziline, 5-12 saat uçuş süresinde, 12-24 m/s hız aralıklarında uçuş gerçekleştirebilmektedir. Uzun ömürlü, elektrikle çalışan ‘SoLong’, çeşitli uzaktan algılama uygulamalarına uyarlanabilen benzersiz bir platformdur. Orta büyüklükte, sessiz ve temiz elektrikli itme ve GPS navigasyonu, mevcut diğer İHA’lara pratik bir alternatif oluşturur. Uçak gövdesi ve tahrik sistemi, çeşitli görevleri yerine getirmek için kolayca aşağı veya yukarı ölçeklenebilir. Ar-Ge işlemleri ile otomatik başlatma ve kurtarma işlemleriyle tamamen özerk bir İHA veri toplama aracı olarak dönüşebilir. Uçuş aracının uçuş süresi 48 saat civarında, 12-24 m/s uçuş hızlarında çalışabilmektedir. Kanatlarında karbon, kevlar ve cam epoksi kompozit sandviç kullanılmıştır [13].

Xu ve Zhou çalışmalarında, sentetik jet kullanılan F111 insansız hava aracı (İHA) kanatların akış alanlarının aktif kontrolünü, asimetric akış alanı dikkate alınarak, yanal kayma olmadığı koşullarda incelemiştir. Bu çalışmada, hücum kenarına 8 dizi aktüatör yerleştirilmiş, sentetik jetlerin bilinen akış kontrol parametrelerinin akış kontrolü üzerindeki etkileri ve asimetric akış alanın kontrolüne etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, sentetik jet kontrolünün yanal yöndeki aerodinamik özelliği üzerindeki etkisini iyileştirmiş ve asimetric girdaptan temasa girerek

modelin yanal yönlü aerodinamik kontrolüne yönelik de istenilen sonuçlara ulaşılmıştır. Jet frekans parametrelerinin etkisinin analizi, uzunlamasına ve yanal yönlü aerodinamik özelliklerin kontrol etkilerinin, jet frekansı değişimi ile farklı kontrol amaçlarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [14].

Ziane ve El-Hadj, ağırlık merkezi ekseninde periyodik salınım yapan NACA 0012 kanadı etrafındaki akış incelenmişlerdir. Sonuçlar daha önce yapılan deneysel çalışmalar ile uyumluluk göstermektedir. Bu çalışmada, salınım yapan NACA 0012 kanadı üzerindeki akışın etkileşiminin açıklanmasında yardımcı olmuştur. Kaldırma, sürüklenme ve basınç katsayıları gibi aerodinamik parametrelerin analizleri yapılmıştır. İlave olarak, salınım yapan kanadın duvar etkisindeki değerleri incelenmiştir. Duvar etkisinin akış performansında olumsuz etkisinin olduğu ve akışı yavaşlattığı görülmektedir. Duvara yaklaşan kanatın, serbest akışa kıyasla sürüklenme katsayısının %37 arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Makalede, girdap bölgeleri azaltılarak duvara yaklaşan kanadın sürüklenme katsayısının azaltılabileceği önerilmektedir [15].

Duvigneau ve arkadaşının yaptığı çalışmada  $12^{\circ}$ - $24^{\circ}$  hücum açılarında anlık kaldırma ve sürüklenme katsayıları incelenmiştir. Bu katsayılar, değerlendirilirken, sentetik parametreleri olarak momentum katsayısı, frekansı ve duvara olan açısı incelenerek ortalama zaman adımlarındaki kaldırma katsayısı artırılmıştır [16].

Boukenkou ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, NACA 0015 kanat profili üzerine yerleştirilen sentetik jet ile kaldırma katsayısının tespitinde, Spalart-Almaras ve  $k-\epsilon$  türbülans modelleri kullanılmıştır. İki modelin de tutunma kaybı açısı tahmin etmede yetersiz olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Spalart-Almaras modelinin deneysel verilere daha yakın bir sonuç verdiği görülmüştür. Sentetik jet kontrollü akışın, yüksek hücum açılarında daha fazla kaldırma sağladığı, düşük açılarda ise daha az kaldırma sağladığı görülmüştür [3].

Corrêa ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, NACA 0012 kanat profili iki boyutlu olarak incelenmiştir. Kanat profili,  $6^{\circ}$ - $12^{\circ}$  derece arasında 0,25 ve 0,50 indirgenmiş frekans ( $k$ ) değerleri ile salınımı incelenmiştir. Bu salınımında,  $k-\omega$  türbülans modeli ile kayma gerinimi taşınım denklemleri çözülmüştür. Araştırmacılar, anlık hücum açılarındaki kaldırma ve sürüklenme katsayılarını incelemişlerdir [5].

Koopae çalışmasında, NACA 0012 kanat üzerindeki akışı incelemiştir. Bu çalışmada, akış hızının ses altı düzeyden ses üstü düzeye geçiş evresinde olduğu, akışın aerodinamik kuvvetlere etkisi incelenmiştir. Bu analizde, kaldırma ve salınım momenti katsayılarının izdüşüm döngülerinin salınım rejimindeki değişim etkisi izlenmiştir. Sonuçlar, Mach sayısının artışı, yukarı/aşağı hareketler süresince kaldırma katsayısında azalmaya/artmaya neden olmuştur. Düşük oranlardaki azaltılmış frekanslarda ise Mach sayısının artırıldığı yüksek hücum açılarındaki kaldırma katsayısına ters etki göstermiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, salınım genliği değiştirildiğinde kaldırma katsayısı, izdüşüm döngülerinin şekli şok varlığından daha çok salınım genliğine bağlıdır. Mach sayısı arttıkça, kesişim açılarının ekstremum salınım momentine karşılık geldiği ve azalan frekansa bağlı olarak, sıfır ve ekstremum atak açısı arasında yer aldığı gösterilmiştir [17].

LiQun ve LiHao yaptığı çalışmalarda, sentetik jet yerleştirilen dairesel silindir etrafındaki akışın kontrolü, su tüneli içerisinde Parça Hız Takibi (PIV) tekniği ile deneysel olarak çalışılmıştır. Hem ön hem arka bölüme sentetik jetler yerleştirilmiştir. Spektrum analiz gücü ile, dikey çözümleme yöntemi kullanılarak silindir etrafında akış kontrolü çalışılmıştır. Sentetik jetin etkilenen kapsamı, uyarma frekansı arttıkça genişler ve böylece sentetik jet, küresel akış alanını kademeli olarak domine eder. Sentetik jet girdap çifti, her iki taraftan yakındaki uyandırıcı kayma tabakası ile etkileşime girerek, bir çift simetrik uyanıklık giritisini indüklemekte, bu da yavaş yavaş aşağıya akarken anti simetrik bir moda dönüştürülmektedir. Yapılan çalışmalarda, sentetik jet kontrolünün, dairesel silindirin etrafındaki girdap doğal frekansını değiştirebildiği, çıkış frekansındaki artış ile, sentetik jetin genişlemesi ile baskın olduğu alanın akış yönünde genişlediği görülmüştür [7].

Boukenkoul makalesinde, NACA 0015 kanat profilinde sentetik jet kullanarak  $20^\circ$  hücum açısında,  $Re=8,95 \times 10^5$  değerinde, Spalart-Almaras türbülans modelini kullanarak çözümleme yapmış ve Gilarranz J.L. ve arkadaşları [18] deney çalışmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Havanın yoğunluğu az olduğu için, hacim kuvvetleri ve hava ağırlığı ihmal edilmiştir. Ortalama değerler kullanıldığı için RANS denklemleri açık sistem olarak değerlendirilir. Akış ayrılmasının oluşmadığı daha düşük hücum açılarından ziyade, daha yüksek hücum açılarındaki kaldırma katsayılarında iyileşmeler görülmüştür. Spalart-Almaras ve  $k-\omega$  transport türbülans denklemi kullanılmıştır. Sürüklenme kuvvetlerinde %40 oranında düşüşler elde edilmiştir. Sentetik jetin kullanıldığı durumlarda, akış ayrılmaları  $15^\circ$

den  $19^\circ$  lere ertelenmiş ve %40 kaldırmada kazanım sağlanmıştır. Toplam yapılan iş miktarı da jet frekansı ve momentumu çalışılarak geçici kaldırma işaretlerinde artırılmıştır [3].

Haider ve arkadaşlarının [9] in yaptığı çalışmada, genel bir kanat profilini üzerinde yerleştirilen sentetik jet aktüatörlerin aerodinamik tutunma kaybı kontrolü incelenmiştir. Sentetik jetler, kanat kirişinin %13 uzunluğuna yerleştirilmiştir.  $Re=2,1 \times 10^6$  ve  $16^\circ$  den  $22^\circ$  hücum açılarında anlık olarak doğrulama için analiz yapmışlardır. Kararsız Reynolds-ortalama Navier-Stokes denklemleri çözücü ile çözülmüştür. Sentetik jet olmaksızın, temel doğrulama olarak HAD simülasyonu ile karşılaştırmışlardır. Sentetik jet ‘Fluent’ ile entegre olarak çalışması için Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon (UDF) ile tanımlamışlardır. Sentetik jet ile oluşturulan basınç değişimleri kaydedilmiştir. Basınç hatları ile, emme-üfleme bölümlerinin çalışması gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre, duraklama bölgesinde sentetik jet kullanımının oldukça teşvik edici olduğu belirlenmiştir. Jet kullanımı, özellikle tutunma kaybı kontrolünde ve kanat profilinin aerodinamik performansının artırılmasında yararlı olduğu belirtilmiştir [9].

Haider ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda, sentetik jet kullanılan durumlar ile kullanılmayan durumlardaki, farklı hücum açılarındaki kaldırma, sürüklenme ve momentum katsayıları tablo halinde karşılaştırılmıştır. Bu tablodan, elde edilen verilere göre kontrolsüz durumdaki deneysel verilere ve kontrolsüz durumdaki analiz verilerine göre, kaldırma katsayılarında gelişim sağlandığı görülmektedir [9].

Parthasarathy ve Das makalelerinde, sentetik jet uygulanan NACA 0015 kanat profili üzerinde bazı akış kontrolü parametrelerini incelenmişlerdir. Çalışmada, uzunlamasına ve serbest akış hızına bağlı olarak  $Re=896.000$  değerinde ve  $20^\circ$  hücum açısı durumunda oluşan akış ayrılmasının tahmin edildiği bölüme sentetik jet uygulanan NACA 0015 kanat profilinin aerodinamik katsayıları gözlemlenmiştir. Sentetik jet parametrelerinin değişiminin aerodinamik katsayılar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Faz ortalama basıncı ve akış çizgisi profilleri gibi anahtar akış parametrelerinin analizi, sentetik jetin kaldırma katsayısını arttırmakta etkili olduğunu göstermektedir. Bu etki, daha büyük jet genlikleri ve daha küçük jet akım açıları içinde gözlemlenmiştir. Sonuçlar diğer analizler ile de karşılaştırılmıştır. Yaptıkları çalışma, jet parametrelerinin kanat profili üzerinden ayrılmış olan akış üzerindeki etkilerin anlaşılması için niceliksel ve niteliksel katkı sağlamıştır [19].

Monir ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, NACA 23012 kanadı üzerinde aerodinamik ayrılma kontrolü simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Türbülans modeli olarak, Spalart-Almaras modeli kullanılmıştır. Bu deneyde ayrılma noktası mekanizmaları olarak sentetik jetler kullanılmıştır. Analiz şartları olarak;  $Re=2,19 \times 10^6$  yüksek hızlarda RANS ile çözümleme yapılmıştır. Ayrılmanın olması beklenen noktalara %12 giriş boyuna, sentetik jetler yerleştirilmiştir. Farklı frekanslarda iki ayrı jet yerleştirilmiştir ve bu çalışmada üfleme oranı olan  $V_j/U_\infty$  etkisi incelenmiştir. Sonuçlar hemen zaman tabanlı hem de spektral tabanlı olarak incelenmiştir. Sonuçlar, durağan bölgenin karakteristiğinin, akıştaki ayrılma girdaplarının kontrolü ile geliştiğini göstermektedir. Teğet durumunda iken  $C_L/C_D$  değeri maksimum performans göstermiştir [20].

Kim ve Kim, C. tarafından yapılan nümerik analizde, NACA 23012 kanat profili üzerinde sentetik jetler kullanılmış ve aerodinamik özelliklerin araştırılması için, ayrılma noktası kontrolü yapılmıştır. Yapılan analizlerde, tutunma kaybı noktası özellikleri ve kontrol yüzeyi performansındaki gelişmeler ayrılma girdaplarının yeniden boyutlandırılması yolu ile büyük ölçüde geliştirilebildiği gözlemlenmiştir. Maksimum kaldırma kuvvetinin ayrılma noktası ile çakıştığı ve boyutsuz frekansın yaklaşık 1,0 olduğu durumlarda elde edilmiştir. Ayrılma noktası kontrolünün aynı zamanda sentetik jet maksimum hızı ile doğru orantılı olduğu belirtilmiştir. Düşük frekans aralıkları için, sentetik jet yardımı ile oluşan girdaplar hücum kenarına yaklaşırken, hücum kenarı girdapları büyük ölçüde azalma kaydetmiştir. Yüksek frekans aralığı için, küçük girdaplar hücum kenarına ilerleyemeyip hücum kenarı ayrılma girdaplarına etki edecek kadar gelişmediği gözlemlenmiştir. Bu gelişimleri sağlamak için, çok sıralı sentetik jet uygulaması yapıldı. Düşük frekans aralığında kararsız olan akışı kararlı hala getirmek için yüksek frekanslı bir jet kullanılmıştır. Düşük frekans aralığındaki kararsızlıkları gidermek amacıyla yüksek frekanslı çok konumlu jetler kullanılmıştır. Sonuç olarak çok akışlı/çok konumlu sentetik jetler kullanılarak kararlı akış ortamı geliştirilmiştir [21].

Duvigneau ve Visonneau yaptığı analiz çalışmalarında aerodinamik tutunma kaybı kontrolü için sentetik jet optimizasyonu çalışılmıştır. Kontrol parametrelerinin otomatik optimizasyonu araştırılmıştır. Hücum kenarının %12 giriş boyu uzaklığına yerleştirilen bölgede, sentetik jetin etkilerinin analizi yapmak amacıyla, kararsız RANS denklemleri,  $Re=8,96 \times 10^5$  ve duvar kenarı düşük Reynolds sayısı türbülans yaklaşımı kullanılarak ile çözülmüştür. Ardından aktüatör parametrelerini (momentum katsayısı, frekans, duvara göre

açı) optimize etmek amacıyla akış çözücü ile birleştirilmiş optimizasyon prosedürü kullanılmıştır. Bu yöntemle, temel kanat profiline göre maksimum kaldırmada %52 artış sağlanmıştır ve tutunma kaybı için en uygun parametreler  $16^\circ$  ve  $22^\circ$  arasında oluşmuştur. Kaldırma kuvveti artması gereken parametre olarak tanıtılmış, hız genliği, frekans ve açı duvarlara göre optimize edilmiştir [16].

Kang ve arkadaşlarının yaptığı analizlerde, bölgesel salınım yapan kanat profili etrafındaki akışlar düşük Reynolds sayılarında nümerik olarak hesaplanarak, bölgesel salınımın aerodinamik performanstaki etkisi incelenmiştir. Salınım için gerekli 3 esas özellik frekans, genlik ve denge denklemi aktif akış kontrolü etkilerini anlamak için incelenmiştir. Salınım frekansı ve genliğinin kaldırma elde edilmesindeki önemli faktörler olduğu belirtilmiştir. Salınım frekansının düşük olduğu (0,41-0,7) kanat profili ile akış çizgileri değişmemiştir. Salınım frekansının akış frekansı ile aynı olduğu durumda ( $f=0,8-1,76$ ) akış salınım ile senkronizedir. Girdaplar hücum kenarına yakın bölgeden oluşmaya başlar ve kanat ucuna ilerlerken birbirinden ayrı olarak yayılırlar. Bu girdaplar üst yüzeyde yuvarlanmaya başlar ve kaldırma kazanımına etkiyi devam ettirirler.  $F=1,22$  olduğunda %69,86 oranında artış görülmüştür. Salınım genliğinin de kaldırma kazanımında etkili olduğu tespit edilmiştir. Salınım genliğinin 0,1-0,5 aralığında etkisiz olduğu, 0,5-1,0  $A_{mref}$  aralığında kaldırma kuvvetini artırdığı görülmüştür. Bu aralıktan yüksek genliklerde daha fazla enerji gereksinimi sebebi ile faydalı olmaktan uzaklaşır [22].

Amitay ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ticari olmayan kanat profili üzerinde sentetik jet kullanılarak rüzgar tüneli testinde aerodinamik akış incelemiştir. Bu kanat profilinde  $5^\circ$  hücum açılarında, akış hücum kenarı yanından ayrılmaktadır. Bu kanata uygulanan sentetik jet sonrası ayrılma  $17,5^\circ$  dereceye kadar uzatılmıştır. Farklı hücum açıları için aktüatör frekansı, aktüatör lokasyonu ve momentum katsayısının etkisi araştırılmıştır. Aktüatörler ayırma noktasına daha yakın yerleştirilirken, ayrılmış akışı yeniden bağlamak için gereken momentum katsayısı azalır. Belirli bir  $C_\mu$  ve jet açısı  $\gamma$  için, kaldırma ve sürüklenme katsayısının  $Re$  sayısından bağımsız olduğunu göstermektedir. Sentetik jetler, kanatçık üzerinde ayrılmış akışın doğal dökülme frekansından yaklaşık 30 kat daha yüksek olan  $F^+=20$  boyutsuz frekansına kadar bir dizi frekansta çalıştırılmaktadır.  $F^+<4$  değerlerinde, uyarım frekansının artışı, kaldırma ve sürüklenmede düşüşe neden olmuş,  $F^+\geq 10$  kaldırma-basma basıncı sürüklenme oranı çok daha büyüktür ve harekete geçirme frekansı ile etkilenmediği görülmektedir [23].

Akçayöz yaptığı çalışmada, sentetik jet uygulanan kanat profili üzerinde akış kontrolünün sayısal olarak incelenmesi yapılmıştır. Bu çalışmada, Tepki Yüzeyi Metodolojisi kullanılarak  $C_L/C_D$  oranının maksimuma çıkarılması için farklı hücum açılarında optimizasyon çalışmaları yapmıştır. Akış şartları, kararsız, türbülanslı akışlar ve paralel hesaplama yöntemi ortamında Navier-Stokes akış çözücüsü olarak kullanılmıştır. Optimizasyon çalışması, jet hızının ve jet konumunun baskın sentetik jet parametreleri olduğunu göstermiştir. Optimum jet lokasyonunun hücum kenarından geçtiği gözlemlenir ve optimum akış hızının, ayrılan akışlar için hücum açısı arttıkça arttığı gözlenir.  $C_L/C_D$  oranı özellikle hücum sırasındaki tutunma kaybı açısı da artmaktadır. Atak açısı yükseldikçe, en uygun sentetik jet açısının da yükseldiği gözlemlenmiştir [24].

Bu çalışmada, genel olarak göz önüne alınan aerodinamik değerler jet boyutsuz frekansı ve genliğinin değerleri değiştirilerek, farklı hücum açılarındaki anlık değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Analizler ve deneyler, genel olarak sabit hücum açısında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, sabit frekansta salınım yapan kanat profilinin dinamik hareketinin geniş bir jet frekansı ve jet genliği değerlerinde, aerodinamik etkileşimleri incelenmiştir. Bu salınım değerleri de, daha önce akademik çalışması yapılan aralıkların içerisinde yapılarak, elde edilen tecrübelerin aktarımı için ortam oluşturulmuştur.



## 4. MATEMATİKSEL MODEL VE AĞ YAPININ OLUŞTURULMASI

### 4.1. Giriş

Bu bölümde, incelenen problemin matematiksel model denklemleri, kabuller ve sınır şartları sunulmuştur. Türbülans modelleri ile ilgili olarak, avantaj ve dezavantajları ile ilgili yapılan çalışmalar ve görüşler incelenmiştir. Çözüm alanı için ağ yapısı oluşturulmuş ve detaylı olarak açıklanmıştır. Sonuçların ağ sayısından bağımsızlığını test etmek amacıyla gerçekleştirilen parametrik analiz çalışmaları tablolar halinde sunulmuştur.

### 4.2. Model Denklemleri

2 boyutlu, O-tipi çözüm alanı için, sabit ve salınımlı durumda kanat profili etrafındaki akış, kararsız (zamana bağlı), sıkıştırılamaz Ortalamalı Reynolds Navier-Stokes denklemleri kullanılarak modellenmiştir [12].

#### Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.1)$$

#### Momentum denklemi

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i' u_j'} \right] \quad (4.2)$$

Burada  $t$  ve  $x_i$ , zamanı ve kartezyen koordinat sistemini temsil etmektedir.  $U_i$ , ortalama hızı göstermektedir.  $p$  zaman ortalamalı basıncı,  $\rho$  ve  $\nu$  yoğunluk ve kinematik viskoziteyi göstermektedir. Sonlu hacim metodu, URANS denklemleri ayrıklaştırılarak türbülanslı akışın çözümü için kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan türbülans modeli, kanat üzeri ayrılmış akışlarda tatmin edici davranışlarından dolayı Menter'in  $k-\omega$  'Kayma Gerinimi Taşınımı' denklemleridir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i) = 0 \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j u_i) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + v_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] \quad (4.4)$$

Denklem 4.3. kütle korunumu denklemi ve denklem 4.4. de korunumlu momentum denklemdir. Denklemlerdeki  $v_t$ , girdap kinematik viskozitesidir. URANS tipi türbülans modelleri türbülans kinematik viskozitesini modeller. Akışkan olarak hava seçilmiştir. Gövde kuvvetleri ana denklemlerden çıkarılmıştır. Basınç ve hız eşleri ‘COUPLED’ algoritması ile çözümlenmiştir [25].

#### 4.2.1. Türbülanslı akış ve türbülans modelleri

Bu bölümde türbülans modellerinin kullanım yerleri, avantajları ve yetersiz kaldığı durumlar araştırılan bilimsel çalışmalar yardımı ile belirtilmiştir. Bu çalışmalarda, kullanılan türbülans modellerinin aerodinamik etkileri detaylı olarak belirtilmiştir. Ayrılma noktalarının belirlenmesinde ve yavaşlayan akışların modellenmesinde yüksek doğrulukta sonuç vermektedir. Bu nedenle, bu çalışmada k- $\omega$  SST türbülans modeli kullanılmıştır.

Havacılık akışları, esas olarak, güçlü olumsuz basınç gradyanları ve sınır tabakalarında ayrılma nedeniyle, özelliklerinin öngörülmesinin yüksek doğruluk gerektirdiği bir sınıftır. Reynolds-ortalımalı Navier-Stokes denklemleri (veya RANS denklemleri) akışkan akışı için zamana göre ortalama hareket denklemleridir. Navier-Stokes denklemlerine yaklaşık zamana dayalı çözümler üretmek için akış türbülansının özelliklerine dayanan yaklaşımlarla kullanılabilir [5].

Türbülans modelleri, türbülans viskozitesi modelleri, büyük girdap modelleri ve doğrudan sayısal simülasyon modelleri olarak ayrılır. Doğrudan sayısal simülasyon, akışta oluşan en küçük girdapları yakalayacak kadar ince ağ yapısı ve zaman adımı kullanılarak türbülans modellemeyen çözümler elde edilir. Düşük türbülanslı akışlar için bile bu çözümler süper bilgisayarlarla gerçekleştirilir. Bu simülasyon yöntemi türbülans modellerinin kalibrasyonunda kullanılır, pratik problemlerde kullanılmaya uygun değildir. Büyük girdap modelleri, küçük izotropik girdapları modelleyen doğrudan sayısal simülasyondan daha

düşük hesaplama ihtiyaçlı bir türbülans modelidir. Yüksek türbülanslı olan türbin çarkı akışlarına uygulanması için yüksek çözüm gücü gereklidir. Türbülans viskozitesi modelleri, türbülans modellemeye düşük maliyetlidir. Bu modelde türbülans etkisi yaklaşık olarak türbülans viskozitesi olarak modellenir. Türbülans viskozitesi modellerinden  $k-\epsilon$  modellerinin ve  $k-\omega$  modellerinin genel akış modellenmesinde performansları iyidir. Türbülans viskozitesi modelleri hakkında detaylı bilgi için Cebeci [26] kitabında verilmiştir.

Yaygın olarak kullanılan bazı türbülans modellerinin güçlü ve zayıf yönleri, akademik çalışmalarda yeri aşağıdaki bölümlerde anlatılmıştır.

#### Spalart-Almaras türbülans modeli

Spalart-Almaras modelinin birincil dezavantajı, serbest jet akışlarına uygulandığında görülür. Bu uygulamalar için, duvarla sınırlandırılmış duvardan serbest kaymaya geçişle ilişkili uzunluk skalalarındaki hızlı değişim problemlidir ve alternatif modeller daha iyi tahminler sağlayabilir.

Spalart-Almaras modeli basit bir denklem modelidir ve temel olarak havacılık uygulamaları için hazırlanmıştır. Bu nedenle, havacılık ve uzay problemlerinde iyi bilinen bir modeldir. Bir başka önemli nokta, bu yöntemin, ters basınç gradyanlarına maruz kalan sınır tabaka problemlerini (havacılık uygulamalarında çok yaygın olan) iyi bir şekilde çözebilmesidir. Hesaplama zamanı açısından daha kısa süreli çözümleme yapılabilir. Bu yüzden büyük ölçekli problemler için iyi bir tercih edilen çözüm aracıdır. Fakat dezavantajları da mevcuttur. Bazı daha karmaşık yöntemler ortaya çıktığından, farklı problemler için iyi kalibre edilmemiştir. Bu nedenle, tercih edilecek uygulamalardaki uygunluğu incelenmesi gerekir. Bu uygulama serbest düzlemsel akış ve dairesel jet akışları gibi serbest kayma akışlarında kullanılmamaktadır. Ayrıca, homojen izotropik türbülansın bozulmasını tahmin etmekte de güven vermemektedir [27].

#### $k-\epsilon$ türbülans modeli

Türbülans kinetik enerjisi, dalgalanmaların hızdaki varyansı olarak tanımlanmaktadır. Türbülans girdap dağılımı, hız dalgalanmalarının dağıldığı hızdır [28]. Standart  $k-\epsilon$  modelinde, girdap viskozitesi, tek bir türbülans uzunluk ölçeğinden belirlenir, bu nedenle

çözömlenen türbölanslı difüzyon, yalnızca belirtilen ölçekte meydana gelendir. Oysa gerçekte tüm hareket ölçekleri türbölanslı difüzyona katkıda bulunacaktır.  $k$ - $\epsilon$  modeli, Reynolds gerilmelerini ortalama hız gradyanları ve türbölans viskozitesi ile ilişkilendirmek için gradyan difüzyon hipotezini kullanır. Şiddetli basınç gradyanı, ayırma, güçlü akış çizgisi eğriliği içeren karmaşık akışlar için düşük performans gösterir. En önemli zayıflığı, olumsuz basınç değişimlerine karşı hassasiyet eksikliğidir; diğer bir eksiklik, stabilizasyon sorunları olan sönümleme fonksiyonlarıyla muamele edilen viskoz alt tabakadan denklemlerin entegre edilmesinin sayısal sertliğidir.

Modelin artı yönleri; Dirençlidir. Modelin bilinen sınırlamalarına rağmen yaygın olarak kullanılır. Uygulaması kolay ve çözüm işlemi basittir. Sadece tamamen türbölanslı akışlar için geçerlidir. İlk tekrarlamalar, alternatif tasarımların ilk gösterimleri ve parametrik çalışmalar için uygundur.

Modelin olumsuz yönleri; Şiddetli basınç gradyanı, ayrılma, güçlü akış çizgisi eğriliği içeren karmaşık akışlar için düşük performans gösterir. En rahatsız edici zayıflığı, olumsuz basınç değişimlerine karşı hassasiyet eksikliğidir.  $k$ - $\epsilon$  modelinin bir başka eksikliği, viskoz alt tabaka boyunca integral işlemi yapıldığında, denklemlerin sayısal rijitliği ile ilişkilidir. [28].

Standart ve diğer  $k$ - $\epsilon$  modelleri kopmalar olan akışların analizlerinde yeterince doğru çözümler verememektedir. Radyal türbinlerdeki geliş açılardan dolayı oluşan akışın kopma noktalarının doğru belirlenmesi çok önemlidir. Bu sebeple  $k$ - $\epsilon$  modelleri bu çalışmada kullanılmamıştır [29].

#### Standart $k$ - $\omega$ türbölans modeli

Kinetik enerji  $k$  ve türbölans frekansı  $\omega$  için çözülen iki taşınımli denklem modelidir. Bu, ana  $k$  –  $\omega$  modelidir. Bu model, bir duvar fonksiyonundan ızgara aralığına dayalı olarak düşük Reynolds sayılı bir formölasyona otomatik bir anahtarla daha yakın bir duvar muamelesine izin verir. Duvar üzeri ve düşük Reynolds sayılarındaki akışlar için üstün performans gösterir. Geçiş öngörme potansiyelini gösterir. Seçenekler geçiş, serbest kayma ve sıkıştırılabilir akışlar için geçerlidir.  $k$ - $\epsilon$  modeli, Reynolds gerilmelerini ortalama hız gradyanları ve türbölans viskozitesi ile ilişkilendirmek için gradyan difüzyon hipotezini kullanır. Türbölanslı kinetik enerji  $k$  için bir denklemi ve belirli türbölanslı dağılma oranı

(veya türbülanslı frekans)  $\omega$  için ikinci bir denklemi çözer. Bu model, olumsuz basınç gradyanı koşulları altında önemli ölçüde daha iyi performans gösterir. Model sönümleme işlevlerini kullanmaz ve basit Dirichlet sınır koşullarına sahiptir, bu sayede sayısal kararlılıkta önemli avantajlar sağlar. Bu model, ciddi ters basınç gradyan akışları için ayırma miktarını öngörmektedir. Artıları: Duvara bağlı sınır tabakası, serbest kayma ve düşük Reynolds sayısı için üstün performans. Karmaşık sınır tabakası için uygundur, ters basınç gradyanı ve ayrımı altında akar (dış aerodinamik ve turbo makina). Geçiş akışları için kullanılabilir (yine de erken geçişi öngörme eğilimindedir). Eksileri: Ayırma tipik olarak aşırı ve erken olduğu tahmin edilmektedir. Duvarın yakınında ağ çözünürlüğü gerektirir. Standart k- $\omega$  modelinin giriş şartlarına yüksek duyarlıdır ve kuyruk suyu akışlarında k- $\epsilon$  modelleri kadar doğru çözümler vermemektedir. Bu sebeple k- $\omega$  türbülans modeli bu çalışmada kullanılmamıştır.

#### (SST) tipi k- $\omega$ türbülans modeli

Bu çalışmada seçilen türbülans modeli Kayma gerilmesi taşınımı (SST) k-  $\omega$  modeli, k- $\epsilon$  ve k-  $\omega$  modellerini birlikte kullanılarak daha iyi doğrulukta sonuçlara ulaşılan kombine bir türbülans modeli oluşmuştur. Kopma noktalarının tespit edilmesinde ve yavaşlayan akışın tespit edilmesinde yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada SST modeli kullanılmıştır. Bu modelde kullanılan denklemler (4.5-4.20) Cebeci [26] kitabından alınmıştır.

Kayma gerilmesi taşınımı modelinde, türbülans kinematik viskozitesinin denklem 4.5’de verilmiştir. Bu modelde,  $F_2$  parametresiyle türbülans viskozitesi sınırlanmıştır.

$$v_t = \frac{a_q k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)} \quad (4.5)$$

$$F_2 = \tanh (arg_2^2) \quad (4.6)$$

$$arg_2 = \max \left( 2 \frac{\sqrt{k}}{0,09 \omega y}; \frac{500 v}{y^2 \omega} \right) \quad (4.7)$$

Kayma gerilmesi taşınımı modelinde, türbülans viskozitesinin hesaplanması için türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ) Denklem 4.8 ve spesifik disipasyon oranı( $\omega$ ) Denklem 4.9 hücreler için çözdürülmüştür.

$$\frac{\partial(k)}{\partial\tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + v_t \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{\rho} \overline{R_{ij}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \omega k \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\omega)}{\partial\tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \omega) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + v_t \sigma_\omega) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\gamma}{\rho v_t} \overline{R_{ij}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 \\ &+ 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Denklem 4.9 ve 4.10'da bulunan Reynold gerilim tensörü ( $\overline{R}$ ) Denklem 4.10'de verilmiştir.

$$\overline{R_{ij}} = \rho v_t \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (4.10)$$

Kayma gerilmesi taşınımı (SST) tipi  $k$ - $\omega$  modelinde,  $k$ - $\varepsilon$  ve  $k$ - $\omega$  modelleri  $F_1$  parametresinin değerine (Denklem 4.11) göre değiştirilir.  $F_1$  değeri bir olduğunda  $k$ - $\omega$ , sıfır olduğunda  $k$ - $\varepsilon$  modeli etkin olur.

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (4.11)$$

$$\arg_1 = \min \left( \max \left( \frac{\sqrt{k}}{0,09 \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right); \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{C D_{kw} y^2} \right) \quad (4.12)$$

$$C D_{kw} = \max \left( 2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \left( \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial i} \right), 10^{-20} \right) \quad (4.13)$$

Diferansiyel denklemlerde kullanılan parametreler de Denklem 4.14 kullanılarak belirlenir.

$$\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2 \quad (4.14)$$

$$\varphi = \{\sigma_k \quad \sigma_w \quad \beta \quad \gamma\} \quad (4.15)$$

Denklem 4.15’de verilen parametrelerin hesabında, k- $\omega$  denkleminin parametreleri Denklem 4.16’da, k- $\varepsilon$  denklemin parametreleri Denklem 4.17’de verilmiştir.

$$\varphi_1 = \{\sigma_{k1} \quad \sigma_{w1} \quad \beta_1 \quad \gamma_1\} = \{0,85 \quad 0,5 \quad 0,075 \quad 0,553\} \quad (4.16)$$

$$\varphi_2 = \{\sigma_{k2} \quad \sigma_{w2} \quad \beta_2 \quad \gamma_2\} = \{1 \quad 0,856 \quad 0,0828 \quad 0,440\} \quad (4.17)$$

Türbülans denklemleri duvar yakınlarında çözülürken duvar etkilerinin modellenmesi gerekir. Bu etkiler, viskoz alt bölge, tampon bölgesi ve türbülanslı üst bölge olarak ayrılarak modellenir [26]. Yüksek hassasiyetli modelleme yapabilmek için, çalışmalarda viskoz alt bölgede olan duvar fonksiyonu (Denklem 4.18) kullanılmıştır. Bu bölgede analiz yapabilmek için boyutsuz duvar mesafesi beşin altında kalacak şekilde hücre yapısı oluşturulmuştur. Bu fonksiyonda, boyutsuz duvar hızı ( $u^+$ ) boyutsuz duvar mesafesinin ( $y^+$ ) fonksiyonudur. Boyutsuz duvar hızı (Denklem 4.19), boyutsuz duvar mesafesi Denklem 4.20’de verilmiştir. Bu denklemlerde  $u$  duvar yanındaki hücrenin hızını,  $\tau_w$  duvar kesme gerilmesi ve  $y$  duvar mesafesidir.  $k$ , türbülans kinetik enerjisidir.  $I$ , türbülans yoğunluğudur [30].

$$u^+ = y^+ \quad (4.18)$$

$$u^+ = \frac{u}{\sqrt{\tau_w/\rho}} \quad (4.19)$$

$$y^+ = \frac{y\sqrt{\tau_w/\rho}}{\nu} \quad (4.20)$$

$$k = \frac{3}{2}(uI)^2 \quad (4.21)$$

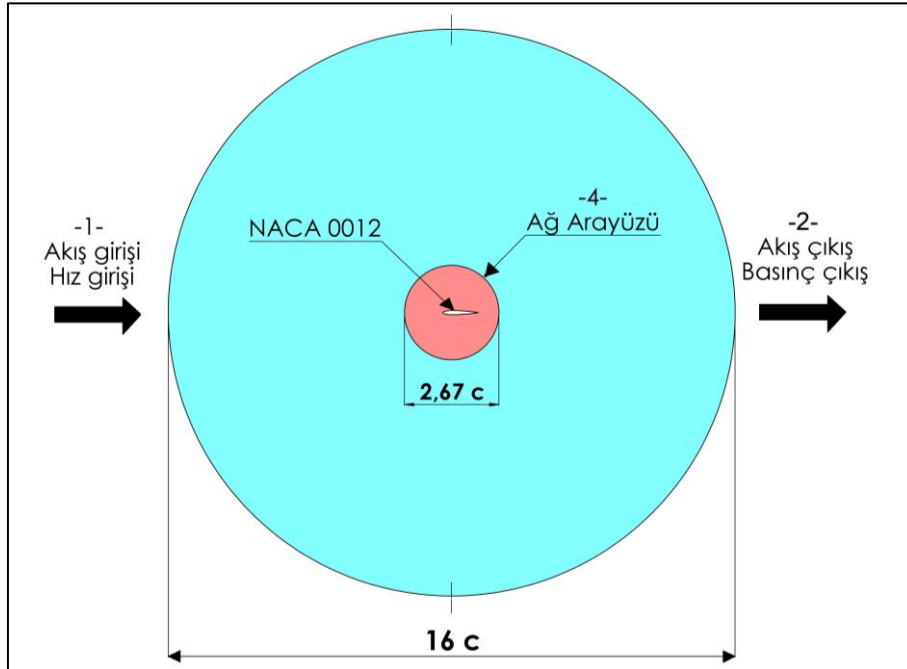
$$\omega = \rho \frac{k}{\mu} \left( \frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1} \quad (4.22)$$

### 4.3. Çözüm Alanı Ağ Yapısı ve Sınır Şartları

#### 4.3.1. Çözüm alanı ağ yapısı

Çözüm alanı sınırları Şekil 4.1. de görüldüğü gibi tanımlanmıştır. Serbest akış alanında, serbest akış hızı, statik basıncı değerleri belirtilerek tanımlanmıştır. Akış girişinde, akış hızı x eksenı boyunca sabit, y eksenı boyunca 0 değeri tanımlanmıştır. Çıkış bölümü, Basıncı Çıkışı olarak tanımlanmış ve değeri 0 [Pa] olarak sabitlenmiştir. Kanat profili üzerinde kaymasız yüzey sınır şartı sağlanmıştır. Kanat üzeri noktasında, akış hızı 0 olarak tanımlanmış olur.

Daha sonra, ikiye ayrılan akış alanları ara yüz tanımları ile eşlenik olarak tanımlanmıştır. İç kısımda ağ tipi yapısal şekilde oluşturulmuştur. Kanat profili çevresinde bulunan, ağ yapısı aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Çözüm alanı

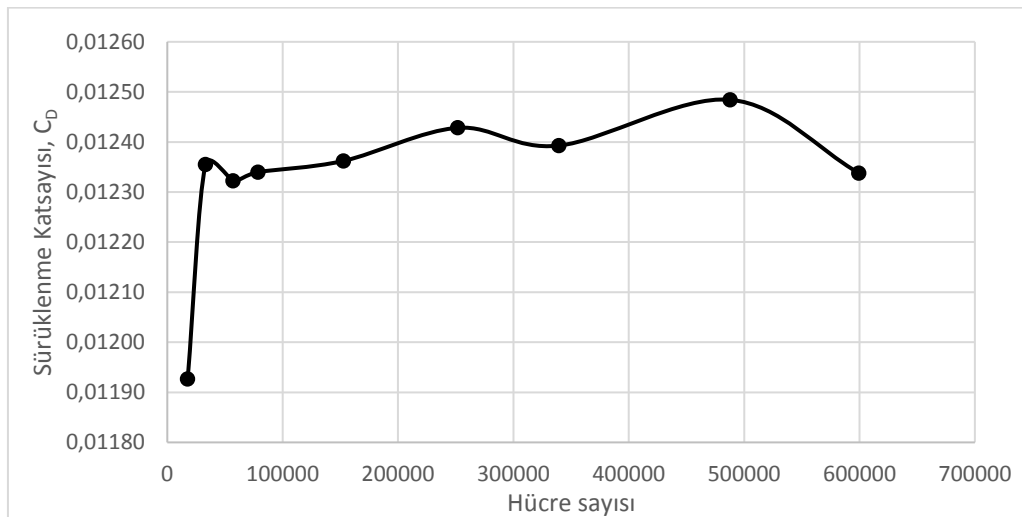
Kanat profili olarak NACA 0012 profili, kaynakça [31] programı kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan geometri üzerine sentetik jet geometrisi, ‘ANSYS Geometri’

de çizilerek yerleştirilmiştir. Jet bölgesi ve kanat sınır üzeri akış sınır tabakalarındaki ağ yapısı, ICEM programında yapısal olarak sıklaştırılmış ve hesaplamaların daha verimli yapılması amaçlanmıştır. Farklı hücum açılarında yapılan statik analizleri ve kanat profilinin salınımlı akışlarındaki analizlerin yapılması amacı ile 2,67 kanat kiriş boyu çapında dinamik alan oluşturulmuştur. Bu alanın ağ yapısı, dış kısımdaki ağ yapısına göre sıklaştırılmıştır.

#### 4.3.2. Ağ yapısından bağımsızlık

Kanat üzeri akış modellenmesi için dörtgen ağ yapısı uygulanmıştır. Hareketli alandaki ve sabit alandaki ağ sayısı, artırılmıştır. Akışın duvar sınır şartı için laminar alt bölgesinde olacak şekilde duvar dibinde hücreler sıklaştırılmıştır. Şekil 4.2. deki kırmızı dairesel bölge hareketli alan olarak, salınım hareketini yapmak üzere mavi dairesel alandan ara yüz çizgisi ile tanımlanarak ayrılmıştır. Mavi dairesel alan, sabit yapısal olarak çalışılmıştır. Bu bölümde, tanımlanan sınır şartları numaralandırması Şekil 4.1. de gösterilmiştir.

Ağ yapısından bağımsızlığın tespiti için yapılan analizler, Şekil 4.2. de grafik halinde belirtilmiştir. Seçilen ağ yapısı 50.000 hücreden sonra yaklaşık sonuçları vermektedir. Analizlerde zamana bağlı çözüm yapıldığı için düşük sayıdaki ağ sayısı seçilerek analiz süreleri kısaltılmaya çalışılmıştır. Seçilen ağ yapısı ile yapılan analiz süreleri ortalama 8 saattir.



Şekil 4.2. Sürüklenme katsayısının hücre sayısına göre değişimi

Bu çalışmada, kanat profili etrafı ve sentetik jet bölgelerindeki akışlarında yüksek hız ve basınç değerlerine ulaşılmaktadır. Basınç ve hız farklarının daha iyi çözümlenmesi amacı ile kanat etrafı sınır tabakası ve sentetik jet bölümlerindeki ağ yapısı iyileştirilmiştir. Bu kapsamda ağ yapısının bağımsızlığının sağlanması için, aerodinamik katsayılar karşılaştırılmıştır. Analiz süreleri de göz önüne alınarak kabul edilebilir seviyedeki katsayıların olduğu değerler aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

Çizelge 4.1. 'de çözüm alanındaki bölümler, toplam element sayıları ve toplam nokta sayıları gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Çözüm alanı element ve nokta sayısı

| Ağ Yapısı Bölgeleri | Toplam element sayısı | Toplam nokta sayısı |
|---------------------|-----------------------|---------------------|
| Dinamik alan        | 50.988                | 50.350              |
| Statik alan         | 14.756                | 14.280              |
| Jet alanı           | 528                   | 572                 |

#### 4.3.3. Sınır şartları

Sınır şartlarının tanımlanması için bölümler belirlenir. Belirlenen sınır şartı çeşitlerine göre de Navier-Stokes Denklemlerinin çözümlerinde kullanılır. Katı duvar üzeri akışlarda, katı yüzey üzerindeki akış hızı 0 olarak kabul edilir ve sınır şartı olarak 'Kaymasız sınır şartı' olarak Navier-Stokes denklemlerinde tanımlanır. Duvar üzerinde duvara paralel eksen x ve dik eksen y eksenlerindeki hızlar 0 olarak kabul edilir. ( $u=w=0$ ) Bu yüzden, yoğunluk ve basınç değerleri de 0 olarak ayarlanır.

#### Bloklar arası ara yüz sınır şartları

Analiz alanı, farklı bloklarda oluştuğu için, bu blokların birbirine olan yüzeylerinde ara yüz olarak tanımlanır, böylelikle geçişlerde ki aksamalara izin verilmemiş olur.

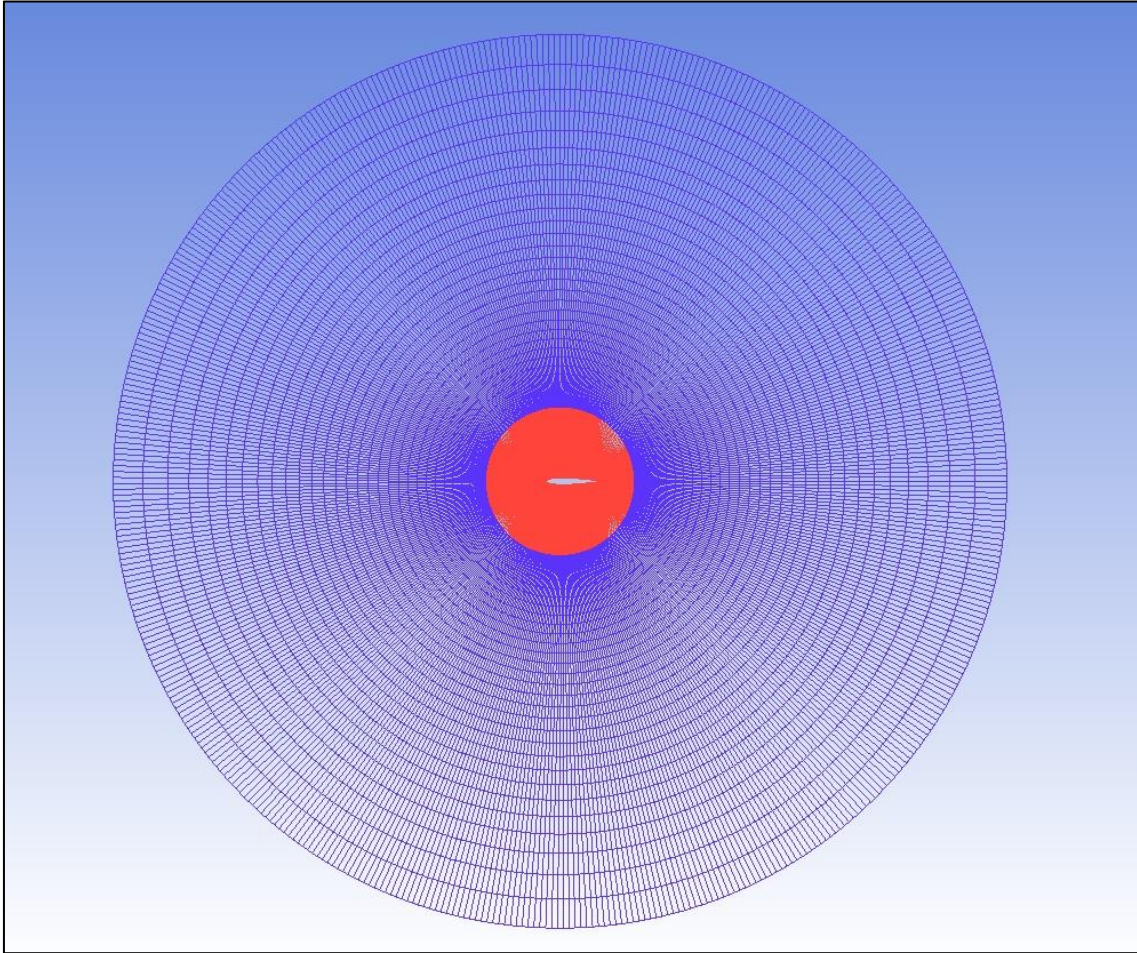
### Serbest alan sınır şartları

Çözüm alanında kalan bölgelerdeki akış x ekseninde hız değeri belirtilerek, y ekseninde 0 olarak tanımlanmıştır.

### Sentetik jet alanı sınır şartları

Sentetik jet olarak tanımlanan bölümler içinde sınır şartları belirlenmiştir. Sentetik jetin oluşturduğu akış, sinüzoidal hız girişi olarak tanımlanmıştır [8].

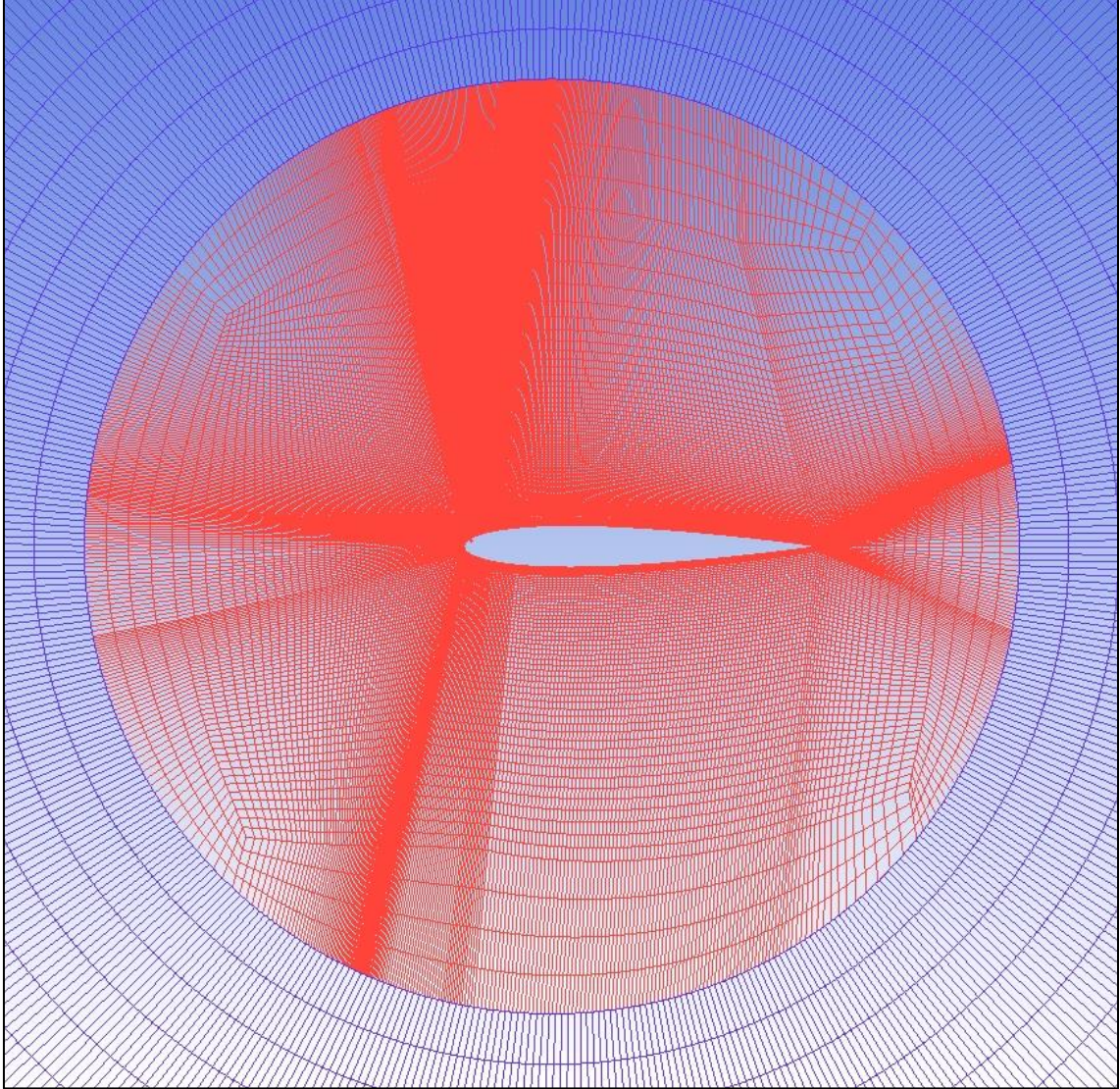
Şekil 4.3. de çözüm alanı dinamik ve statik bölümleri ile gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Çözüm alanı ağ yapısı

Yapısal ağda, bütün elemanlar aynı topolojiye sahiptir. Mesela bütün elemanlar aynı sayıda komşuya sahiptir. Yapısal olmayan ağda, elemanlar farklı topolojiye sahip olabilir. Mesela

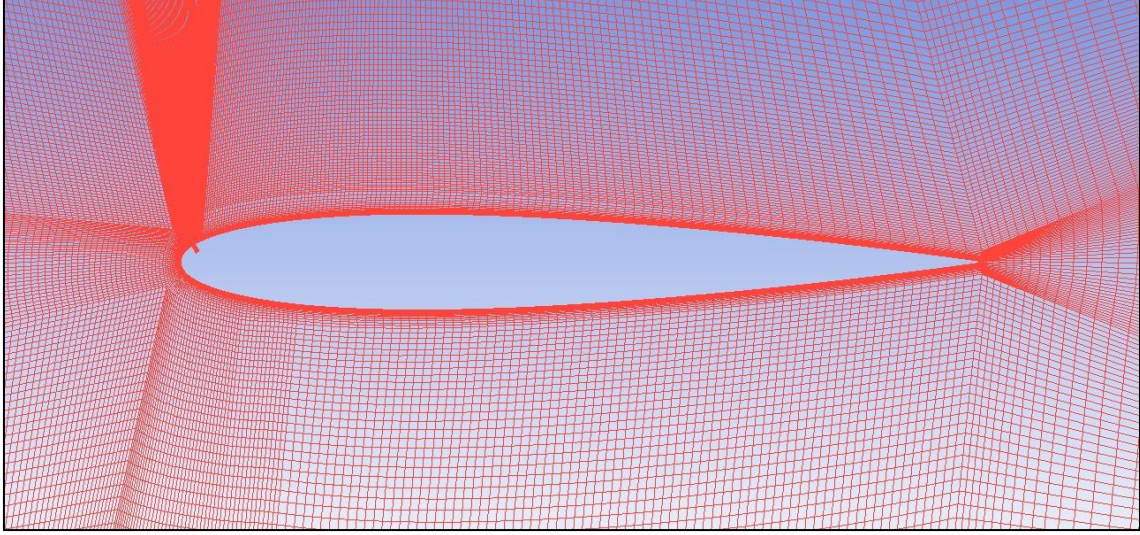
mesh üretilirken tanım aralığı rastgele üçgenlere bölünürse elde edilen bu ağ yapısal olmayan ağdır. Benzer bir üçgen ağına göre daha az hücre ile aynı doğrulukta sonuçlar elde edilebilmektedir. Daha az hücreye ihtiyaç duymaktadır. Daha hızlı yakınsama yapmaktadır. Bu ağ yapısının oluşturulmasında daha önceki deneyimler önem arz etmektedir. Şekil 4.4. de dinamik alan ağ yapısının daha fazla ağ atılmış yapısı görülmektedir.



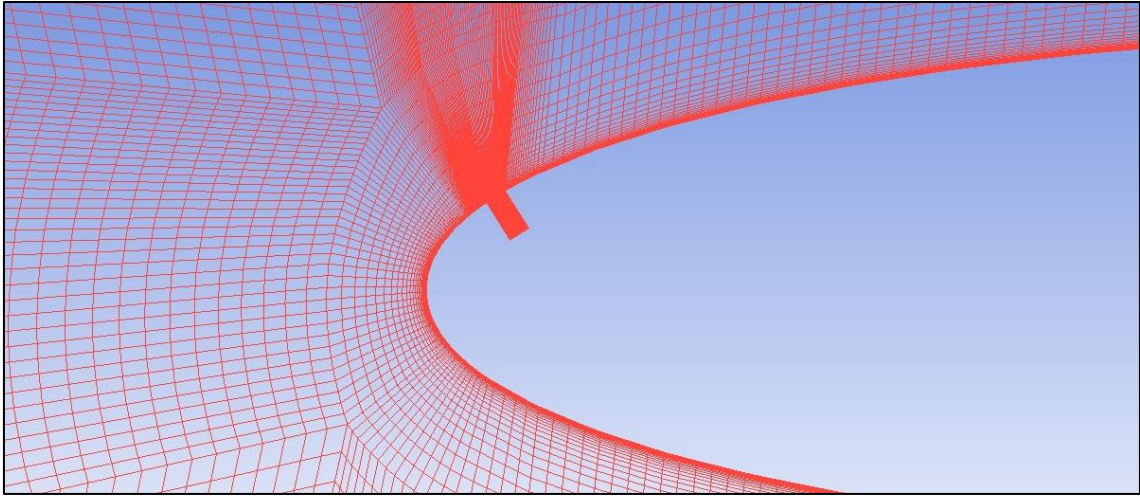
Şekil 4.4. Dinamik alan ağ yapısı

Bu çalışmadaki, akış analiz alanı kanat profili etrafında yapısal ağ ile oluşturulmuştur. Akış alanı, 16 kiriş boyu çapında dairesel O-tip yapısal ağ ile oluşturulmuş ve çözüm alanında eş merkezli dairesel olarak, 2,67 kiriş boyu çapında dairesel dinamik ağ yapısı oluşturulmuştur. O-tip ağ yapısının merkezi, kanat profili başlangıç noktasında kiriş boyunun 0,25 kat uzağı

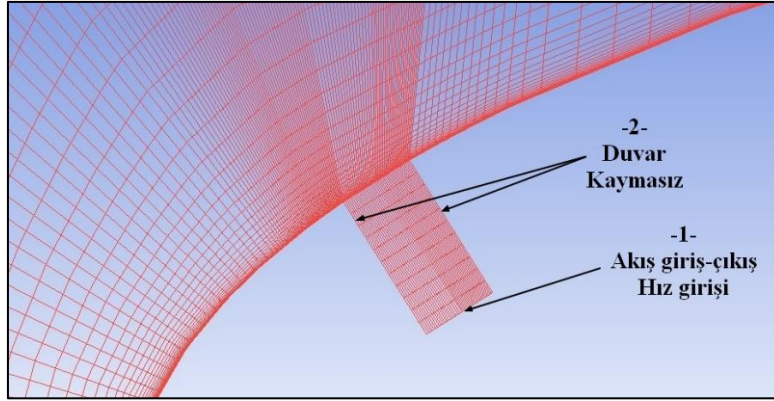
olarak belirlenmiştir. Dış çözüm ağ yapısı sabit olarak yapısal olarak oluşturulmuş ve akış giriş-çıkış şartlarının belirlenmesi için dış katman x-ekseni hizasında ikiye bölünmüştür.



Şekil 4.5. Kanat etrafında yoğunlaştırılmış ağ yapısı



Şekil 4.6. Sentetik jet sıklaştırılmış ağ yapısı-1



Şekil 4.7. Sentetik jet sıklaştırılmış ağ yapısı-2

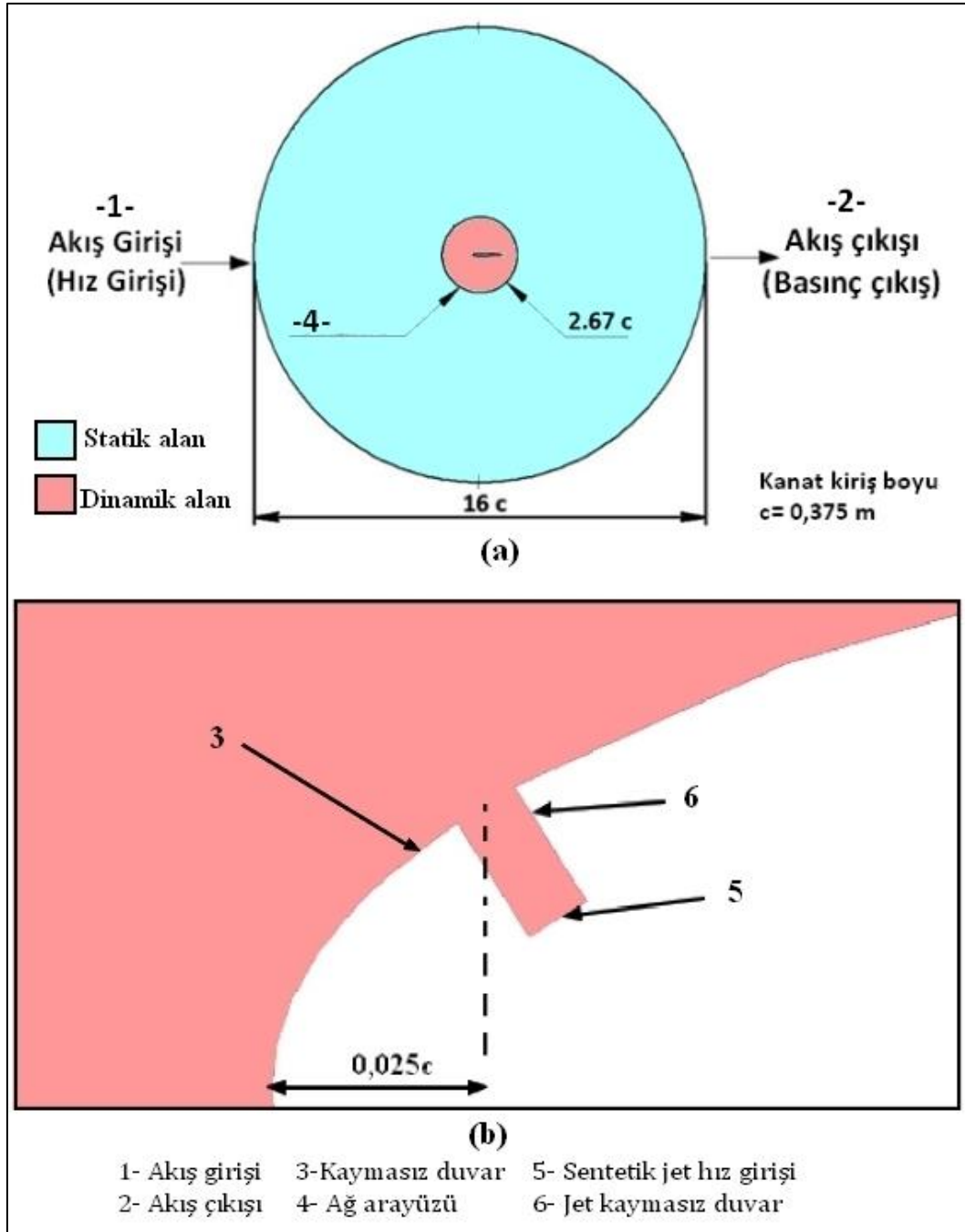
Şekil 4.8. de çözüm bölgesi ve sentetik jet sınır şartları gösterilmiştir. Çizelge 4.2. de çözüm bölgesinde sınır şartları detayları belirtilmiştir. Tüm analizlerde bu değerler sabittir. Çizelge 4.3. de sentetik jet sınır şartları detayları verilmiştir. Giriş hızı genliği ve frekansı analizlerde incelenen parametrelere göre değişmektedir.

Çizelge 4.2. Çözüm alanı sınır şartları

| Çözüm Alanı Sınır Şartları |              |                                                              |                                                          |
|----------------------------|--------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| No                         | Sınır        | Sınır Şartları                                               | Türbülans Sınır Şartları                                 |
| 1                          | Giriş        | Giriş Hızı<br>$Re=500.000$<br>( $u=19,48$ m/s,<br>$v=0$ m/s) | %0,5 Türbülans Yoğunluğu<br>( $I=0,5$ , $\mu_t/\mu=10$ ) |
| 2                          | Çıkış        | Çıkış Basıncı<br>101,325 kPa<br>( $P_0=101,325$ kPa)         | %5 Türbülans Yoğunluğu                                   |
| 3                          | Duvar        | Kaymasız<br>( $u=0$ )                                        | -                                                        |
| 4                          | Temas Yüzeyi | Ara yüz                                                      | Ara yüz                                                  |

Çizelge 4.3. Sentetik jet sınır şartları

| Sentetik Jet Sınır Şartları |       |                                    |                                                      |
|-----------------------------|-------|------------------------------------|------------------------------------------------------|
| No                          | Sınır | Sınır Şartları                     | Türbülans Sınır Şartları                             |
| 5                           | Giriş | Giriş Hızı<br>Zaman bağlı değişken | %5 Türbülans Yoğunluğu<br>( $I=5$ , $\mu_t/\mu=10$ ) |
| 6                           | Duvar | Kaymasız                           | -                                                    |



Şekil 4.8. (a) Çözüm bölgesi sınır şartları (b) Sentetik jet sınır şartları

Aerodinamik katsayılar; kaldırma katsayısı ve sürüklenme katsayısı aşağıdaki formüllerle hesaplamalar yapılmıştır.  $L$ , kaldırma kuvveti,  $D$  sürüklenme kuvveti,  $M$  moment,  $S$  kanat yüzey alanı,  $q_\infty$  dinamik basıncı simgelemektedir.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho cv^2} \quad (4.21)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho c v^2} \quad (4.22)$$

$$C_M = \frac{M}{q_\infty S c} \quad , \quad q_\infty = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (4.23)$$

#### 4.4. UDF Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon

Kullanıcı tanımlı fonksiyonlar ANSYS Fluent 'in ticari kodlarının geliştirilmesi için kullanılan çözümü programlayan alt programlardır [32]. Bu alt programlar, giriş-çıkış koşulları, malzeme özellikleri ve hareketli ağ yapıları veya akış çözüm alanlarının özel olarak tanımlanmalarında kullanılırlar [33]. UDF aynı anda birden fazla işlev olarak programlanabilir. Bunun için detaylı bilgilere [33] numaralı kaynaktan ulaşılabilir. Bu çalışmada, UDF alt programının kullanım fonksiyonları, sentetik jet sınır şartları, hız girişi olarak tanımlanmıştır. Hız giriş profili sinüzoidal olarak tanımlanarak, belirli frekans ve genlikler bu hız profiline tanımlanmıştır.

## 5. SAYISAL SONUÇLARIN DOĞRULANMASI

Kanat profilinin sabit hücum açısı ile yapılan akış analizlerindeki ağ yapısının doğrulanması amacı ile Luo D. H. ve arkadaşlarının çalışmalarında yapılan analizler incelenmiştir [12]. Çalışma sonuçları yapılan karşılaştırmalarda, analiz sonuçları ile uyumluluk göstermektedir.

Bu analizlerde, sentetik jet, kanat kiriş boyunun %2,5 boyuna yerleştirilmiş, jet genişliği %0,5 kanat kiriş boyu kadar, jet derinliği ise %1,0 kanat kiriş boyu olarak tasarlanmıştır. Luo D. H. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki analizlerinin doğrulamaları için Critzos C. C. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaları ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada, 2 boyutlu olarak NACA 0012 kanat profili kullanılmış, tutunma kaybı durumu öncesi hücum açısındaki türbülanslı akış çözümleri yapılmıştır. Akış ayrılması sonucu oluşan düzensiz akış, periyodik salınımlı emme-üfleme yapan sentetik jet kullanılarak akış kontrol edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada, farklı hücum açılarında farklı jet frekanslarının analiz üzerindeki etkisi incelenmiş, kaldırma katsayısı ve sürüklenme katsayısında aerodinamik gelişmeler kaydedilmiştir.

Doğrulama çalışmalarında jet frekansı olarak, hücum açısı  $18^\circ$ ,  $f^+ = 0.6$ , Re sayısı  $5 \times 10^5$  olarak seçilmiştir. Türbülans akışın çözümü için, kararsız Reynolds-Ortalama Navier-Stokes denklemleri kullanılmıştır, türbülans modeli olarak Menter'in k- $\omega$  SST türbülans modeli kullanılmıştır.

### 5.1. HAD Modelinin Doğrulanması

Bu bölümde, insansız hava araçlarında kullanılan kanat profili üzerindeki akışın modellenmesine yönelik olarak geliştirilen Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modeli, üç farklı durum için literatürde mevcut bulunan sonuçlar kullanılarak test edilmiştir.

#### 5.1.1. Salınımsız kanat üzerindeki akış doğrulama analizleri

Bu bölümde, koordinatları airfoilttools websitesi [4]'nden temin edilen kanat profilinin geometrisi oluşturularak, kanat üzerindeki akışın doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir. Bu

kapsamda deneysel veriler olarak; kararlı düzendeki akış analizi için Airfoiltools websitesinden NACA 0012 kanat profili için elde edilen deneysel veriler temin edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile sayısal olarak gerçekleştirilen bu çalışmanın analiz sonuçları Çizelge 5.1’de sunulmuştur. Deneylerde, NACA0012H modifikasyonlu kanat profili kullanılarak gerçekleştirilen SAND80-2114 kodlu test sonuçları Sandia Raporu’nda sunulmuştur [4].

Salınımsız kanat üzerindeki akışın doğrulama analizlerinde, [31] nolu referanstan temin edilen 2-Boyutlu NACA 0012 kanat profili geometrisi kullanılmıştır. Kanat profil ölçüleri [4] nolu referanstan temin edilmiştir. Doğrulama analizleri, kanat profilinin  $0^\circ$  hücum açısındaki kanat üzerindeki aerodinamik akış için gerçekleştirilmiştir.

Bu analizde kullanılan parametrelerin değerleri aşağıdaki sunulmuştur:

- Akış Çıkış Basıncı: 101,325 kPa
- Dinamik çözüm alanı çapı: 2,67c
- Çözüm alanı çapı: 16c
- Kanat giriş boyu:  $c=0,375$  m
- Duvar sınır şartı: Kaymasız
- Giriş türbülans yoğunluğu: %0,05
- Reynolds Sayısı: 50.000 - 1.000.000

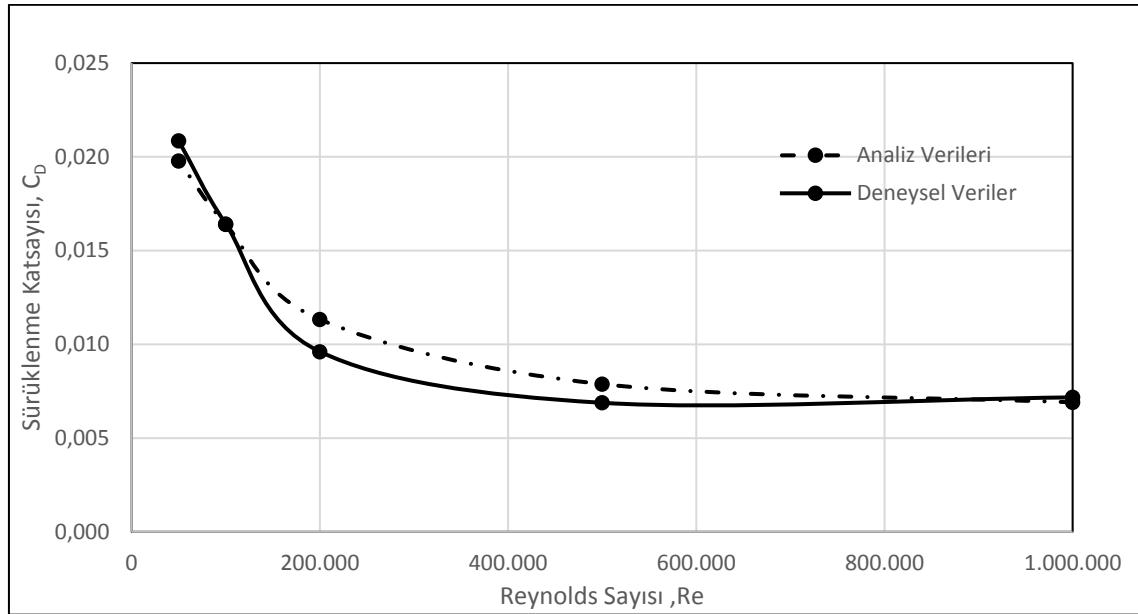
Bu karşılaştırmada, farklı Reynolds sayılarındaki (karakteristik hız olarak serbest akış hızı, karakteristik uzunluk olarak kanatçık boyu kullanılmıştır,  $Re=\rho Uc/\mu$ ) sürüklenme katsayısı değerleri karşılaştırılmıştır. Hücum açısı  $0^\circ$  olduğu için kaldırma katsayısı, simetrik kanat profillerinde sıfıra yakın olarak oluşmaktadır. Bu yüzden karşılaştırmalarda sürüklenme katsayıları kullanılmıştır. Şekil 2.1. de NACA 0012 kanat profili, en, boy ve ölçek oranı ile birlikte gösterilmektedir.

Çizelge 5.1.de  $0^\circ$  hücum açısında farklı Reynolds sayılarının yapılan deneysel sürüklenme kuvvetleri ile aynı Reynolds sayılarında yapılan analiz çalışmalarının sürüklenme katsayıları verilmiştir [31].

Çizelge 5.1. Deneysel ve analiz sonuçların karşılaştırma tablosu

| Hız Değerleri   |         | Analiz Verileri          |                             | Deneysel Veriler            |
|-----------------|---------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Reynolds Sayısı | V (m/s) | Sürüklenme Kuvveti, D(N) | Sürüklenme Katsayısı, $C_D$ | Sürüklenme Katsayısı, $C_D$ |
| 1.000.000       | 38,96   | 2,4062                   | 0,0069                      | 0,0072                      |
| 500.000         | 19,48   | 0,6863                   | 0,0079                      | 0,0069                      |
| 200.000         | 7,79    | 0,1579                   | 0,01133                     | 0,0096                      |
| 100.000         | 3,89    | 0,0572                   | 0,01640                     | 0,01642                     |
| 50.000          | 1,95    | 0,0172                   | 0,01978                     | 0,02085                     |

Şekil 5.1. de aynı şartlarda karşılaştırılmış deneysel veriler ile yapılan analiz çalışmasının değerleri grafik üzerinde gösterilmektedir [31].



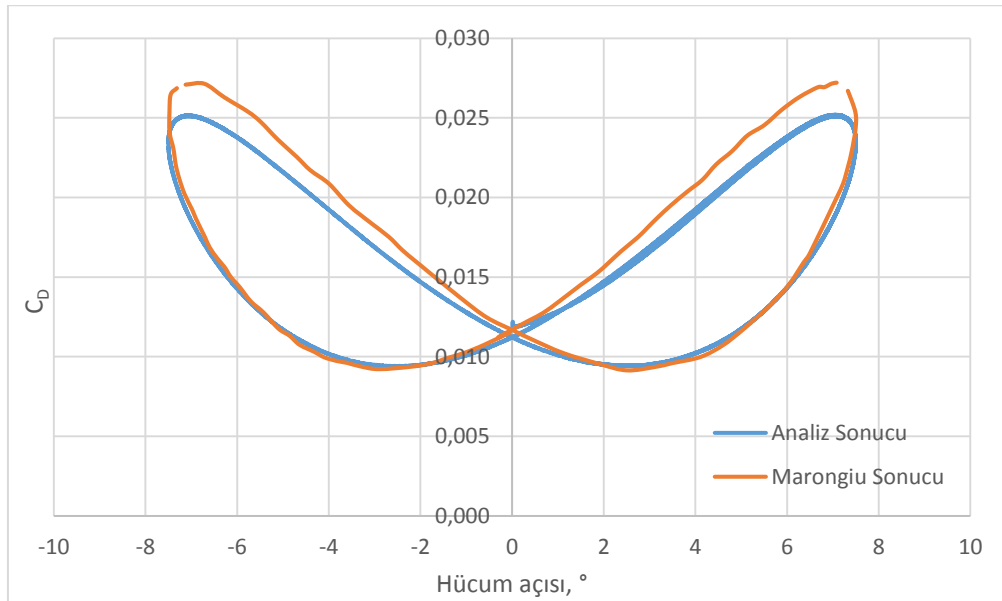
Şekil 5.1. Analiz ve deneysel sürüklenme katsayıları karşılaştırması

Grafikte  $C_D$  gelişiminden de görülmektedir ki  $2 \times 10^5$  değerinden itibaren farklılaşmalar mevcuttur.  $2 \times 10^5$ 'ten büyük Reynolds sayıları için, kanat profili performansı önemli ölçüde iyileşir ve kanat profillerinin çoğunda, rejim türbülanslıdır [34]. Grafik hatlarından karşılaştırmalara göre, değerler uyumluluk göstermektedir. Analizleri yapılacak, Reynolds sayısı  $5 \times 10^5$  olarak karar verilmiştir. Daha sonraki, sentetik jetli kanat profilinin salınımlı ve sabit hücum açısında da aynı Reynolds sayısı ile analizler yapılmıştır.

Kaynakçadaki [9]  $C_D$ ,  $C_L$  ve hücum açısı değerlerinin bulunduğu grafikte, deneysel ve analiz verileri belirtilmiştir. Bu karşılaştırmada, kaldırma ve sürüklenme değerlerinin hücum açısının artış etkisi ile verdiği tepkiler karşılaştırılmıştır.  $14^\circ$  hücum açısına kadar olan bölgede tüm çalışmaların uyum içinde olduğu görülmektedir. Yaklaşık  $14^\circ$  hücum açısından sonraki uyumsuzlukların sebebi, tahmin edildiği sebeple kanat üst yüzeyinde gerçekleşen akış ayrılması ve türbülanslı bir akış oluşumunun başlamasıdır. Bu hücum açısından sonra, kaldırma kuvvetinde düşüşler ve sürüklenme kuvvetinde artışlar görülmektedir. Sürüklenme kuvveti  $12^\circ$  hücum açılarına kadar sifıra yakın seyrederken, oluşan akım ayrılmaları ve girdap oluşumları ile ani artış göstermektedir.

### 5.1.2. Salınlı kanat üzerindeki akış doğrulama analizleri

Salınlı kanat profilinin çalışma şartları olarak; 135.000 Reynolds sayısında, kanat salınımı  $0^\circ$  hücum açısı etrafında  $\pm 7,5^\circ$  olacak şekilde  $15^\circ$  açı genliğinde, 0,05 indirgenmiş kanat salınım frekansında analizler yapılmıştır [35]. Marongiu'nun sayısal olarak gerçekleştirmiş olduğu çalışmadan elde edilen sürüklenme katsayısı ile bu çalışma sonucunda elde edilen sürüklenme katsayısı Şekil 5.2'de karşılaştırılmıştır. Sürüklenme katsayılarının hücum açısına göre değişim grafiği Şekil 5.2. de gösterilmiştir. Sürüklenme katsayılarının histerezisi teorik değerlerle uyum sağlamaktadır [36].



Şekil 5.2. Marongiu ve analiz sürüklenme katsayılarının karşılaştırılması

### 5.1.3. Sentetik jet uygulanmış kanat üzerindeki akış doğrulama analizleri

Bu bölümde, k- $\omega$  SST türbülans modeli ile yapılan kararsız akış analizleri, sabit hücum açısında sentetik jet uygulamaları yapılarak gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen veriler, Luo D. H.ve arkadaşlarının yaptığı analizlerde alınan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Türbülans modeli, Menter'in k- $\omega$  SST türbülans modeli olarak çalışılmış, 18° sabit hücum açısında jet doğal dökülme frekansı  $f^+=0,6$  olarak hesaplanmıştır. NACA 0012 kanat giriş boyuna göre geometrisi oluşturulan sentetik jet ölçüleri: %1,0 giriş boyu derinliğinde ve %0,5 giriş boyu genişliğinde, yüzeye 90° olacak şekilde hız giriş fonksiyonu olarak UDF ile tanımlanmıştır. Sentetik jet geometrisi, hücum kenarından kanat giriş uzunluğunun %2,5 uzaklığında mesafede, kanat üst profiline tanımlanmıştır. Bu çalışmadaki, doğal dökülme frekansı 0,6 alınırken bu değer Strouhal sayısı, 0,1854 olarak bulunmuştur. Bu değer, doğrulama için belirtilen Roshko, A. Makalesindeki 0,17-0,19 değerleri arasında olduğu belirtilerek kabul edilmiştir. Jet salınım frekansı, sinüzoidal hız girişi olarak tanımlanmıştır [12].

$$U(t) = U_j \sin(2\pi f t) \quad (5.1)$$

$$f^+ = \frac{f_s c}{U_\infty} \quad (5.2)$$

$$St_{\sin\alpha} = \frac{f_s \cdot c \cdot \sin\alpha}{U_\infty} \quad (5.3)$$

$$c_\mu = \frac{2\left(\frac{b}{c}\right)}{(U_j/U_\infty)^2} \quad (5.4)$$

Denklemlerde  $f_s$  jet çalışma frekansı, c kanat profili giriş boyu,  $U_\infty$  serbest alan akış hızı, b jet genişliği,  $U_j$  jet akış hızı,  $\omega$  açısal frekans olarak tanımlanmıştır. Sentetik jet hız profili, sinüzoidal olarak tanımlanmıştır.

Bu bölümde akışın kararlı hala gelmesi için kararlı akış olarak başlatılarak, belirlenen çözüm alanı içerisinde akışın başlaması sağlanmıştır. Akış değerleri, ortalama olarak sabitlenen katsayılarla geldikten sonra, akış tipi ‘geçiş’ olarak seçilmiştir. Bu aşamada, kanat profilinin

salınımı UDF ile sabit hızda  $18^{\circ} \pm 4^{\circ}$  genliğinde sabit olacak şekilde tanımlanmıştır. İndirgenmiş salınım frekansı formülü denklem 5.5.'de gösterilmiştir.

$$k = \frac{\omega c}{2U_{\infty}} \quad (5.5)$$

$$vel = vel_{max} * \sin(\omega t) \quad (5.6)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (5.7)$$

Açısal hız denklem 5.7 deki formül ile tanımlanmıştır. Bu frekans değerler, indirgenmiş frekans değerlerinden dönüşüm ile girilir.  $k$ , indirgenmiş kanat salınım frekansı,  $\omega$  açısal salınım hızıdır.

Mesafeye bağlı türevler, ikinci dereceden yukarı doğru sarma şeması kullanılarak ayrılır, zaman integrasyonu birinci dereceden tamamen açık bir şema kullanır.

Operatör algoritmasının bölünmesiyle oluşan basınç katsayısı, bitişiği ile basınç-hız eşleşmesi ve kararsız hesaplamaların etkinliğini arttırmak amacıyla yapılan çarpıklık düzeltmesi için kullanılır [12].

Şekil 4.6 'da Luo ve arkadaşlarının makalesindeki;  $18^{\circ}$  sabit hücum açısında, farklı boyutsuz jet frekansı ve boyutsuz jet genlik değerlerinde kaldırma ( $C_L$ ) ve sürüklenme katsayıları ( $C_d$ ) değerleri (kesikli çizgiler sentetik jet kontrolü olmadığı durumları göstermektedir).

Kaynakça [12] de yapılan çalışmadaki problem tanımı aşağıdaki gibidir:

- NACA 0012 kanat profili 500.000 Reynolds sayısında gerçekleştirilmiştir.
- Sentetik jet uygulamasının etkileri, boyutsuz jet frekansı ve boyutsuz jet genliği değiştirilerek incelenmiştir.
- Aerodinamik katsayılar,  $18^{\circ}$  hücum açısında gerçekleştirilmiştir.
- Sentetik jet geometrisi, kanat profilinin %1,0 derinlikli, %0,5 genişlikle hücum kenarından %2,5 giriş boyu uzaklıkta üst yüzeye yerleştirilmiştir.

- İncelenen parametreler;  $f_e^+$  0,0-5,0 aralığında,  $U_j^+$  0,1-4,0 aralığında analizler gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda parametre aralıkları belirtilen şartların uygulandığı analizlerden bazı parametreler seçilerek, aynı sonuçlara ulaşılmaya çalışılmıştır. Bu çalışma, oluşturulan model ile kaynakçadaki sentetik jet uygulanan kanatın verdiği tepkilerin uyumu araştırılmıştır. Bu kapsamda, grafiklerde sonuçları verilen  $C_L$  ve  $C_D$  değerlerinin, aynı parametreler ile analizleri yapılan  $C_L$  ve  $C_D$  değerleri Çizelge 5.2 de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.2. de Luo çalışmasındaki kaldırma ve sürüklenme katsayısı ile bu çalışmada yapılan veriler karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.2. Luo sonuçları ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması

| Parametre |         | Luo D.H. [12] |       | Analiz Sonuçları |       | Hata Oranı |       |
|-----------|---------|---------------|-------|------------------|-------|------------|-------|
| $U_j^+$   | $f_e^+$ | $C_L$         | $C_D$ | $C_L$            | $C_D$ | $C_L$      | $C_D$ |
| 2         | 1,5     | 1,05          | 0,196 | 1,02             | 0,191 | 2,9%       | 2,6%  |
| 1         | 1,5     | 1,0513        | 0,198 | 1,03             | 0,185 | 2,0%       | 6,6%  |
| 0,5       | 1,5     | 1,026         | 0,203 | 1,11             | 0,209 | -8,2%      | -3,0% |
| 0,3       | 0,5     | 1,1325        | 0,351 | 1,23             | 0,300 | -8,6%      | 14,6% |
| 0,3       | 1,5     | 1,009         | 0,213 | 0,97             | 0,203 | 4,3%       | 4,7%  |

Sonuçlar, farklı genlik değerlerinde ve frekans değerlerinde, Luo D.H. ve arkadaşlarının çalışmalarındaki sonuçları ile bu çalışmada yapılan analiz verilerinin uyum içinde olduğu göstermektedir [12].



## 6. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI

### 6.1. Giriş

Zamana bağlı çözümler, kararlı durum çözümleri kullanılarak başlatılmıştır. Zamana bağlı çözümler, aerodinamik katsayılar da sabit veya periyodik bir davranış gözlenene kadar ilerletilmiştir. Akış alanı çözümleri kullanılarak basınç katsayısı dağılımı, aerodinamik yükler, duvar kayma gerilmeleri elde edilmiştir.

Ağ yapısı ICEM programı ile yapılan analizlerle belirlenmiştir. Doğrulama çalışmaları çeşitli atak açılarıyla akış kontrollü ve kontrolsüz durumlarda gerçekleştirilmiştir. Sabit hücum açısında, farklı Reynolds sayılarında analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.  $5 \times 10^5$  Reynolds sayısında yapılan analizler ile de doğrulama sağlanmıştır.

Doğrulama çalışması ile birlikte gerçekleştirilen ağ yapıdan bağımsızlık testleri, sabit ve hareketli ağ bölgelerindeki ağ sayıları değiştirilerek yapılmıştır. Kaldırma ve sürüklenme katsayıları karşılaştırılmış ve çözümünün ağ sayısından bağımsız hale geldiği ağ sayısı optimum olarak seçilmiştir. Bu çalışmadaki, doğrulama çalışmaları jetsiz durum için  $0^\circ$  hücum açısında, jetli kanat profili içinse Luo ve arkadaşlarının yaptığı sabit hücum açılarında değişken jet frekansı ve jet genliği çalışmaları ile yapılmıştır [12]. Bu çalışmada yapısal olarak oluşturulan ağ yapısının yaklaşık tamamının ortogonal kalite oranı %80 nin üzerinde olmasına dikkat edilmiştir. Dinamik alan ağ yapısı Şekil 4.4. de gösterilmiştir.

Parametrik analizler, jet frekansı, jet genliği ve kanat salınımı indirgenmiş frekansının değişimlerinin, kaldırma katsayısının sürüklenme katsayısına olan en yüksek oranlarına olan etkilerini ölçmek ve en yüksek oran için gerekli koşulları belirlemek için oluşturulmuştur. Parametrik çalışmalarda, Reynolds sayısı, jet konumu, jet açısı ve jet genişliği sabit değerlerde tutulmuştur. Kanat profilinin genliği  $8^\circ$  olarak belirlenmiş ve hücum açısı  $18^\circ \pm 4^\circ$  olacak şekilde salınımlar gerçekleştirilmiştir.

Kaynakça [4] de, 500.000 Reynolds sayısında NACA 0012 kanat profili ile yapılan VAWT için ‘Sandia SAND80-2114’ kodlu çalışmalarda,  $0^\circ \pm 20^\circ$  aralıklarında anlık sabit hücum açılarındaki kaldırma katsayıları, sürüklenme katsayıları ve moment katsayıları

incelenmiştir.  $C_L$  değerleri incelendiğinde sabit duruma göre, yaklaşık  $14^\circ$  hücum açısından sonra artışın azalmaya başladığı görülmektedir.  $15^\circ$  civarında ise değerler düşüş göstermeye başlamıştır. Bu düşüşe akış kopmaları ile bunun ardından oluşan türbülanslı akış sebep olmaktadır. Kaldırma katsayısındaki düşüşün yanı sıra, artışa geçen sürüklenme katsayısı  $C_L/C_D$  oranının düşmesine neden olmaktadır.  $18^\circ \pm 4^\circ$  salınımın tercih edilmesi bu bölümlerden itibaren başlayan kayıpların giderilmesi amacıyla tercih edilmiştir.

Ortalama hücum açısı ve salınım genliği aralıkları, statik tutunma kaybı açısının içindeki, etrafındaki ve etrafındaki salınım koşullarını tamamen kapsayacak şekilde seçildi [34]. Bu kapsamda, sabit durumda yaklaşık  $14^\circ$  de tutunma kaybı noktasına ulaşan kanat için, salınımlı durumdaki tutunma kaybı noktası  $14^\circ$ 'nin üzerindeki durumlarda hesaplamaya katılmıştır.

Parametrik çalışmada, 'Varyans Analizi Yöntemi' uygulanmıştır. Bu yöntemle, Taguchi serisinde oluşturulan faktörlerin etkileri grafik olarak elde edilmiştir. Bu yöntemde, parametrelerin etkileri ortalaması grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Bu yöntemin kullanılmasındaki en önemli neden, sonuçlardaki değişime etki eden faktörlerin seviyelerinin kombinasyonunu tespit etmektir [37].

Bu üç parametre arasındaki ilişkiler, taguchi serisi parametrik analiz tablosu oluşturularak; 3 değişken ve herbiri ile 5 parametre belirlenerek oluşturulmuştur [37]. Bu parametre değerleri Çizelge 2.1. de belirtilmiştir.

Parametrik çalışmaların yapıldığı, boyutsuz jet frekansı, boyutsuz jet genliği ve kanat salınım frekansı için gerçek değerler, Çizelge 6.1. de belirtilmiştir.

Tablodaki sembollerin açıklamaları;  $f_e^+$  boyutsuz jet frekansı,  $U_j^+$  boyutsuz jet genliği,  $k$  indirgenmiş kanat salınım frekansı,  $P1$ ,  $P2$ ,  $P3$  Taguchi analizi tablosu şablon değerlerini sembolize etmektedir.

Çizelge 6.1. Parametrik boyutsuz değerler ve gerçek değerler

| No. | P1 | P2 | P3 | $f_e^+$ | $f_e$ (Hz) | $U_j^+$ | $U_j$ (m/s) | $k$  | $f_a$ (Hz) |
|-----|----|----|----|---------|------------|---------|-------------|------|------------|
| 1   | 1  | 1  | 1  | 0,5     | 15,58      | 0,5     | 9,74        | 0,1  | 10,39      |
| 2   | 1  | 2  | 2  | 0,5     | 15,58      | 1,0     | 19,48       | 0,2  | 20,77      |
| 3   | 1  | 3  | 3  | 0,5     | 15,58      | 2,0     | 38,95       | 0,5  | 51,94      |
| 4   | 1  | 4  | 4  | 0,5     | 15,58      | 4,0     | 77,90       | 1,0  | 103,87     |
| 5   | 1  | 5  | 5  | 0,5     | 15,58      | 0,2     | 3,89        | 0,15 | 15,58      |
| 6   | 2  | 1  | 2  | 1,0     | 31,16      | 0,5     | 9,74        | 0,2  | 20,77      |
| 7   | 2  | 2  | 3  | 1,0     | 31,16      | 1,0     | 19,48       | 0,5  | 51,94      |
| 8   | 2  | 3  | 4  | 1,0     | 31,16      | 2,0     | 38,95       | 1,0  | 103,87     |
| 9   | 2  | 4  | 5  | 1,0     | 31,16      | 4,0     | 77,90       | 0,15 | 15,58      |
| 10  | 2  | 5  | 1  | 1,0     | 31,16      | 0,2     | 3,89        | 0,1  | 10,39      |
| 11  | 3  | 1  | 3  | 1,5     | 46,74      | 0,5     | 9,74        | 0,5  | 51,94      |
| 12  | 3  | 2  | 4  | 1,5     | 46,74      | 1,0     | 19,48       | 1,0  | 103,87     |
| 13  | 3  | 3  | 5  | 1,5     | 46,74      | 2,0     | 38,95       | 0,15 | 15,58      |
| 14  | 3  | 4  | 1  | 1,5     | 46,74      | 4,0     | 77,90       | 0,1  | 10,39      |
| 15  | 3  | 5  | 2  | 1,5     | 46,74      | 0,2     | 3,89        | 0,2  | 20,77      |
| 16  | 4  | 1  | 4  | 2,0     | 62,32      | 0,5     | 9,74        | 1,0  | 103,87     |
| 17  | 4  | 2  | 5  | 2,0     | 62,32      | 1,0     | 19,48       | 0,15 | 15,58      |
| 18  | 4  | 3  | 1  | 2,0     | 62,32      | 2,0     | 38,95       | 0,1  | 10,39      |
| 19  | 4  | 4  | 2  | 2,0     | 62,32      | 4,0     | 77,90       | 0,2  | 20,77      |
| 20  | 4  | 5  | 3  | 2,0     | 62,32      | 0,2     | 3,89        | 0,5  | 51,94      |
| 21  | 5  | 1  | 5  | 3,0     | 93,48      | 0,5     | 9,74        | 0,15 | 15,58      |
| 22  | 5  | 2  | 1  | 3,0     | 93,48      | 1,0     | 19,48       | 0,1  | 10,39      |
| 23  | 5  | 3  | 2  | 3,0     | 93,48      | 2,0     | 38,95       | 0,2  | 20,77      |
| 24  | 5  | 4  | 3  | 3,0     | 93,48      | 4,0     | 77,90       | 0,5  | 51,94      |
| 25  | 5  | 5  | 4  | 3,0     | 93,48      | 0,2     | 3,89        | 1,0  | 103,87     |

## 6.2. Jet Hızının Etkisi

Sentetik jet sinüzoidal hız çıkış parametrelerinden biri de jet akış genliğidir. Genel olarak, hesaplama katılırken, serbest akış hızının katsayısı olarak ifade edilir. Yani,  $U_j^+$  ifadesi  $U_\infty$  cinsinden yazılarak 6.1. denklemi ile dönüşüm yapılarak boyutsuz olarak kullanılır.

$$U_j^+ = \frac{U_j}{U_\infty} \quad (6.1)$$

Parametrik çalışmalar, salınım hareketlerinde çeşitli jet hızı değerlerinde uygulanmıştır. Kararlı, homojen, sinüzoidal üfleme-emme şeklinde hücum kenarının %2,5c uzaklıktaki jet bölümüne tanımlanmıştır. Analiz sonuçlarının, kaldırma katsayısı, sürüklenme katsayısı, basınç dağılımları ve akış ayrılmasına olan etkileri araştırılmıştır.

Jet genlik oranının artması ile jet çıkışlarındaki akışın artması beklenir. Bu yüzden, jet akışa daha yüksek oranda momentum akışı ekler ve daha iyi bir kontrol imkânı ortaya çıkar. Kaldırma kuvvetinde hızlı bir artış görülür. Jet genliği, serbest alan akış hızı cinsinden sinüzoidal olarak tanımlanır.

$$U_j(t) = U_j \sin(2\pi f t) \quad (6.2)$$

$U_d$  membran hızı,  $f$  çıkış frekansı,  $U_j$  jet açıklığından akış çıkış hızıdır.  $U_j$  momentum katsayısının tahmininde kullanılır. Kontrol baskınlığı oluşturmak için, indirgenmiş olarak kullanılan  $U_j^+$  oranı ile, başka bir sınır katmanını bozduğu noktaya kadar monoton olarak değiştirilir. Jet açıklığı, istenen çalışma parametrelerine göre düşünülerek, akış ayrılmasının olduğu bölüm hemen ilerisine yerleştirilir [38]. Böylece, akış üzerinde oluşturulan zorlama sanal akış alanından yüksek verim elde edilmesine çalışılır.

Bu çalışmada, tüm durumlar için Reynolds sayısı 500.000 değerinde sabitlenmiştir. Bu durumda serbest akış hızı, 19,48 m/s olarak tanımlanmıştır. Çözücüdeki genlik terimi, hız-girişi olarak atanmıştır. Kanat üzeri akış hızı sıfır kabul edilerek, ‘kaymasız duvar’ olarak hesaplanmıştır. Basınç-temelli Navier-Stokes denklemleri ile farklı hızlar için alınan, kaldırma ve sürüklenme tepkileri çizelgeler halinde belirtilmiştir. Bu parametrik çalışma ile daha önce yapılan anlık alınan kuvvet etkileriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, çeşitli jet

genlikleri ile çalışılmıştır. Bu genlikler, Luo D.H. ve arkadaşlarının çalışmalarında,  $18^\circ$  hücum açısında yapılan parametrik çalışmalarındaki geniş bir alanı kapsayacak şekilde seçilerek oluşturulmuştur [12]. Farklı jet hızları, serbest alan akış hızı cinsinden belirtilerek boyutsuz olarak uygulanmıştır ( $U_\infty$ ). Kararlı olarak, sabit frekans ve hızlarda emme-üfleme jet akışı, jet olarak tanımlanan bölümde uygulanmıştır. Jet hızı indirgenerek, Şekil 2.1. deki  $U_\infty$  değerleri ile çalışmalar yapılmıştır.

Makalede [12] elde edilen verilerle, analiz sonuçlarından elde veriler karşılaştırılmıştır.  $f^+=0,5$ 'in sabit olduğu durumda, artan jet frekansı ile birlikte, salınım frekansı da artırılmıştır. Bu iki sebeple, kaldırma katsayısında ve kaldırma katsayısı-sürüklenme katsayısı oranında gelişmeler karşılaştırmalı grafiklerden görülmektedir.  $U_j^+$  değerinin 4 olduğu durumda, indirgenmiş frekans değeri 1,0 olarak analiz yapılmıştır; bu durum için sürüklenme katsayısının kaldırma katsayısından daha yüksek artış göstermesi sebebiyle, sabit değerlere göre gelişme görülmemektedir.

#### $f_e^+ = 0,5$ sabit değerindeki çalışmalar:

Çizelge 6.2'de 0,5 sabit boyutsuz jet frekansında  $14^\circ$ - $22^\circ$  salınım yukarı hareketinde, ( $f_e^+$ ), değişken boyutsuz jet hızına ( $U_j^+$ ) ve indirgenmiş salınım katsayısına ( $k$ ) göre, kaldırma, sürüklenme katsayıları ve kaldırma/sürüklenme oranları görülmektedir.

Çizelge 6.2.  $f_e^+=0,5$  için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları

| Analiz No. | Parametreler |         |      | Yukarı hareket katsayıları |       |           |
|------------|--------------|---------|------|----------------------------|-------|-----------|
|            | $f_e^+$      | $U_j^+$ | $k$  | $C_L$                      | $C_D$ | $C_L/C_D$ |
| 5          | 0,5          | 0,2     | 0,15 | 0,252                      | 0,840 | 3,336     |
| 1          | 0,5          | 0,5     | 0,1  | 0,320                      | 1,263 | 3,950     |
| 2          | 0,5          | 1,0     | 0,2  | 0,286                      | 1,339 | 4,687     |
| 3          | 0,5          | 2,0     | 0,5  | 0,272                      | 1,421 | 5,223     |
| 4          | 0,5          | 4,0     | 1,0  | 0,456                      | 1,811 | 3,974     |

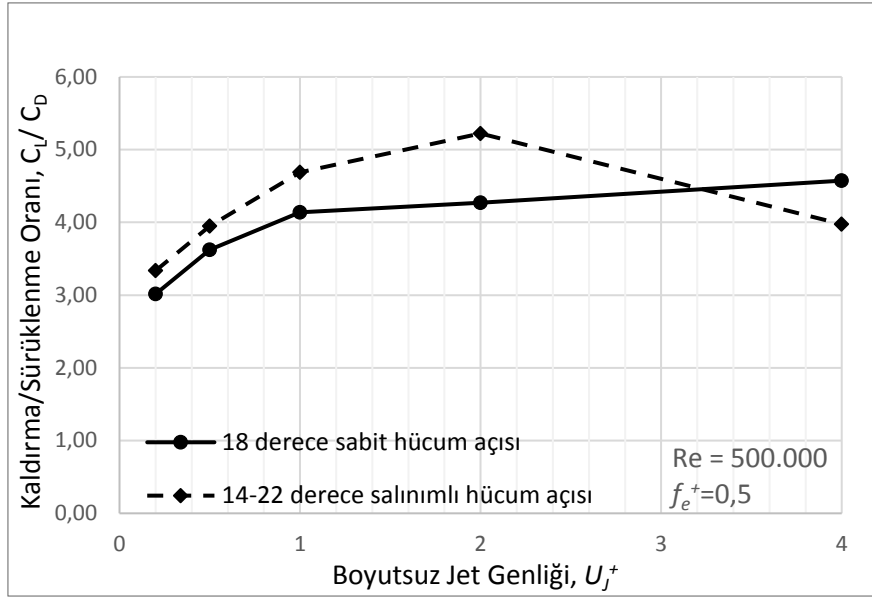
Çizelge 6.3.  $f_e^+=0,5$  için  $U_J^+$  değer aralıkları ve  $C_L$  üzerine baskın etkiler

| $U_J^+$ değer aralıkları ve baskın etkiler |           |           |           |         |
|--------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|---------|
| $f^+$                                      | 0,2-0,5   | 0,5-1,0   | 1,0-2,0   | 2,0-4,0 |
| 0,5                                        | $U_J^+$ ▲ | $\approx$ | $\approx$ | $k$ ▼   |

Çizelge 6.3. de gösterilen simgeler ;  $\approx$ : parametrelerin paralel bir etki göstermekte olduğunu belirtmektedir. ▲, ise yanında belirtilen parametrenin dominant etkisi altında kalarak ok yönünde sonuca etkili olduğunu göstermektedir.

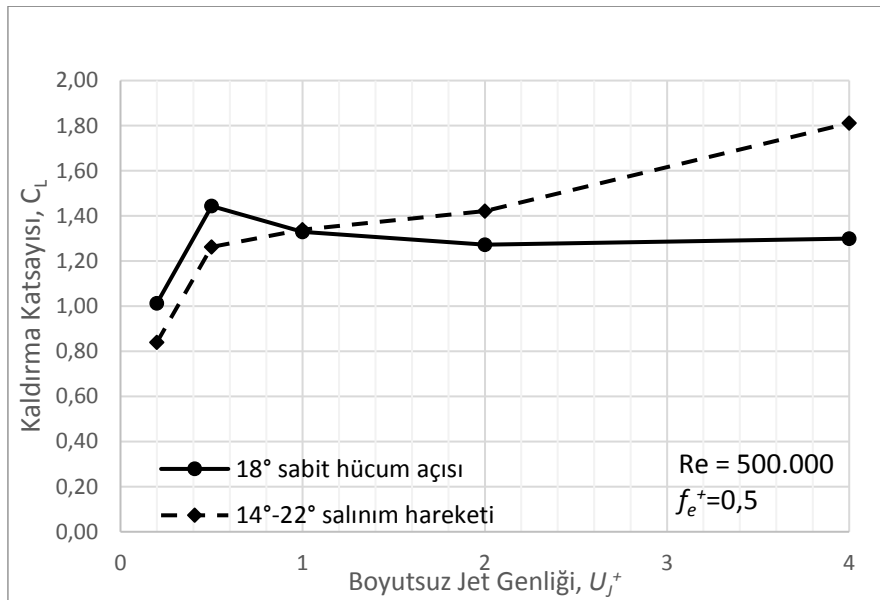
Çizelge 6.2. deki değerlerin  $f_e^+=0,5$  için yapılan analizleri incelendiğinde, 0,2-0,5  $U_J^+$  değerleri arasında bölümde, kaldırma/sürüklenme oranının artışının  $U_J^+$  etkisi ile olduğu görülmektedir. Kanat salınımına baskın davranarak, kaldırma/sürüklenme oranında artışı sağlamıştır.  $f_e^+=0,5$  sabit değerinde, 0,5-1,0 ve 1,0-2,0 aralığındaki jet hızı artışı, kanat salınımı ile paralel davranarak kaldırma/sürüklenme oranının artışına katkı sağlamışlardır.  $f_e^+=0,5$  sabit değerinde, 2,0-4,0 jet hızı akışına rağmen beklenen  $C_L/C_D$  artışı yerini düşüşe bırakmıştır. Aynı bölümde, salınım frekansının artış göstermesi akış karakteristiğindeki etkilerin bu sonuca neden olduğu tahminine yönlendirmektedir. Bu kısımdaki serbest akış çizgileri ile inceleme yapılması, daha çözümsel bir seçenek olacaktır.

Şekil 6.1, 6.2, 6.3 de boyutsuz jet frekans değeri;  $f_e^+=0,5$ , boyutsuz jet genliği;  $U_J^+$  değerleri 0,2-0,5-1,0-2,0-4,0 olarak belirtilmiştir.

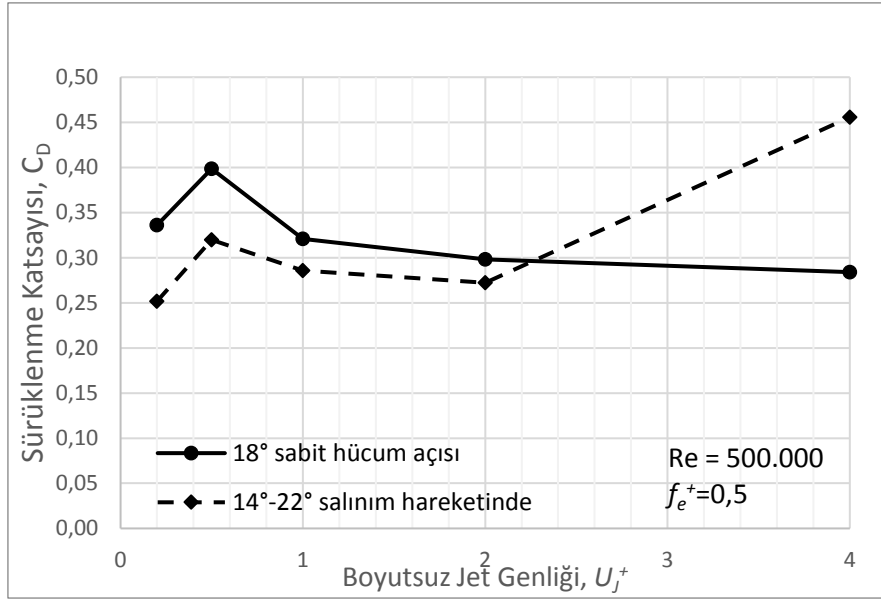


Şekil 6.1.  $f_e^+=0,5$  için yukarı yönlü harekette  $C_L/C_D$  karşılaştırmaları

Grafikteki düz çizgiler D.H. Luo ve arkadaşlarının sabit 18° hücum açısında yapılan analizlerin sonuçlarının göstermektedir. Kesikli çizgilerle gösterilen veriler, bu çalışmada 14°-22° arasından kanat salınım frekansının daha dahil olduğu verileri göstermektedir.

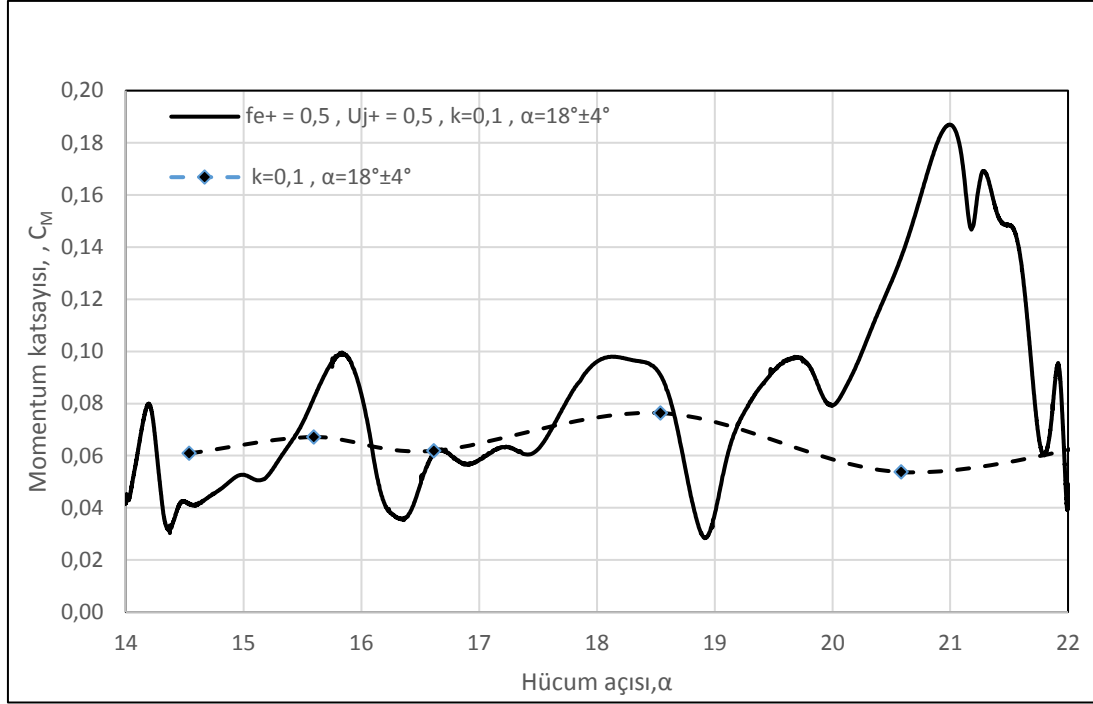


Şekil 6.2.  $f_e^+=0,5$  için yukarı yönlü harekette  $C_L$  karşılaştırmaları



Şekil 6.3.  $f_e^+ = 0,5$  için yukarı yönlü harekette  $C_D$  karşılaştırmaları

Şekil 6.4. de moment katsayısının hücum açısına göre değişimi görülmektedir. Bu veriler 1 numaralı analiz şartlarında uygulanmıştır. Kesikli çizgilerle belirtilen veriler kaynakça [39] daki deneysel verileri göstermektedir. Grafiklerdeki değerlere göre yaklaşık  $19,2^\circ$  hücum açısı değerine kadar stabiliteye katkı sağlanırken daha sonrasında olumsuz etki göstermektedir. Analiz sonuçlarının bu kadar inişli çıkışlı olmasının sebebi hem kanat salınımının hem de sentetik jetin moment katsayısına etkisi ile oluşmaktadır.

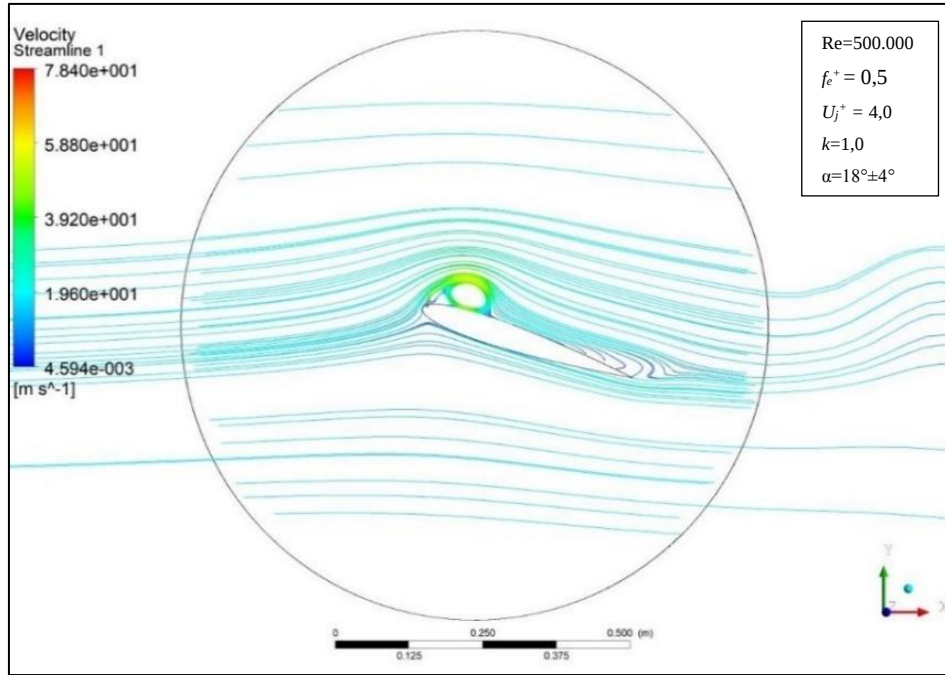


Şekil 6.4. Analiz çalışmasının ve deneyin moment katsayılarının karşılaştırılması

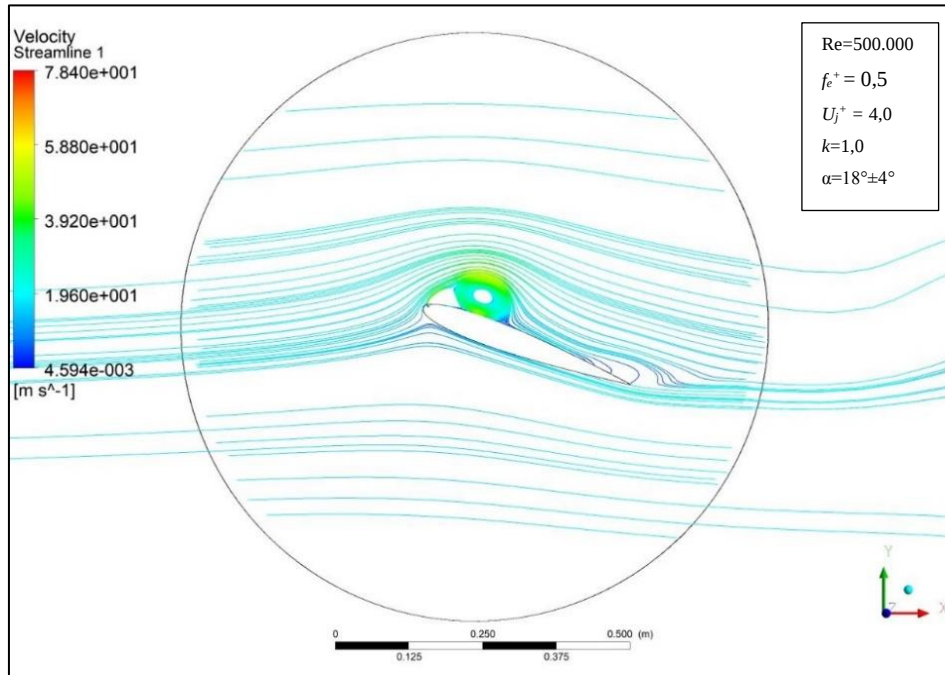
Yukarıdaki noktalarla belirtilen beş durum için salınım parametreleri ve jet parametreleri tabloda belirtilmiştir.

Jet genliğinin ve indirgenmiş frekansın ( $k$ ) ilk bölgelerde lineere yakın olarak arttığı görülmektedir. Ancak, son parametrelerin arttığı durumlarda görülmektedir ki, kazanılan kaldırma katsayısından daha fazla olarak sürüklenme de gelişmeler görülmektedir. Bunun nedenini, kanat salınımının ileri derecede artması ile yüksek hücüm açılarında, akış ayrılmasının gerçekleşmesi olarak tahmin edebiliriz. Bu yüzden, farklı hücüm açılarındaki akış alan çizgilerini incelememiz faydalı olacaktır.

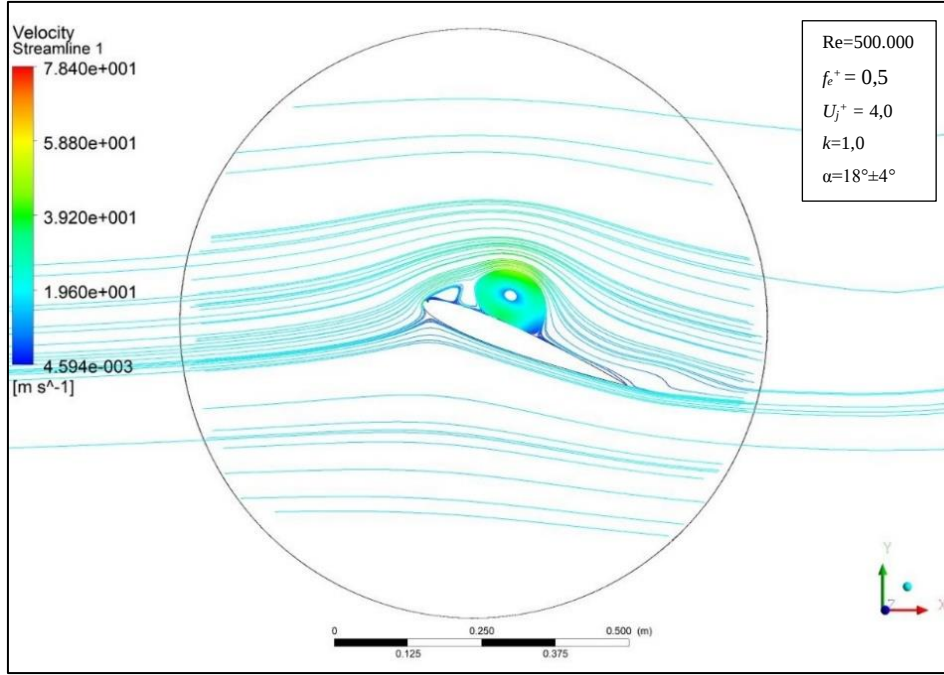
Şekil 6.5, 6.6 ve 6.7 de kanat etrafı hız dağılımları verilen akış için sentetik jet değerleri;  $f_e^+ = 0,5$ ,  $U_j^+ = 4$ ,  $k = 1,0$  olarak tanımlanmıştır. 4 numaralı analizdeki serbest akış çizgileri gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Hücüm açısı  $\alpha=18,32^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



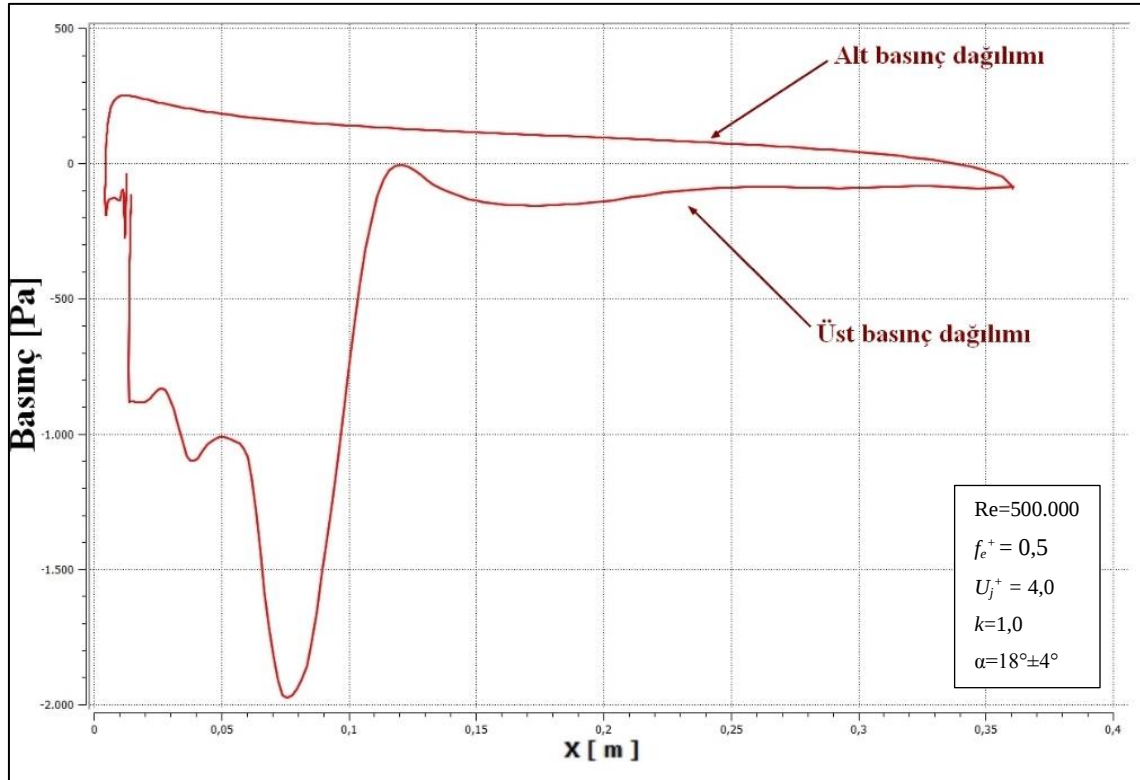
Şekil 6.6. Hücüm açısı  $\alpha=20,26^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



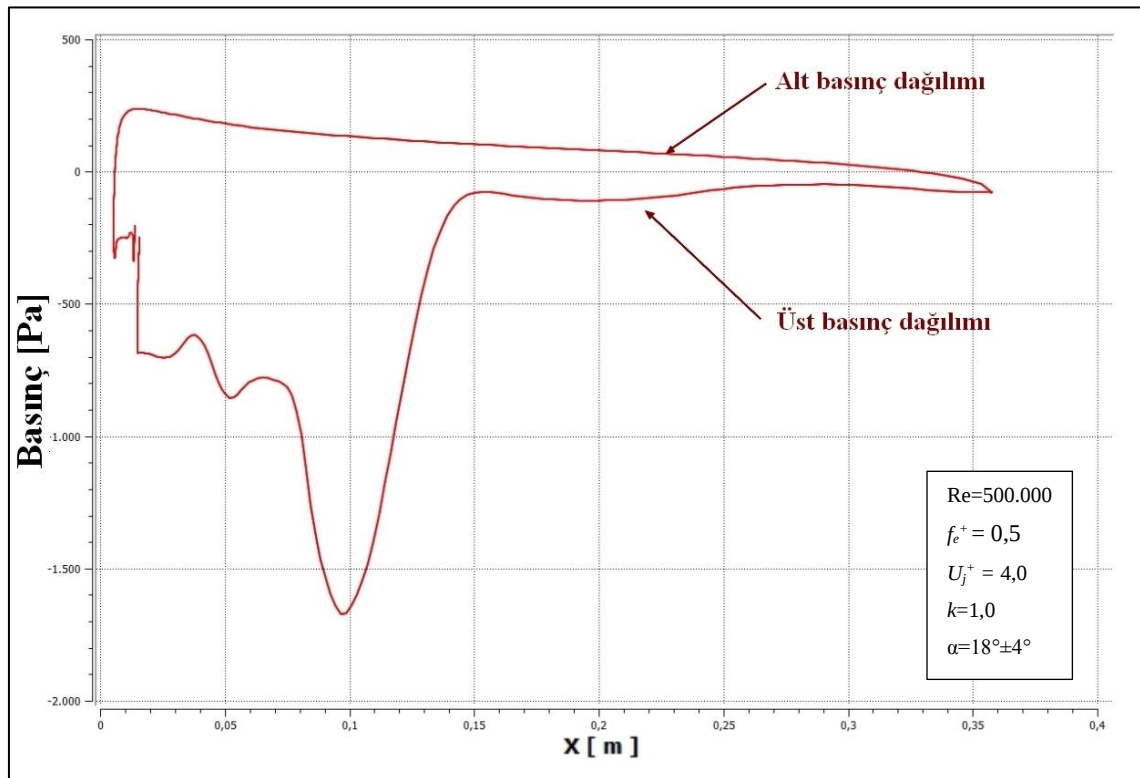
Şekil 6.7. Hücüm açısı  $\alpha=21,92^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri

Jet hızı arttıkça, ayrılma noktası ileriye doğru ilerlemektedir. Ayrıca, artan jet hızının kuyruk tarafı girdap oluşumunu engellediği ve üst yüzeyde oluşan girdapların boyutlarını küçülttüğü görülmektedir [8].

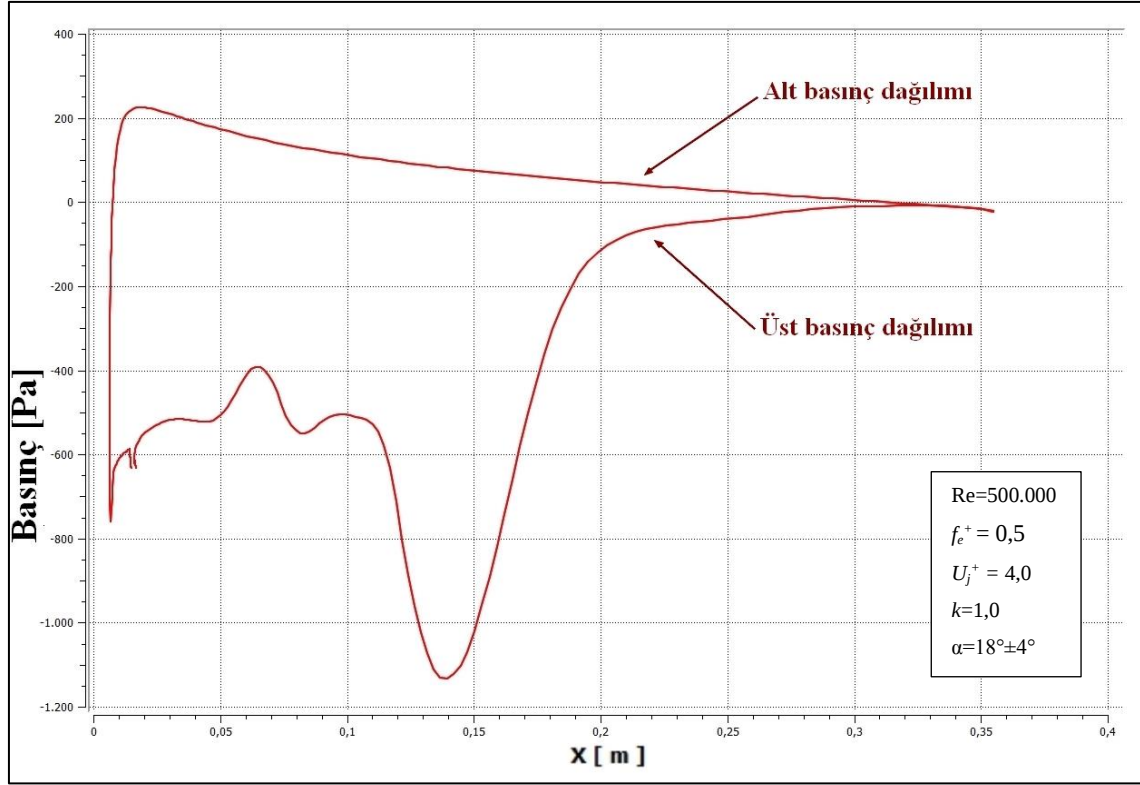
Yine aynı şekilde 1,0 indirgenmiş kanat frekansındaki üst ve alt kanat yüzeyi basınç dağılımları da göstermektedir. Salınım ve yüksek hücüm açıları akış ayrılmalarına sebep olmakta ve kaldırma veriminde düşüslere neden olmaktadır.



Şekil 6.8. Hücüm açısı  $\alpha=18,32^\circ$  için yukarı harekette üst-alt basma dağılımları



Şekil 6.9. Hücüm açısı  $\alpha=20,26^\circ$  için yukarı harekette üst-alt basma dağılımları



Şekil 6.10. Hücüm açısı  $\alpha=21,92^\circ$  için yukarı harekette üst-alt basma dağılımları

Anlık basma dağılımlarının olduğu grafikler ve anlık serbest akış çizgilerinin görüldüğü şekiller beraber incelendiğinde, kanat profili üst kısmındaki basma dağılımı, kanat üzerinden ayrılan akış ile birlikte düşüşe geçmektedir. Akışın tekrar bağlandığı mesafelerde basma yükselmelerine sebep olduğu görülmektedir.

Düşük frekanslı emişin olduğu sentetik jetlerde, üst kısımda oluşan basma dağılımları ile akış ayrılmasının kontrol edilmesi tercih edilmez. Ancak, düşük frekanslardaki emişler, ortalama kaldırma katsayısının artırılmasına yardımcı olur [12].

Bu durum,  $18^\circ$  hücüm açısında yapılan analizler karşılaştırıldığında, en yüksek kaldırmanın sağlandığı maksimum basma bölgesinin değişken olduğu görülebilir. Bu şekilde, düşük kaldırma-sürüklenme oranı oluşmasına neden olan büyük girdapların oluşması sağlanır [12].

Salınım hareketinde elde edilen katsayılar,  $f_e^+ = 0,5$

Çizelge 6.4’de 0,5 sabit boyutsuz jet frekansında ( $f_e^+$ )  $14^\circ$ - $22^\circ$  salınım tam döngüsünde, değişken boyutsuz jet hızına ( $U_j^+$ ) ve indirgenmiş salınım katsayısına ( $k$ ) göre, kaldırma, sürüklenme katsayıları ve kaldırma/sürüklenme oranları görülmektedir.

Çizelge 6.4.  $f_e^+ = 0,5$  için analiz parametreleri ve salınım hareketinin katsayı sonuçları

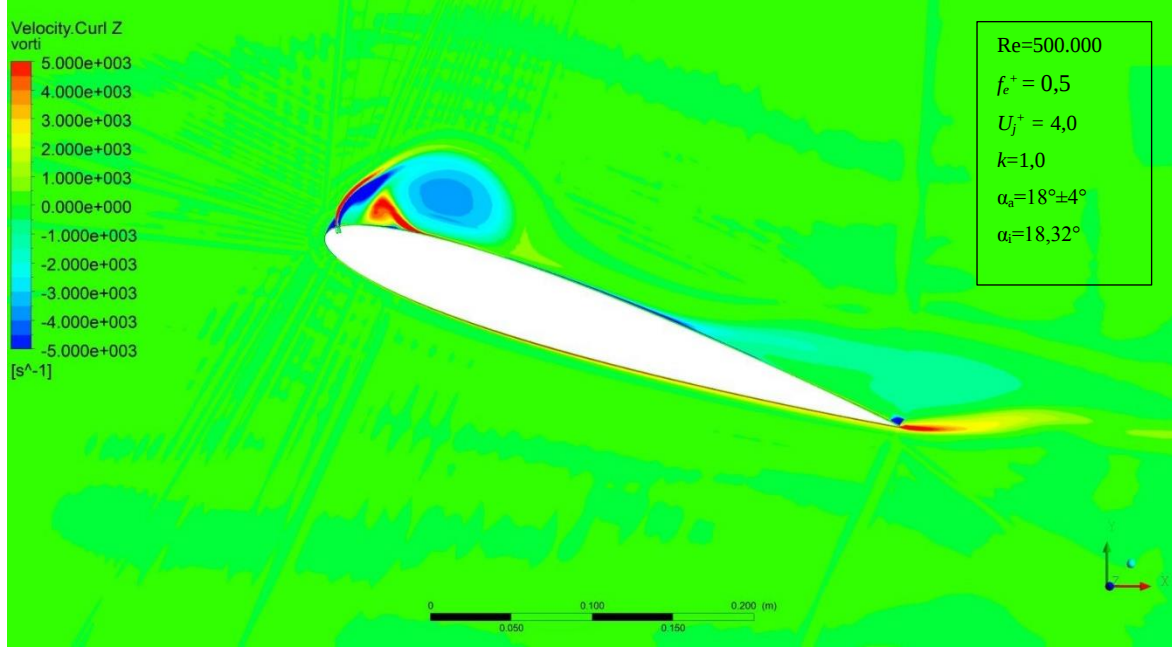
| Analiz No. | Parametreler |         |      | Salınım hareketi katsayıları |       |           |       |
|------------|--------------|---------|------|------------------------------|-------|-----------|-------|
|            | $f_e^+$      | $U_j^+$ | $k$  | $C_L$                        | $C_D$ | $C_L/C_D$ | $C_M$ |
| 5          | 0,5          | 0,2     | 0,15 | 0,244                        | 1,124 | 4,658     | 0,069 |
| 1          | 0,5          | 0,5     | 0,1  | 0,314                        | 1,217 | 3,875     | 0,069 |
| 2          | 0,5          | 1       | 0,2  | 0,307                        | 1,297 | 4,257     | 0,071 |
| 3          | 0,5          | 2       | 0,5  | 0,309                        | 1,334 | 4,408     | 0,069 |
| 4          | 0,5          | 4       | 1    | 0,342                        | 1,444 | 4,339     | 0,069 |

Salınım hareketinde jet parametreleri ve bir salınım periyodu boyunca elde edilen aerodinamik katsayılar, Çizelge 6.4. te belirtilmiştir. Bu parametrelerden sabit tutulan jet frekansının etkisinin düşük seviyede olduğu görülmektedir. Bu nedenle beraber etki ettiği, jet genliğinin artışı ile birlikte toplam verime zayıf olarak bir katkı sağlamaktadır. 2,0 jet genliğine kadar sağlanan katkı, salınım frekansının 1,0 değerine çıkan 4 numaralı analizinde güçsüzleşerek toplam verimde düşüş görülmektedir. Bu da salınım frekansının bozucu etkilerinden kaynaklanmaktadır.

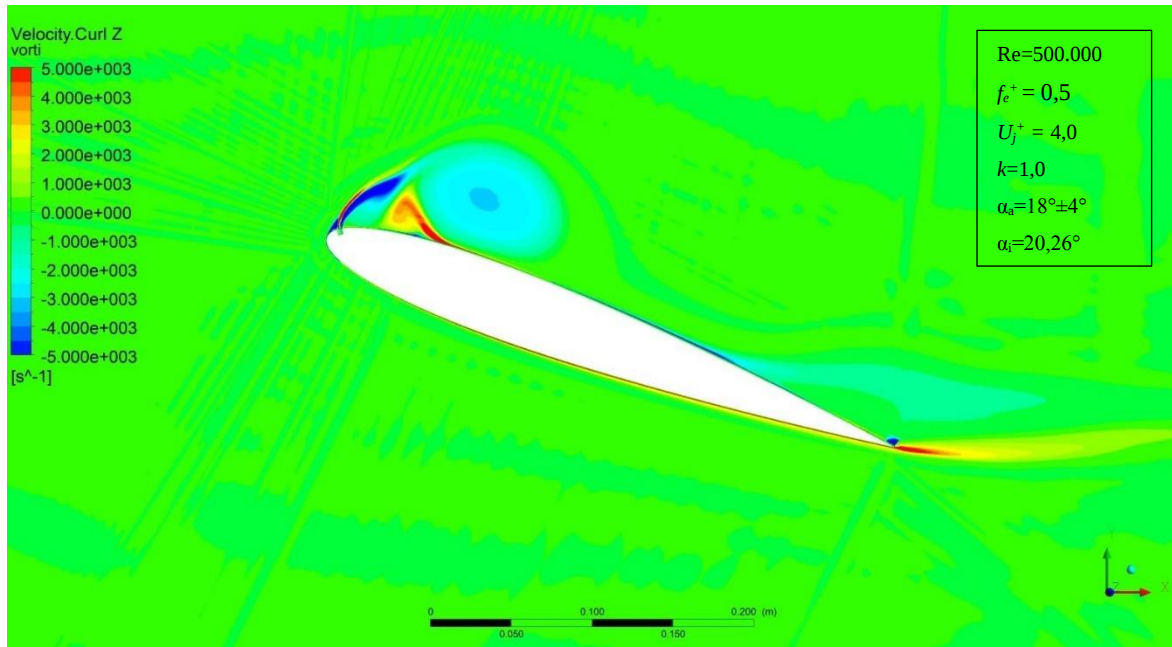
Aerodinamik verimin belirtildiği, kaldırma ve sürüklenme grafiklerinde görülmektedir ki, sürüklenme değerinin oransal olarak kaldırma katsayısına göre fazla artışı ile kaldırma-sürüklenme oranında düşüş görülmektedir.

Şekil 6.11-12-13. te Analiz-4 parametre değerlerinde belirtilen hücum açılarında kanat çevresindeki girdap dağılımları görülmektedir. Hücum kenarının hemen başında bulunan sentetik jet, akışın oluşturmak istediği pozitif yönlü (saat tersi yönde) girdap yapısını negatif yönlü girdap yapısı oluşturarak karşılamaktadır. Bu durumda, girdap oluşumu güçlenmeden etkisini yitirmekte ve daha sonraki yüksek açılarda negatif yönlü zayıf bir girdap yapısının

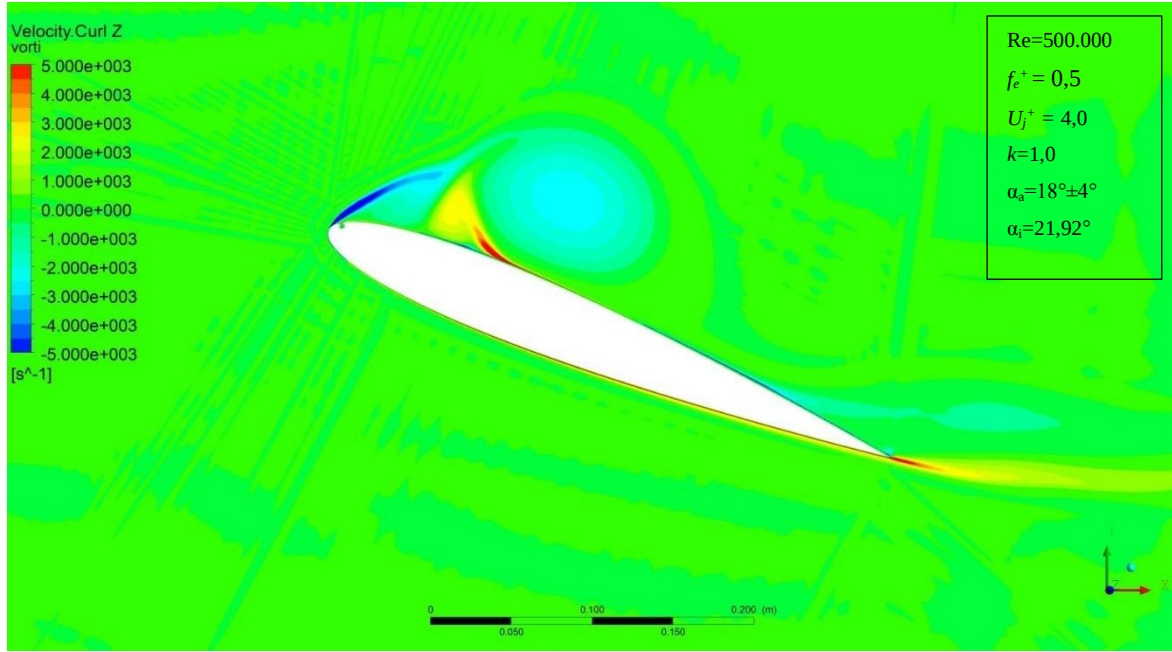
oluşmasını sağlamaktadır. Kanat üzerinden ayrılmaya çalışan girdap yapısı zayıf bir durumda olduğu için akış verimine olumlu katkı sağlamıştır.



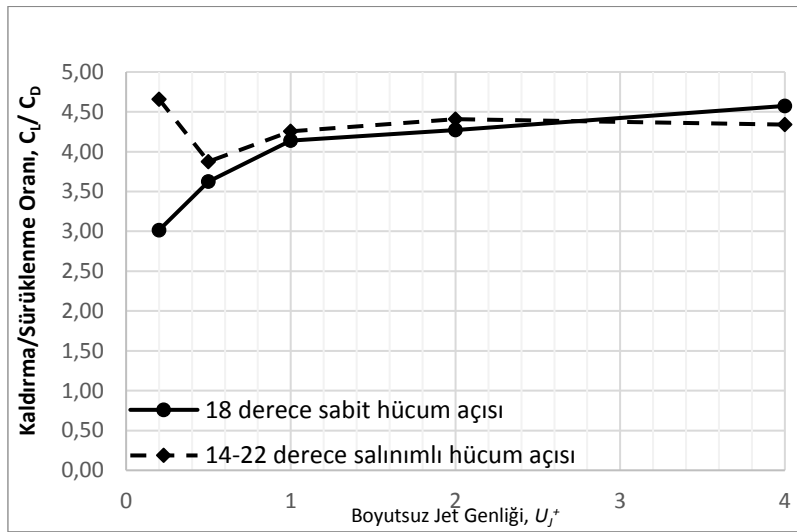
Şekil 6.11. Hücüm açısı  $\alpha=18,32^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



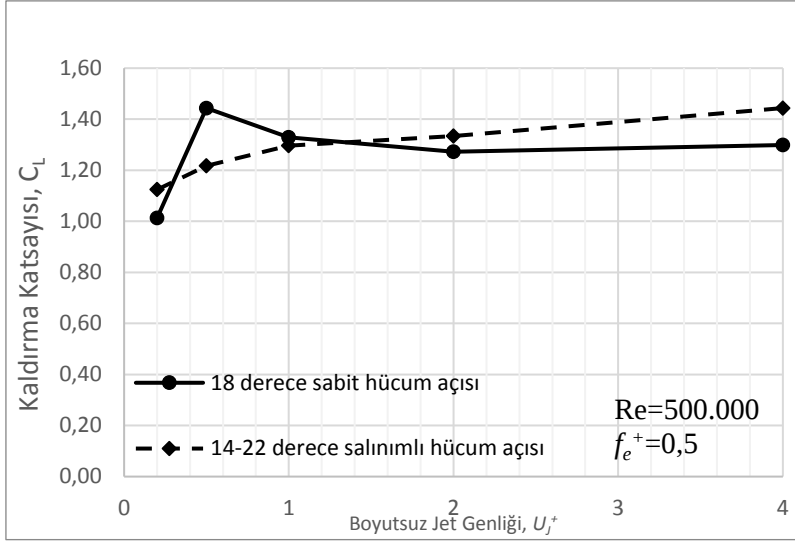
Şekil 6.12. Hücüm açısı  $\alpha=20,26^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



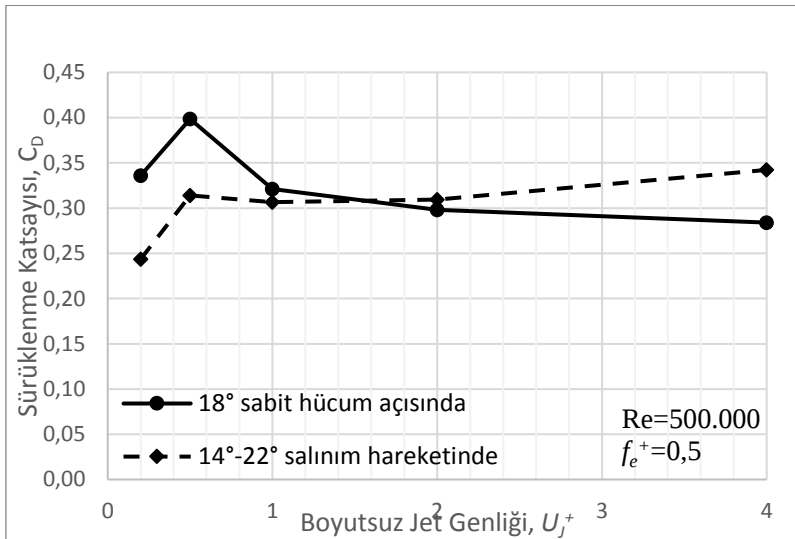
Şekil 6.13. Hücüm açısı  $\alpha=21,92^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



Şekil 6.14.  $f_e^+=0,5$  için döngüsel harekette  $C_L/C_D$  karşılaştırmaları

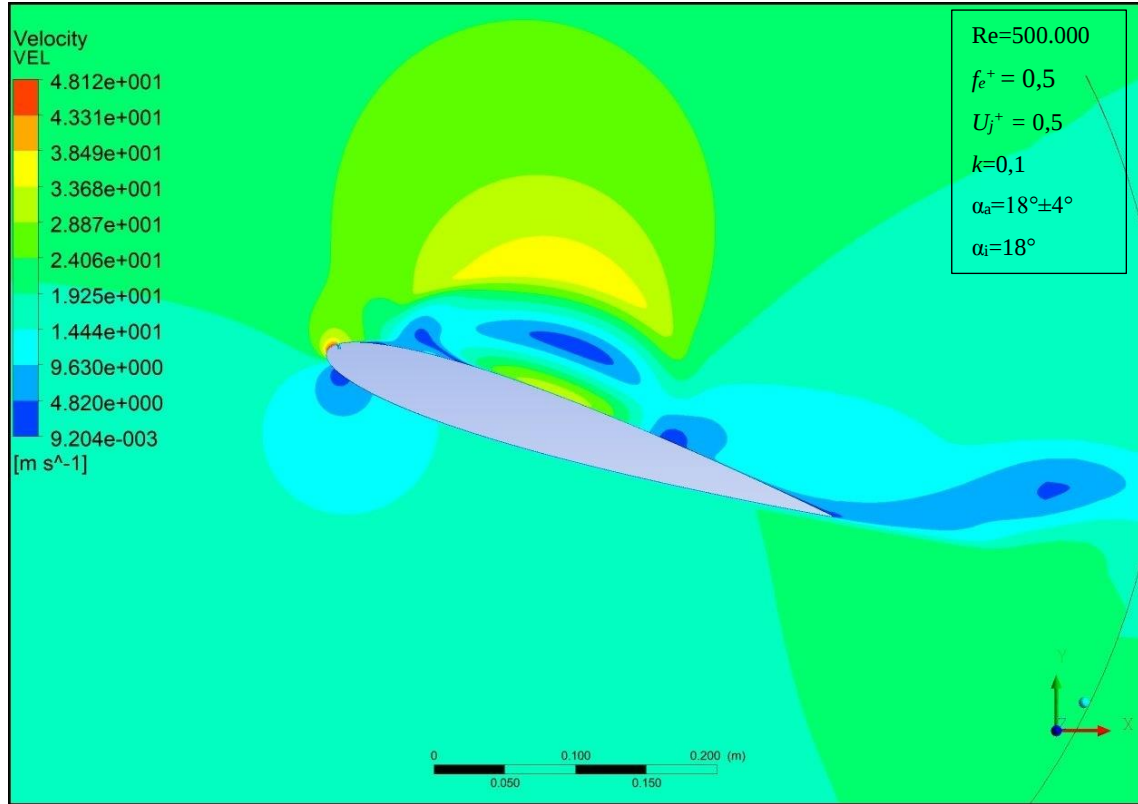


Şekil 6.15.  $f_e^+=0,5$  için döngüsel harekette  $C_L$  karşılaştırmaları

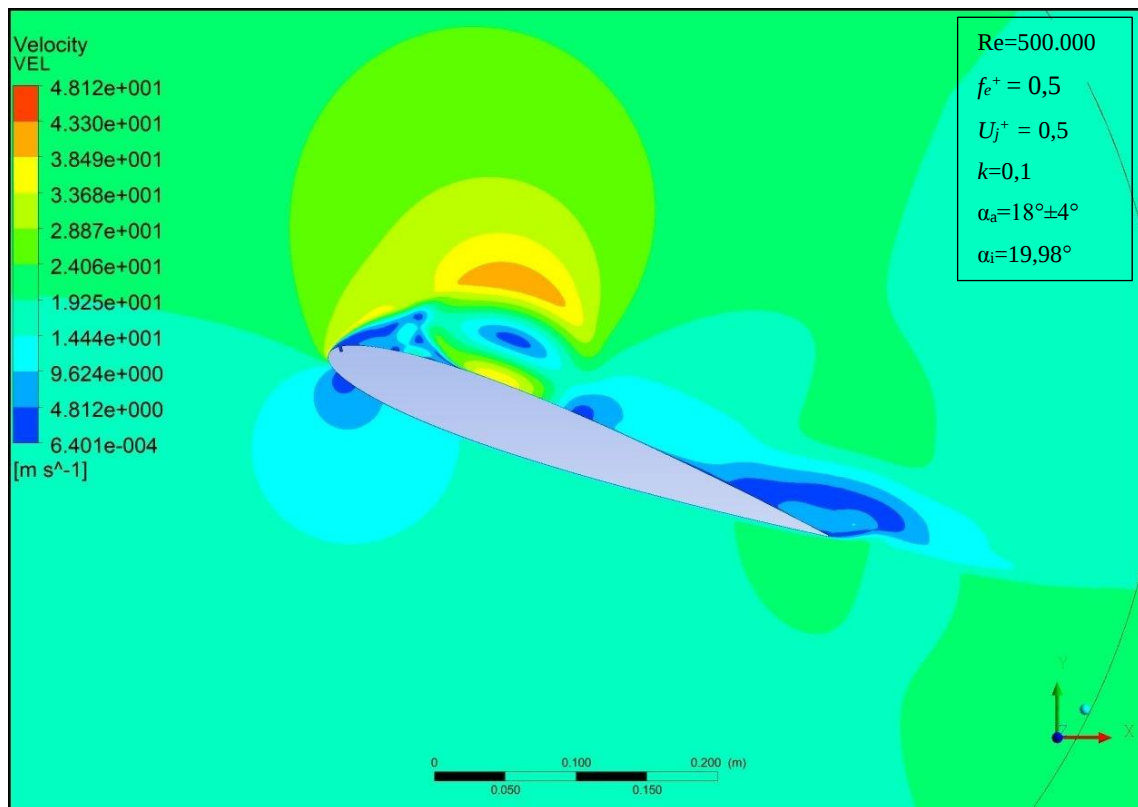


Şekil 6.16.  $f_e^+=0,5$  için döngüsel harekette  $C_D$  karşılaştırmaları

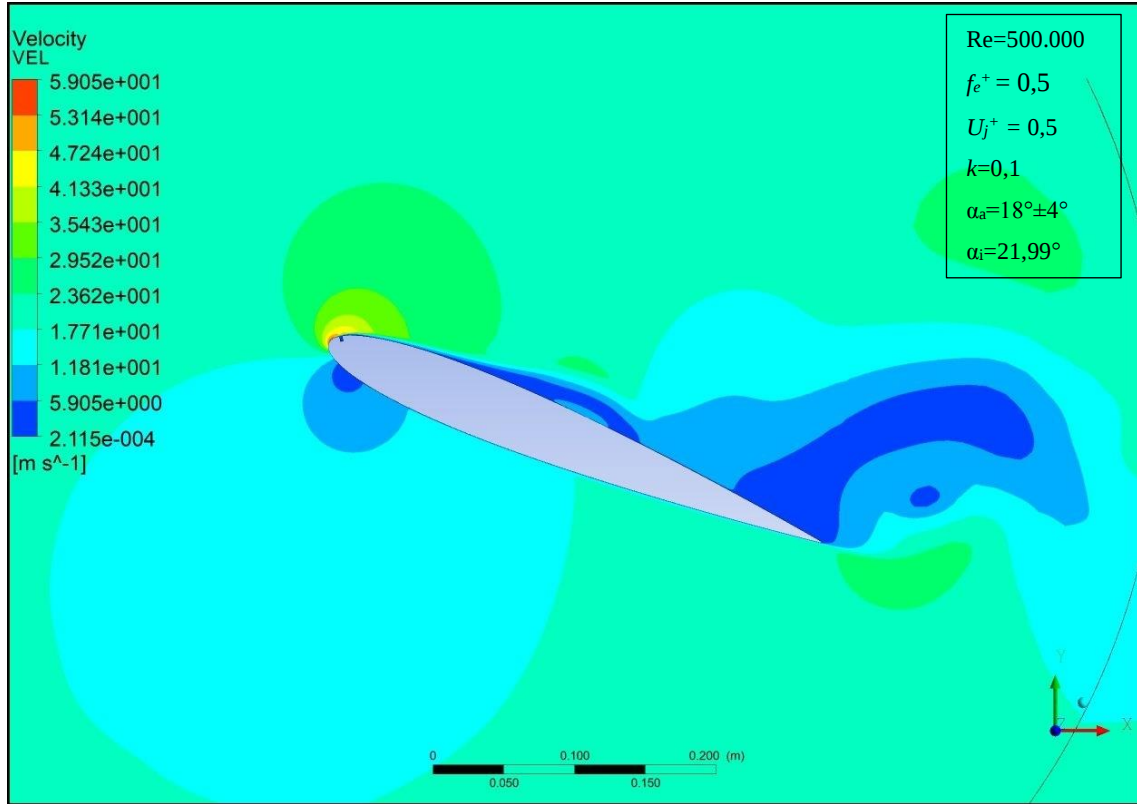
Şekil 6.17. de  $18^\circ$ - $22^\circ$  hücum açısı arasındaki hız dağılımları gösterilmektedir. Salınım frekansının etkisinden ziyade jet mekanizmasının çalışmasının, akış üst yüzeyinde akış karakteristiğine olan etkisi toplam verime katkı sağlamaktadır. Jet mekanizması akışın kanat üzerinde bağlanmasını sağlamakta ve yükselen hücum açılarında, yüzey basıncın düşmesine neden olmaktadır. Böylece, kanat üzerindeki akış kaldırma katsayısında iyileştirme sağlamaktadır. Şekil 6.17-21 arası ekler bölümünde belirtilmiştir.



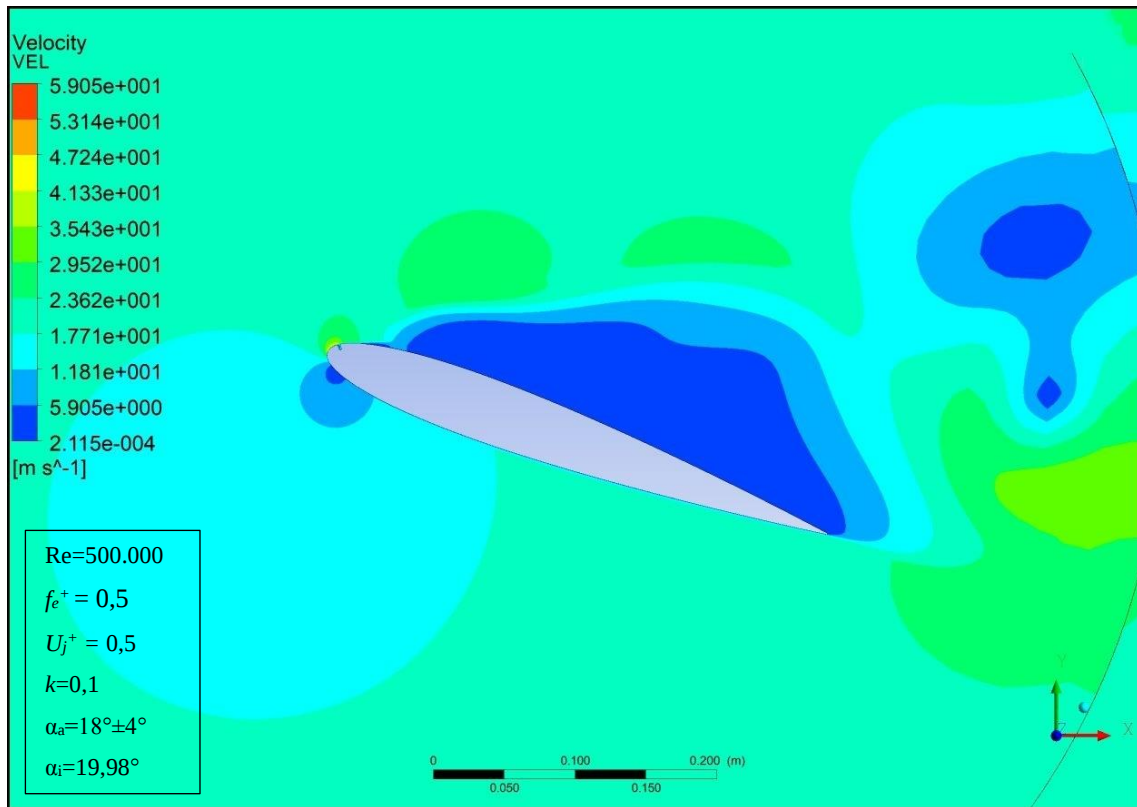
Şekil 6.17. Hücum açısı  $\alpha=18^\circ$  için yukarı harekette hız dağılımları



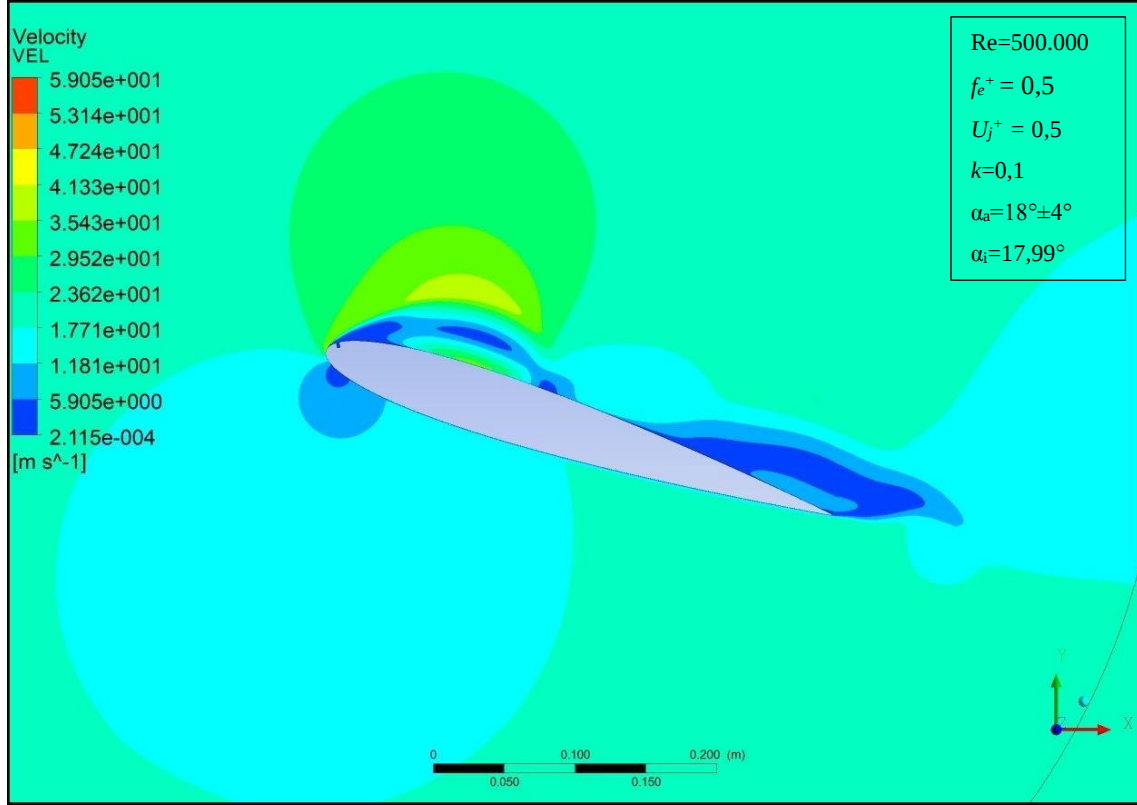
Şekil 6.18. Hücum açısı  $\alpha=19,98^\circ$  için yukarı harekette hız dağılımları



Şekil 6.19. Hücüm açısı  $\alpha=21,99^\circ$  için yukarı harekette hız dağılımları



Şekil 6.20 Hücüm açısı  $\alpha=19,98^\circ$  için aşağı harekette hız dağılımları



Şekil 6.21. Hücum açısı  $\alpha=17,99^\circ$  için aşağı harekette hız dağılımları

$f_e^+$  1,0 sabit değerindeki çalışmalar:

Çizelge 6.5’de 1,0 sabit boyutsuz jet frekansında ( $f_e^+$ )  $14^\circ$ - $22^\circ$  salınım yukarı hareketinde, değişken boyutsuz jet hızına ( $U_j^+$ ) ve indirgenmiş salınım katsayısına ( $k$ ) göre, kaldırma, sürüklenme katsayıları ve kaldırma/sürüklenme oranları görülmektedir.

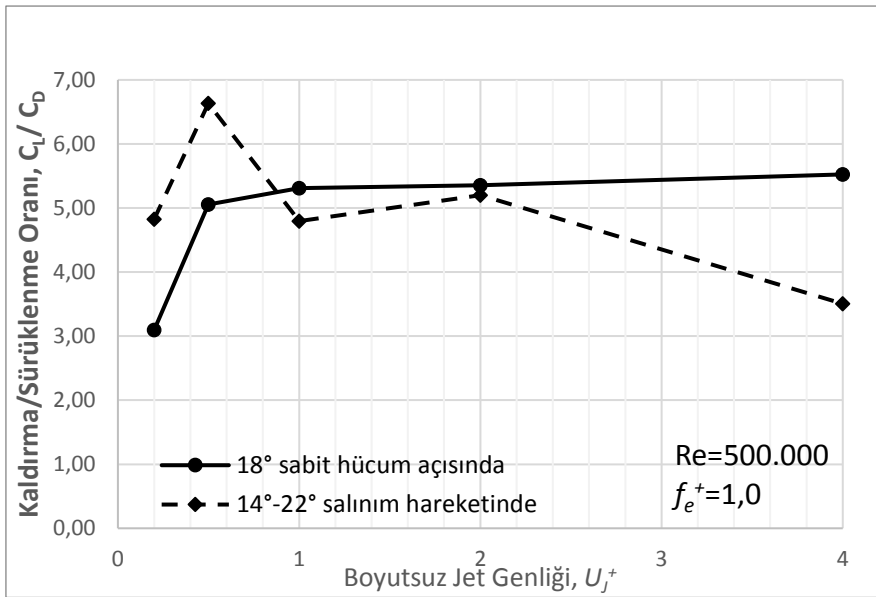
Çizelge 6.5.  $f_e^+=1,0$  için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları

| Analiz No. | Parametreler |         |      | Yukarı hareket katsayıları |       |           |
|------------|--------------|---------|------|----------------------------|-------|-----------|
|            | $f_e^+$      | $U_j^+$ | $k$  | $C_L$                      | $C_D$ | $C_L/C_D$ |
| 10         | 1,0          | 0,2     | 0,1  | 0,306                      | 1,211 | 3,965     |
| 6          | 1,0          | 0,5     | 0,2  | 0,308                      | 1,294 | 4,207     |
| 7          | 1,0          | 1,0     | 0,5  | 0,264                      | 1,332 | 5,043     |
| 8          | 1,0          | 2,0     | 1,0  | 0,275                      | 1,405 | 5,101     |
| 9          | 1,0          | 4,0     | 0,15 | 0,272                      | 1,290 | 4,740     |

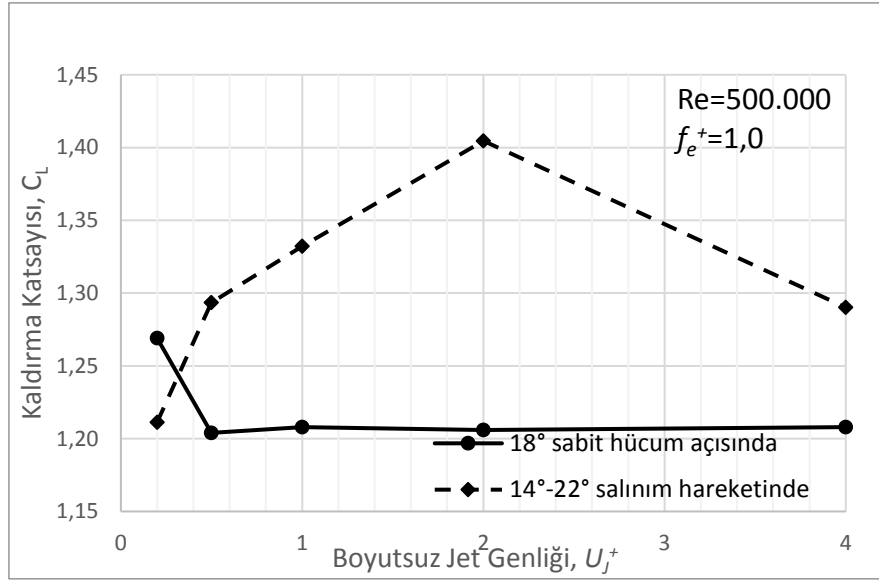
Çizelge 6.6.  $f_e^+ = 1,0$  için  $U_J^+$  değer aralıkları ve  $C_L$  üzerine baskın tepkiler,

| $U_J^+$ değer aralıkları ve baskın tepkiler |           |           |           |                        |
|---------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|
| $f^+$                                       | 0,2-0,5   | 0,5-1,0   | 1,0-2,0   | 2,0-4,0                |
| 1,0                                         | $\approx$ | $\approx$ | $\approx$ | $k \blacktriangledown$ |

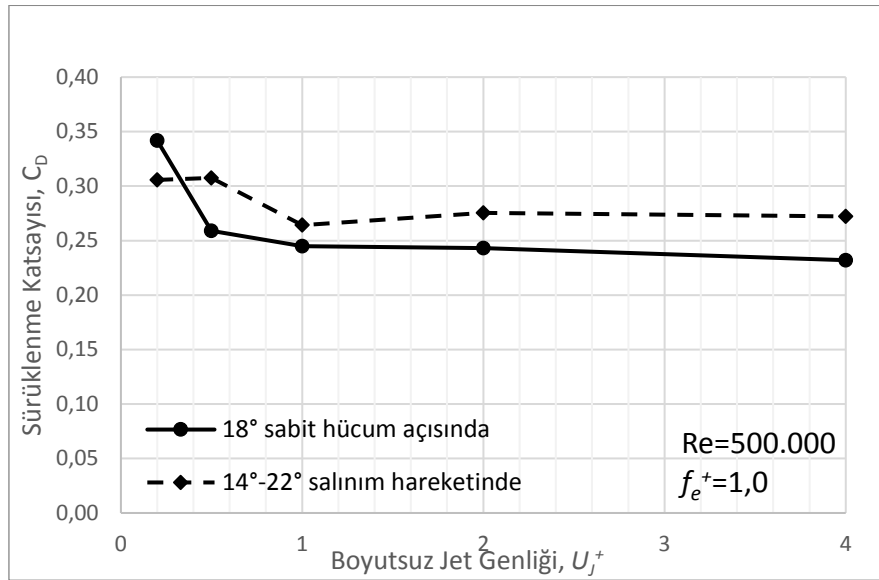
$f_e^+$ , jet frekansının sabit 1,0 olduğu durumlarda, 0,2-0,5, 0,5-1,0 ve 1,0-2,0  $U_J^+$  değer aralıklarında gerçekleşen  $C_L/C_D$  oranının, salınım frekansı artışları ile beraber hareket ettiği görülmektedir. Bu etkilerin aerodinamik verime katkısı olumlu yöndedir. Ancak yine, 2,0-4,0 jet hızı değer aralığında, salınım frekansındaki ani düşmenin etkisinin aerodinamik verimde azalmaya neden olduğu görülmektedir. 1,0'dan 0,15 boyutsuz jet frekans değeri düşüşüne rağmen verimde ki düşmenin daha az miktarda olmasının nedenini 2,0-4,0 aralığındaki jet hızının artışın etkisi olarak görebiliriz. Bu aralıklar için salınım frekansının dominant parametre olduğu görülmektedir.



Şekil 6.22.  $f_e^+ = 1,0$  için yukarı yönlü harekette  $C_L/C_D$  karşılaştırmaları



Şekil 6.23.  $f_e^+=1,0$  için yukarı yönlü harekette  $C_L$  karşılaştırmaları



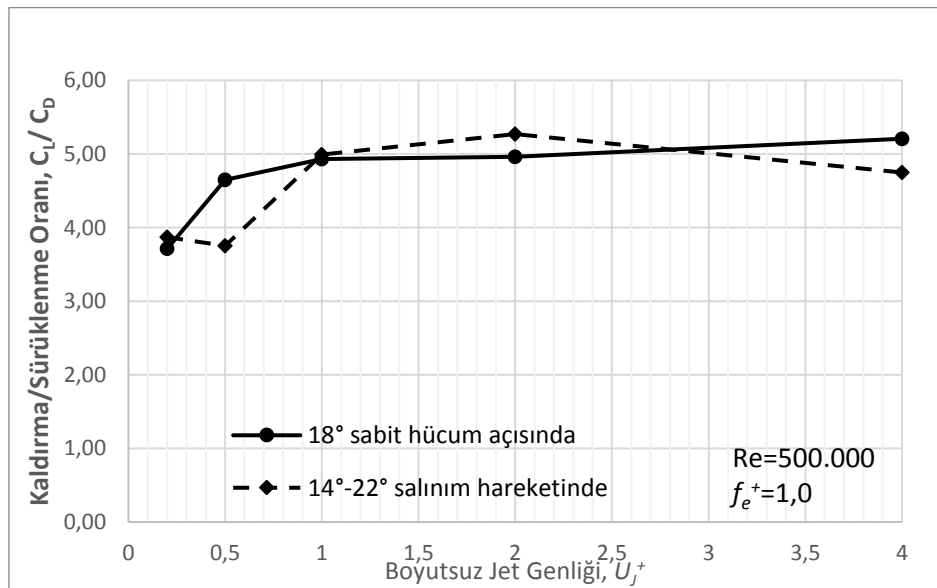
Şekil 6.24.  $f_e^+=1,0$  için yukarı yönlü harekette  $C_D$  karşılaştırmaları

Salınım hareketinde elde edilen katsayılar,  $f_e^+ = 1,0$

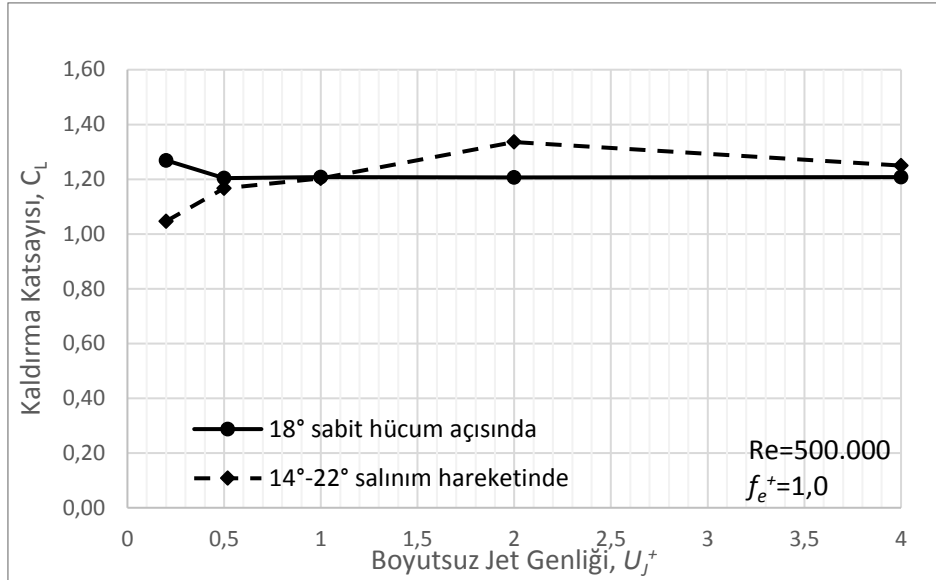
Çizelge 6.7’de 1,0 sabit boyutsuz jet frekansında ( $f_e^+$ ) 14°-22° salınım hareketinde, değişken boyutsuz jet hızına ( $U_j^+$ ) ve indirgenmiş salınım katsayısına ( $k$ ) göre, kaldırma, sürüklenme katsayıları ve kaldırma/sürüklenme oranları görülmektedir.

Çizelge 6.7.  $f_e^+ = 1,0$  için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları

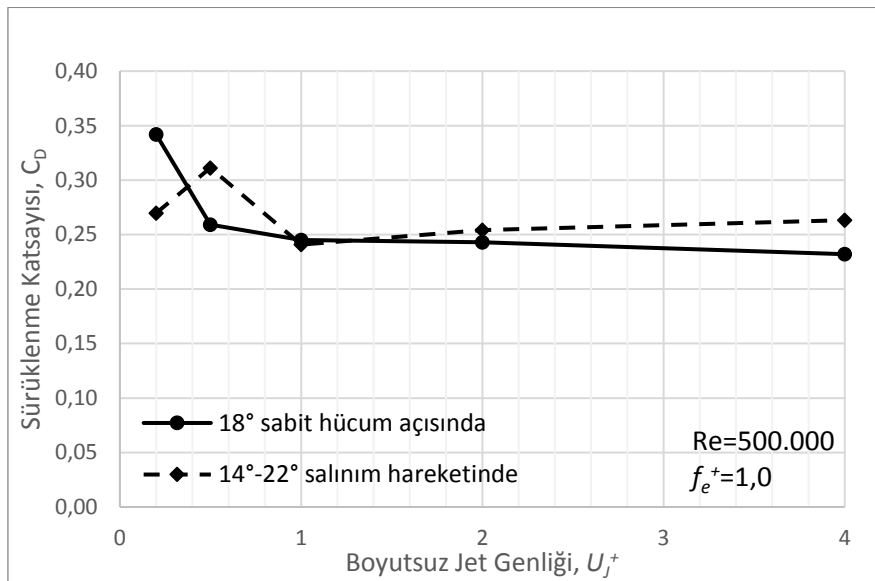
| Analiz No. | Parametreler |         |      | Salınım hareketi katsayıları |       |           |       |
|------------|--------------|---------|------|------------------------------|-------|-----------|-------|
|            | $f_e^+$      | $U_j^+$ | $k$  | $C_L$                        | $C_D$ | $C_L/C_D$ | $C_M$ |
| 10         | 1,0          | 0,2     | 0,1  | 0,270                        | 1,047 | 3,868     | 0,066 |
| 6          | 1,0          | 0,5     | 0,2  | 0,311                        | 1,166 | 3,753     | 0,067 |
| 7          | 1,0          | 1,0     | 0,5  | 0,241                        | 1,203 | 4,993     | 0,059 |
| 8          | 1,0          | 2,0     | 1,0  | 0,254                        | 1,336 | 5,270     | 0,063 |
| 9          | 1,0          | 4,0     | 0,15 | 0,263                        | 1,250 | 4,749     | 0,056 |



Şekil 6.25.  $f_e^+ = 1,0$  için salınım hareketinde  $C_L/C_D$  karşılaştırmaları

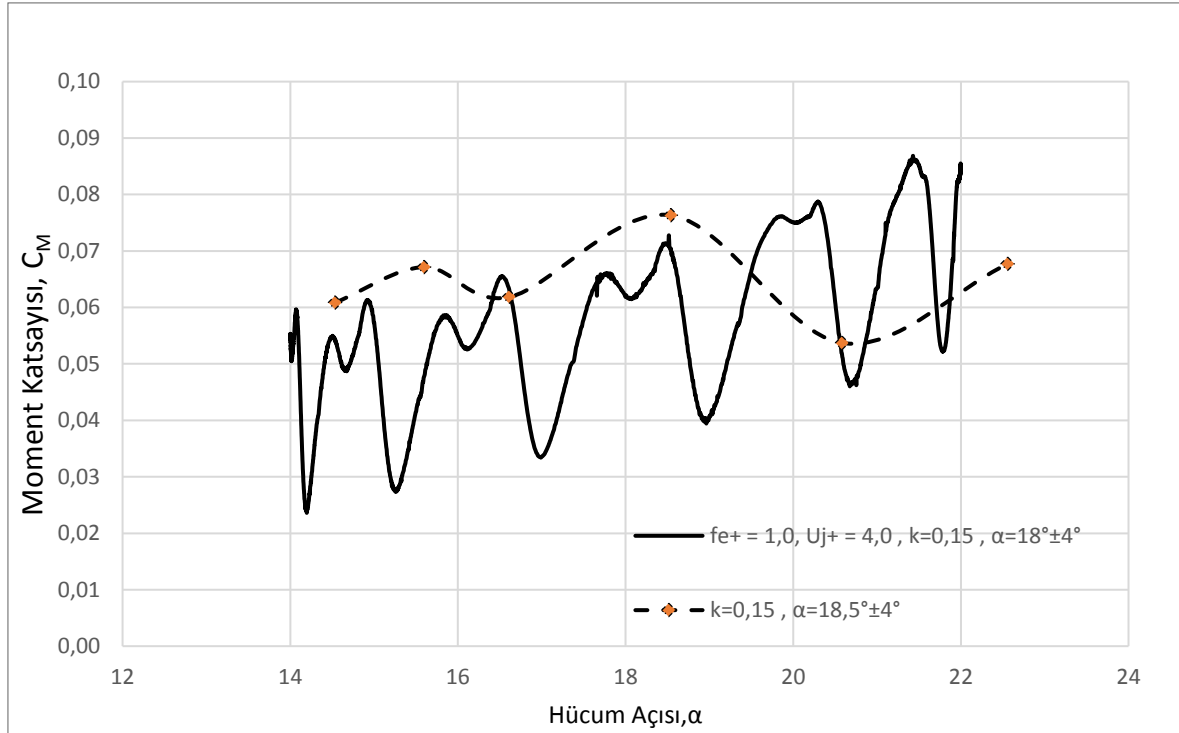


Şekil 6.26.  $f_e^+=1,0$  için salınım hareketinde  $C_L$  karşılaştırmaları

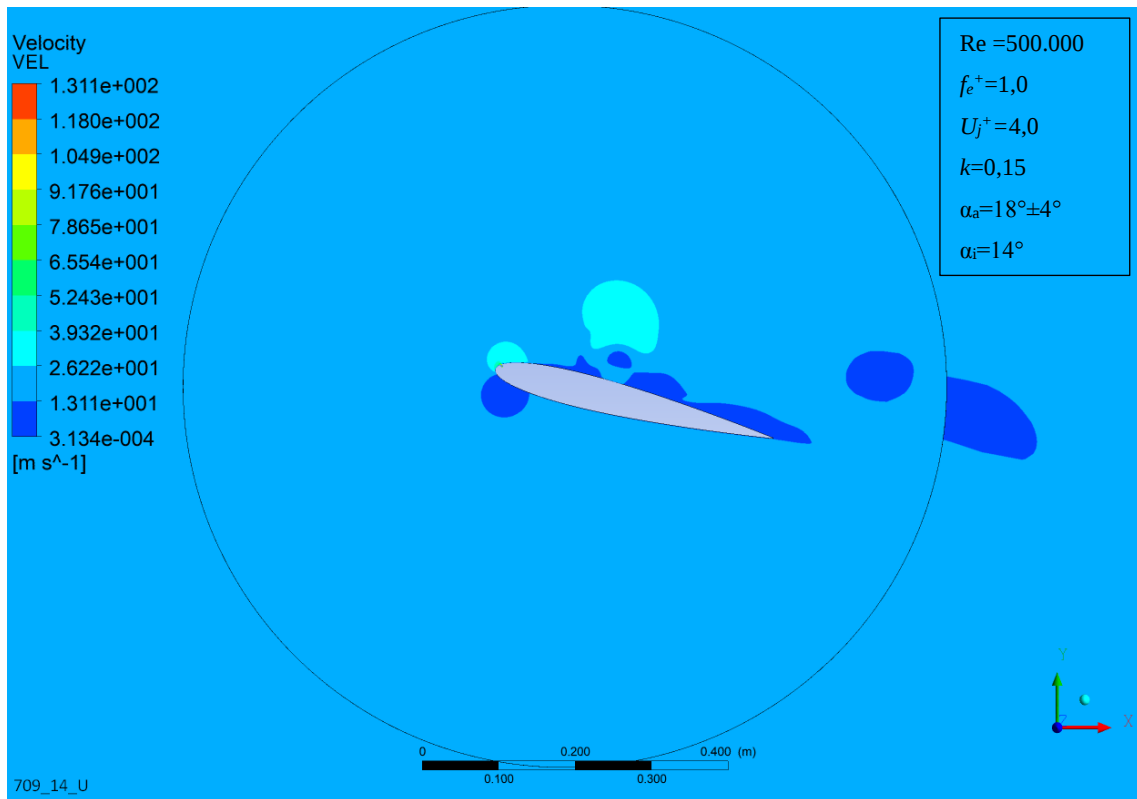


Şekil 6.27.  $f_e^+=1,0$  için salınım hareketinde  $C_D$  karşılaştırmaları

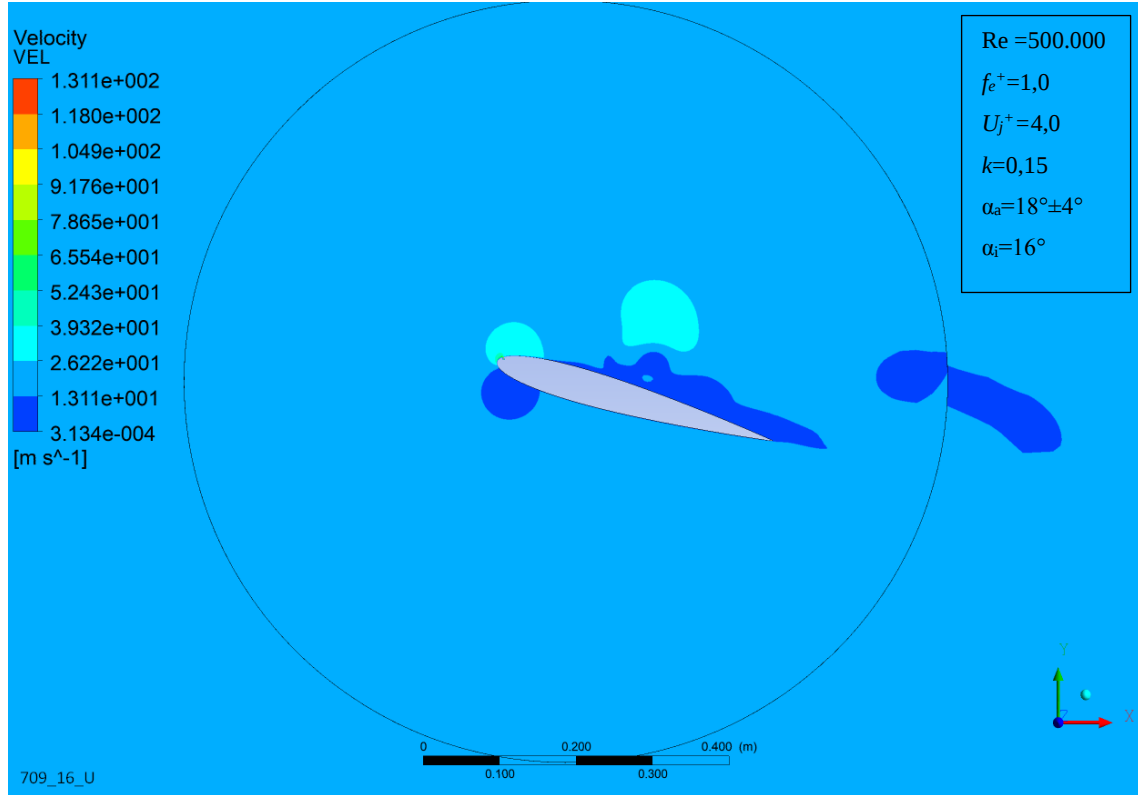
Şekil 6.28. de 1,0 boyutsuz jet frekansında, 4,0 boyutsuz jet genişliğinde yapılan salınım hareketinin moment katsayıları ve [39] daki moment katsayıları gösterilmektedir. Grafik, 19,5° hücum açılarında jet salınımının moment katsayısını düşürdüğü ve stabiliteye katkı sağladığı görülmektedir. Bu hücum açısından sonra, jet mekanizmasının stabilitede oluşturduğu etki olumsuzdur.



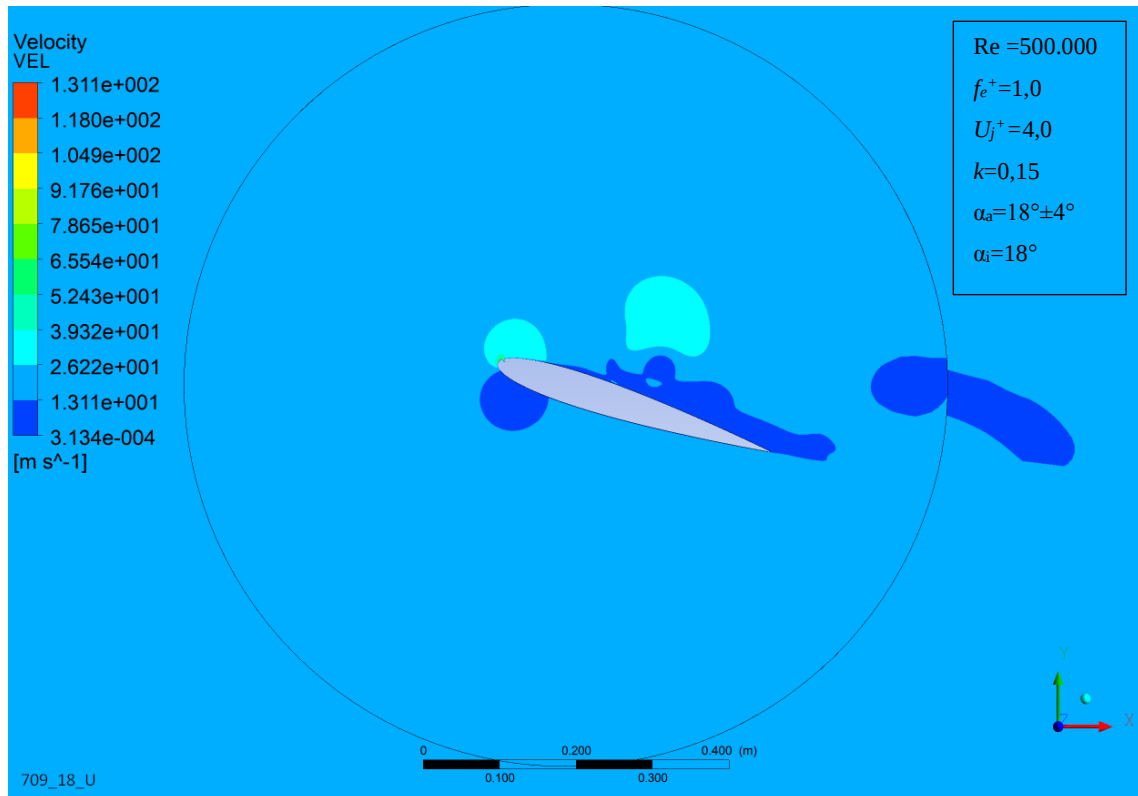
Şekil 6.28. Analiz çalışmasının ve deneyin moment katsayılarının karşılaştırılması



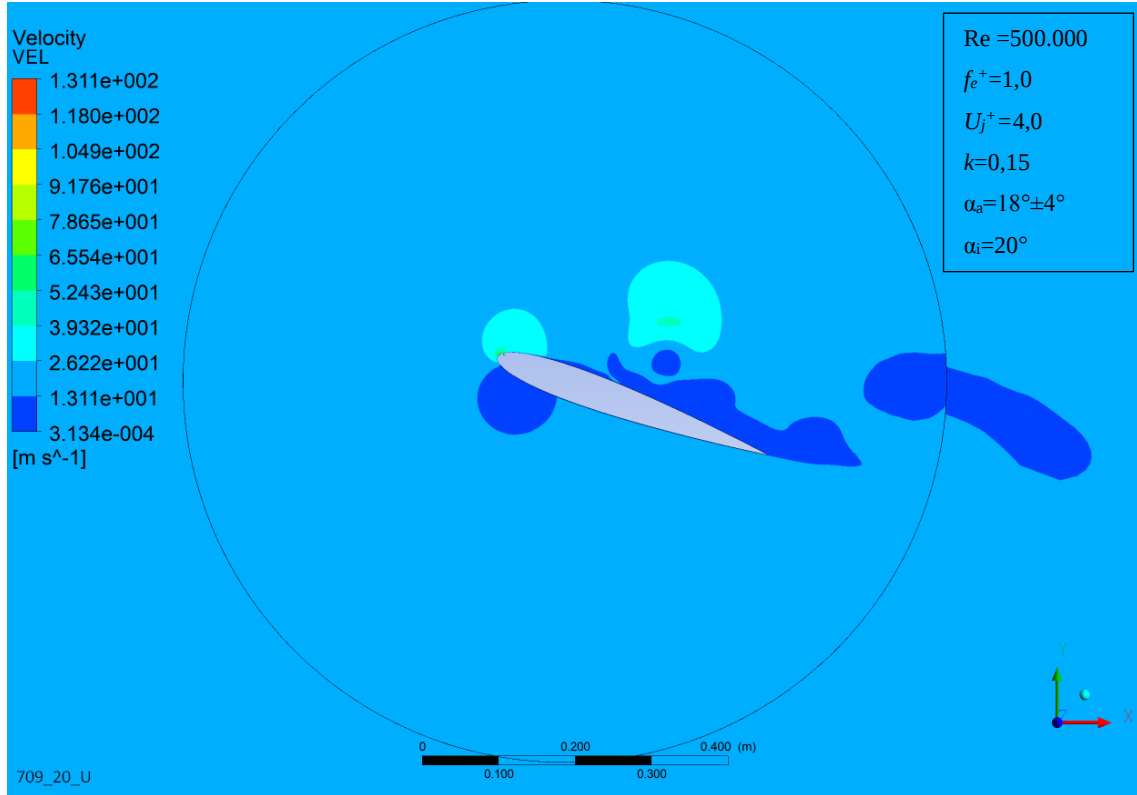
Şekil 6.29. Hücum açısı  $\alpha = 14^\circ$  için yukarı harekette hız dağılımları



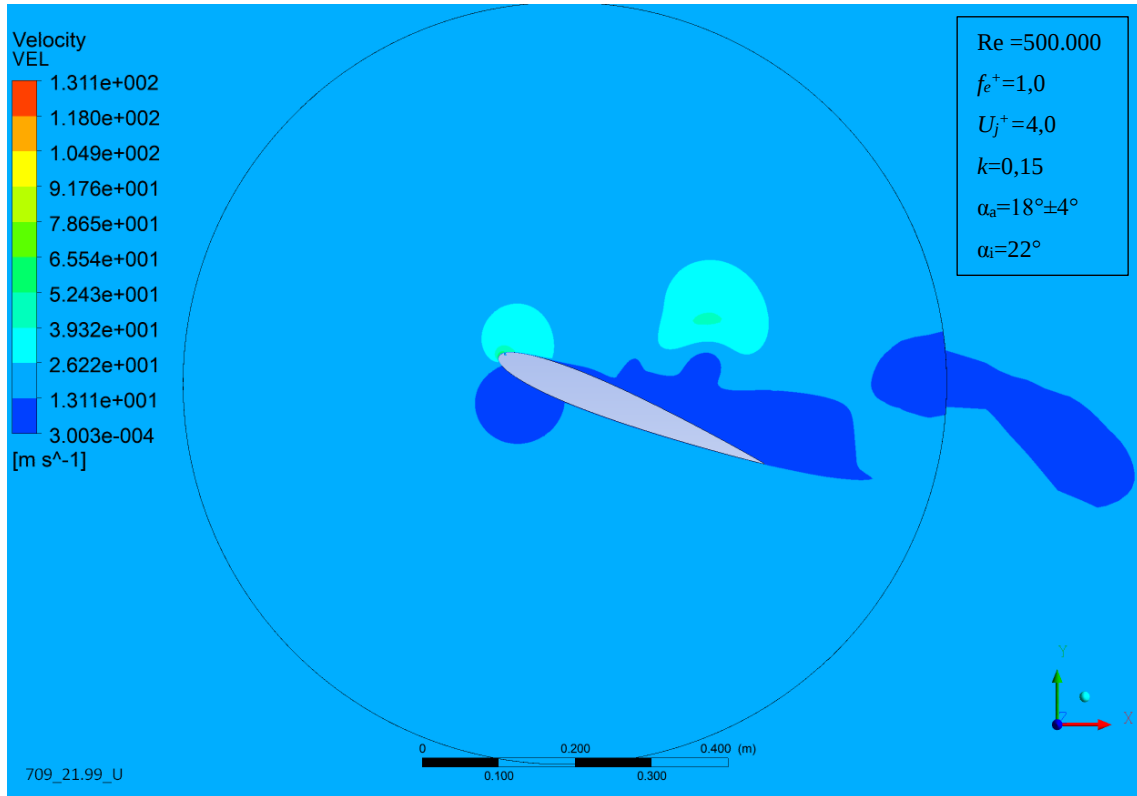
Şekil 6.30. Hücum açısı  $\alpha = 16^\circ$  için yukarı harekette hız dağılımları



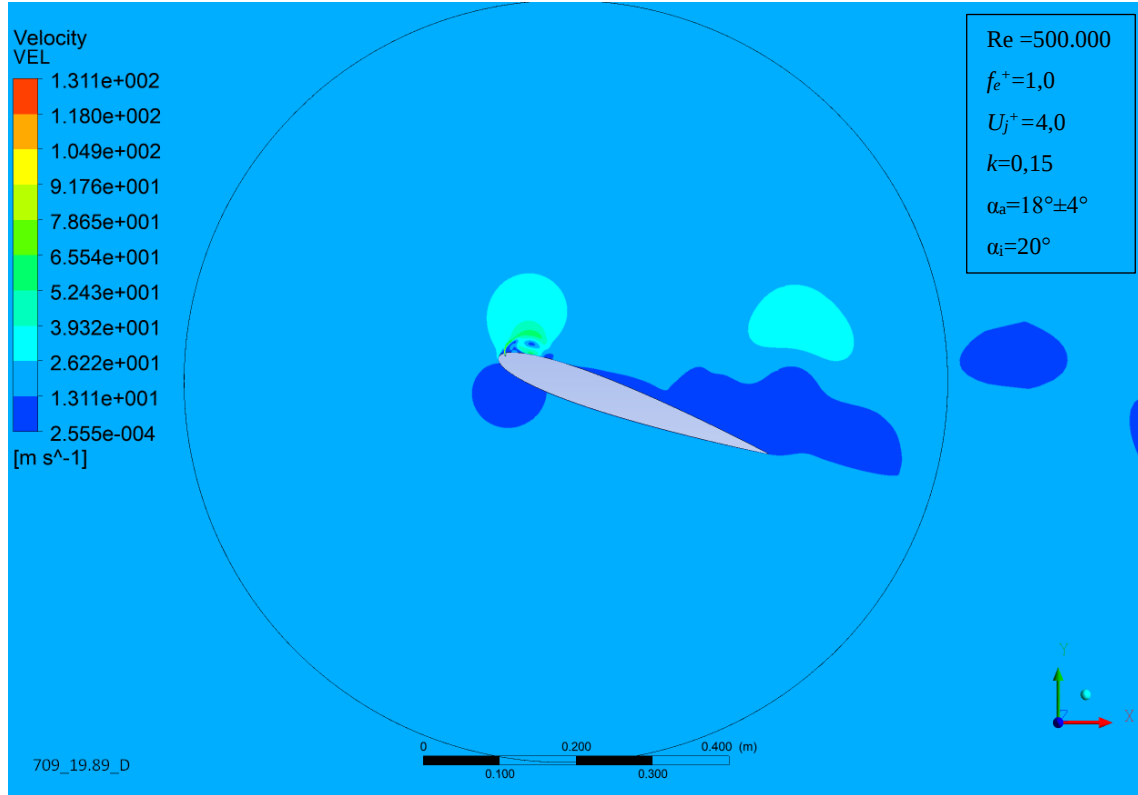
Şekil 6.31. Hücum açısı  $\alpha = 18^\circ$  için yukarı harekette hız dağılımları



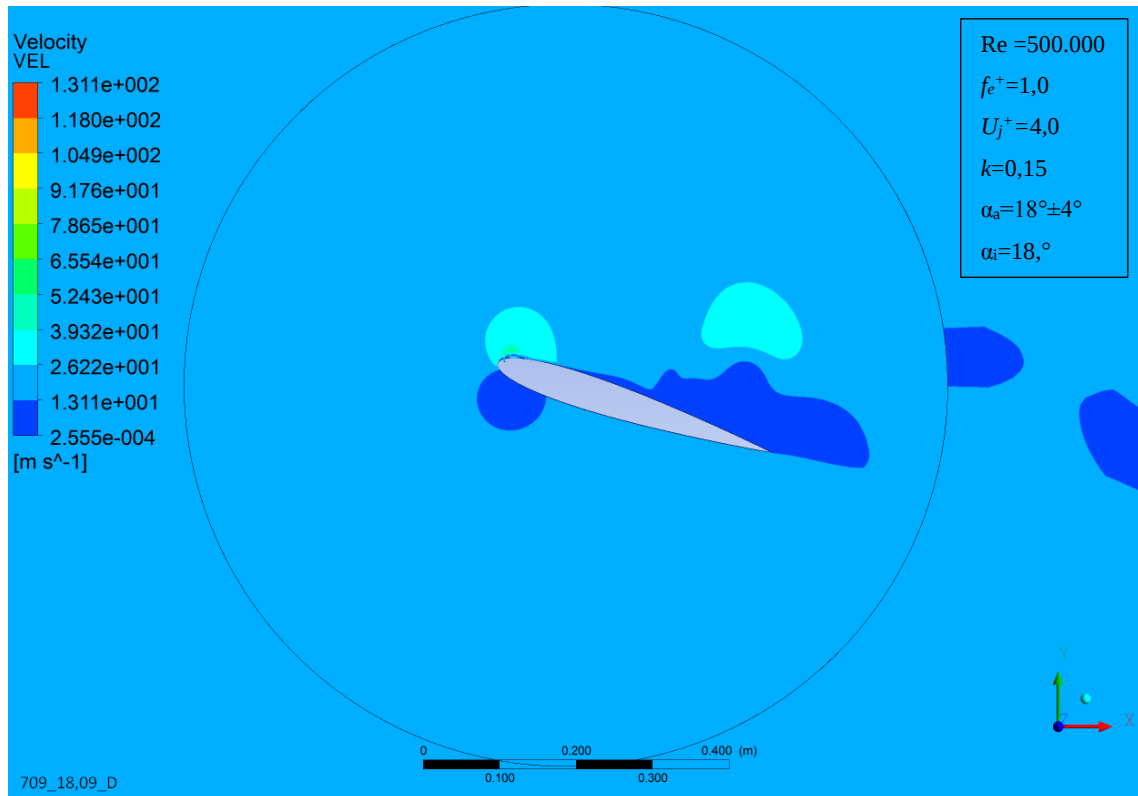
Şekil 6.32. Hücum açısı  $\alpha=20^\circ$  için yukarı harekette hız dağılımları



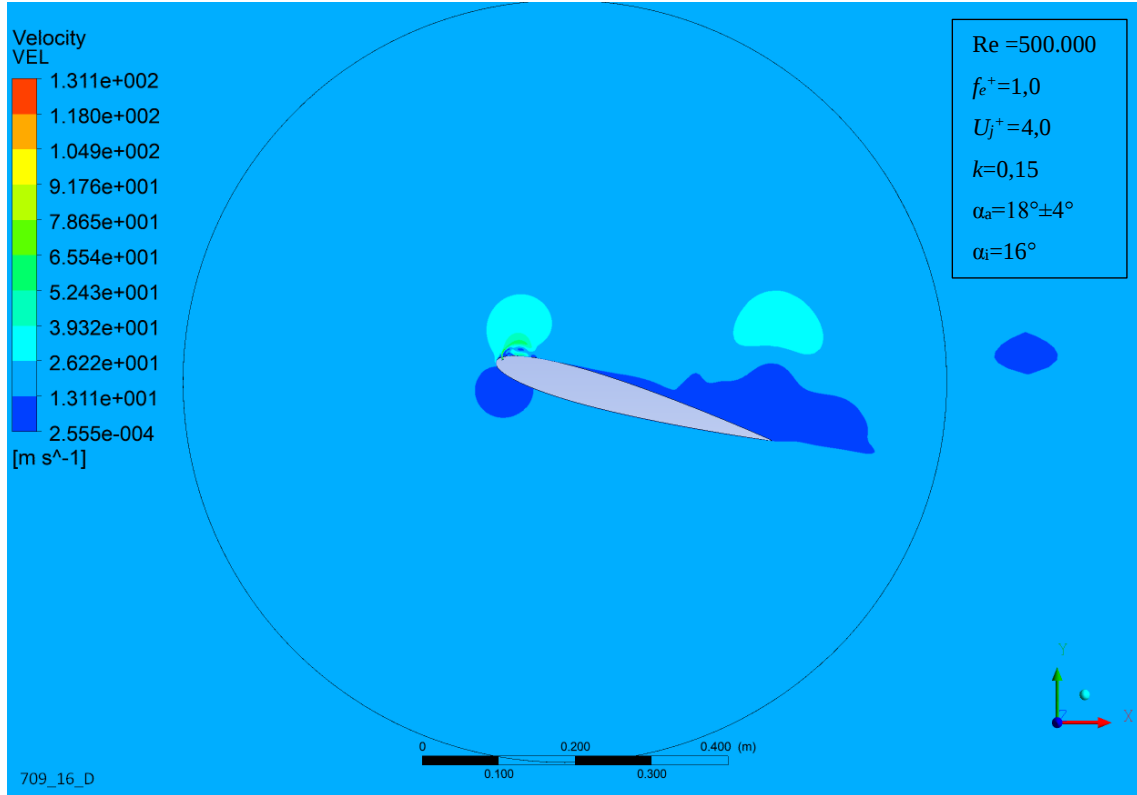
Şekil 6.33. Hücum açısı  $\alpha=22^\circ$  için yukarı harekette hız dağılımları



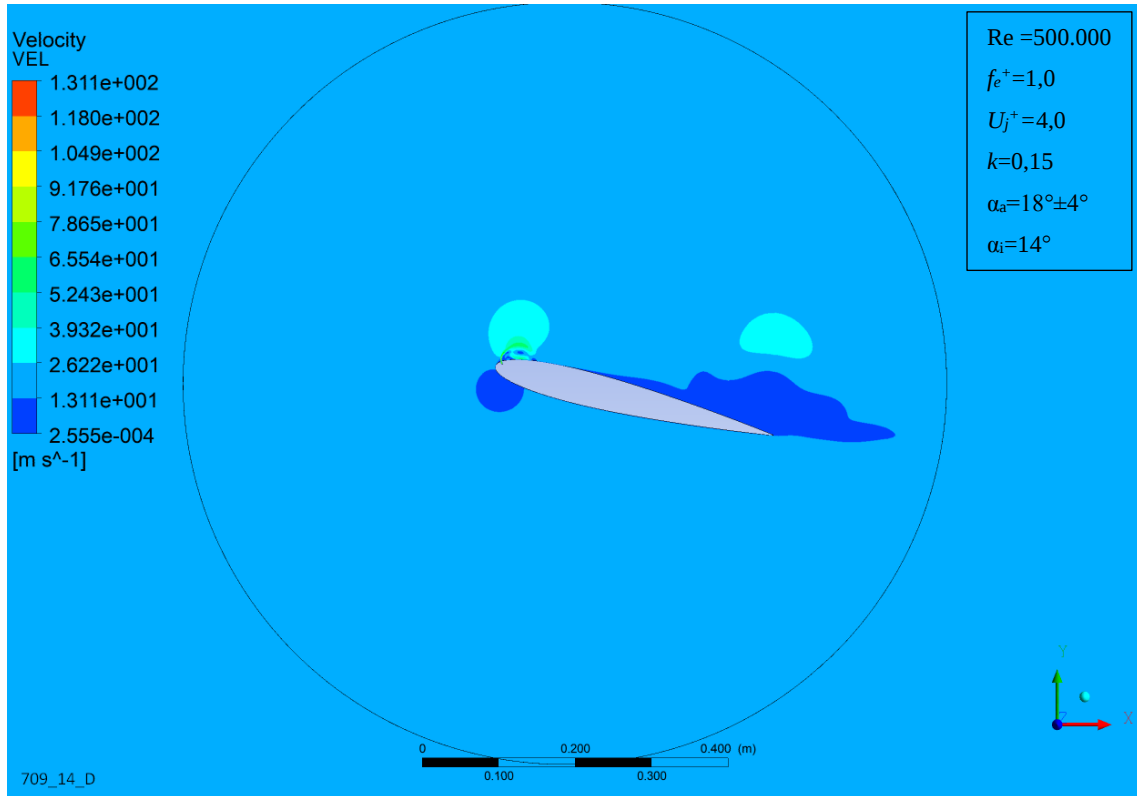
Şekil 6.34. Hücum açısı  $\alpha = 20^\circ$  için aşağı harekette hız dağılımları



Şekil 6.35. Hücum açısı  $\alpha = 18^\circ$  için yukarı harekette hız dağılımları



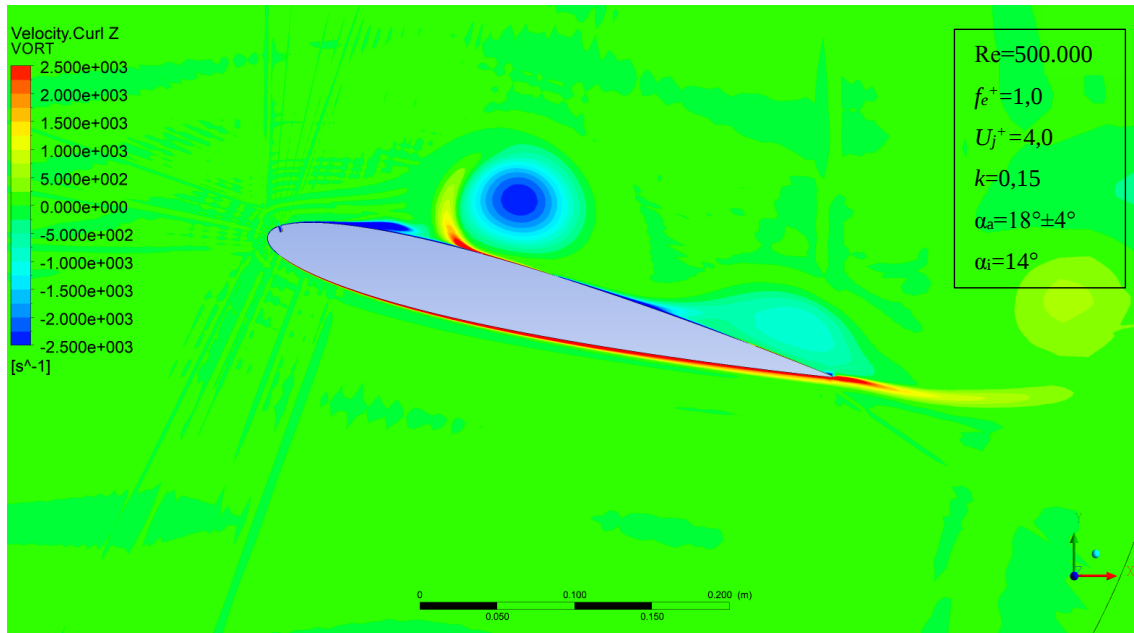
Şekil 6.36. Hücum açısı  $\alpha = 16^\circ$  için yukarı harekette hız dağılımları



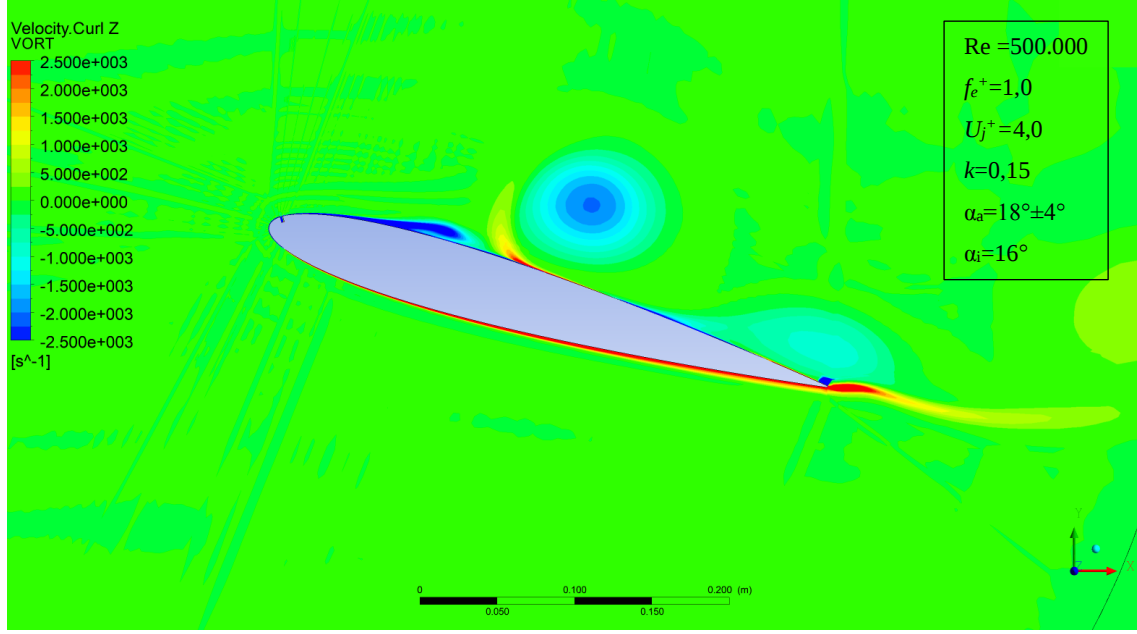
Şekil 6.37. Hücum açısı  $\alpha = 22^\circ$  için yukarı harekette hız dağılımları

Şekil 6.24 de,  $14^\circ$  hücum açısından başlayan salınım hareketi, akışın kanatın üst yüzeyine büyük ölçüde bitişik olduğu görülmektedir. Yüzeyden kopan akışlarda ise, salınım frekansının düşük olması nedeniyle, yüksek oranda jet hızının yarattığı etkiden dolayı anlık olarak gerçekleştiği görülmektedir. Genel olarak, hücum açısının artışı ile birlikte akış ayrılma noktasının hücum kenarına doğru ilerlediği görülmektedir.  $22^\circ$  hücum açısına gelindiğinde üst kanat yüzeyinin orta kısmından itibaren girdap oluşturmaya başlamıştır. Salınımın en üst derecesi olan  $22^\circ$  den hemen geri dönüş bölümünde, akışın yüzeye yükselişten daha fazla şekilde tutunduğu görülmektedir. Akış yüzeyinde yukarı doğru kopmaların olduğu görülmektedir. Bu kopmaların sebebi hem jet frekansının hem de kanat salınım frekansının düşük oranlarda seyrederken, jet hızının yüksek oranlarda devam ederek akışı bozması ve sınır tabakadan uzağa, hızlı bir akış göndermesidir.

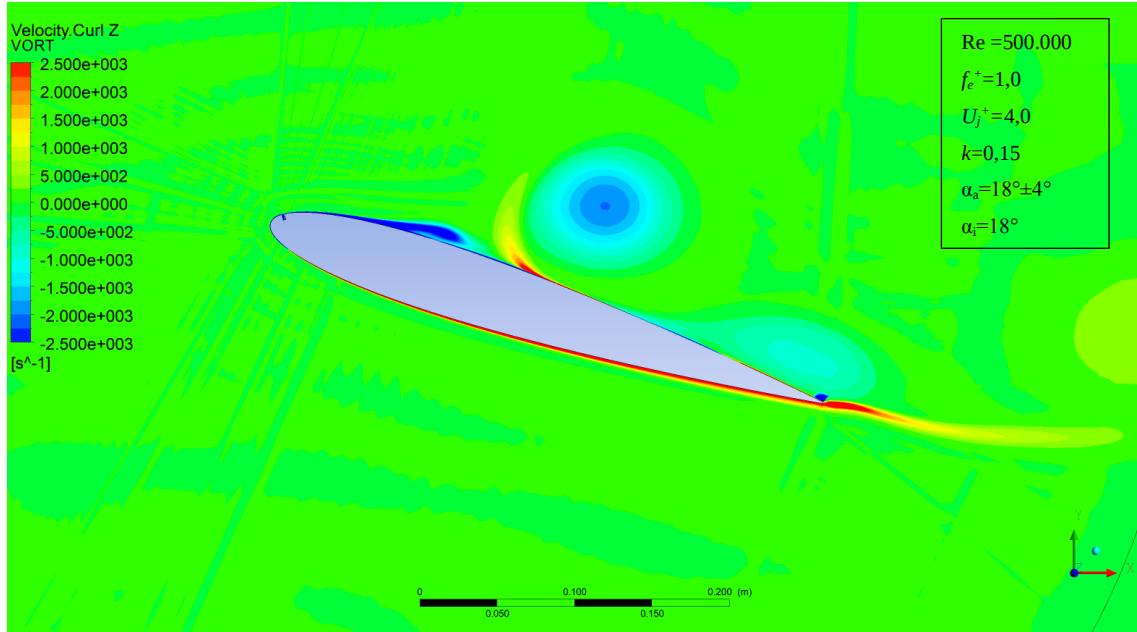
Şekil 6.38-6.46 arasında Analiz-9 parametre değerlerinde belirtilen hücum açılarında kanat çevresindeki girdap dağılımları görülmektedir. Sentetik jet emme durumunda etkili olarak girdap oluşumlarını hücum kenarından uzaklaştırmıştır. Akışın kanat üzerinden ayrılması gecikmekte ve kanat verimliliğine olumlu olarak etki göstermektedir.  $22^\circ$  hücum açısından geri dönüşlerde üfleme zamanlarında akışın oluşturmak istediği negatif yönlü girdapların güçlenmesine izin vermeden girdabın büyümeden bozulmasını sağlamaktadır. Akışın kanat üzerinde ayrılmasına engel olarak verimi artırmaktadır.



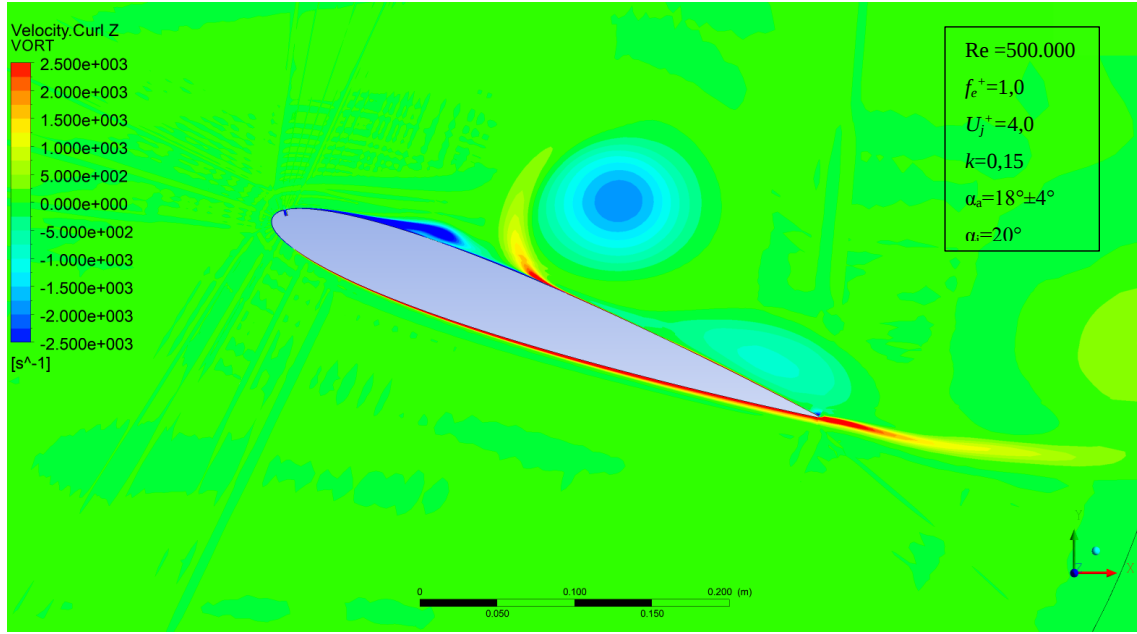
Şekil 6.38. Hücum açısı  $\alpha=14^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



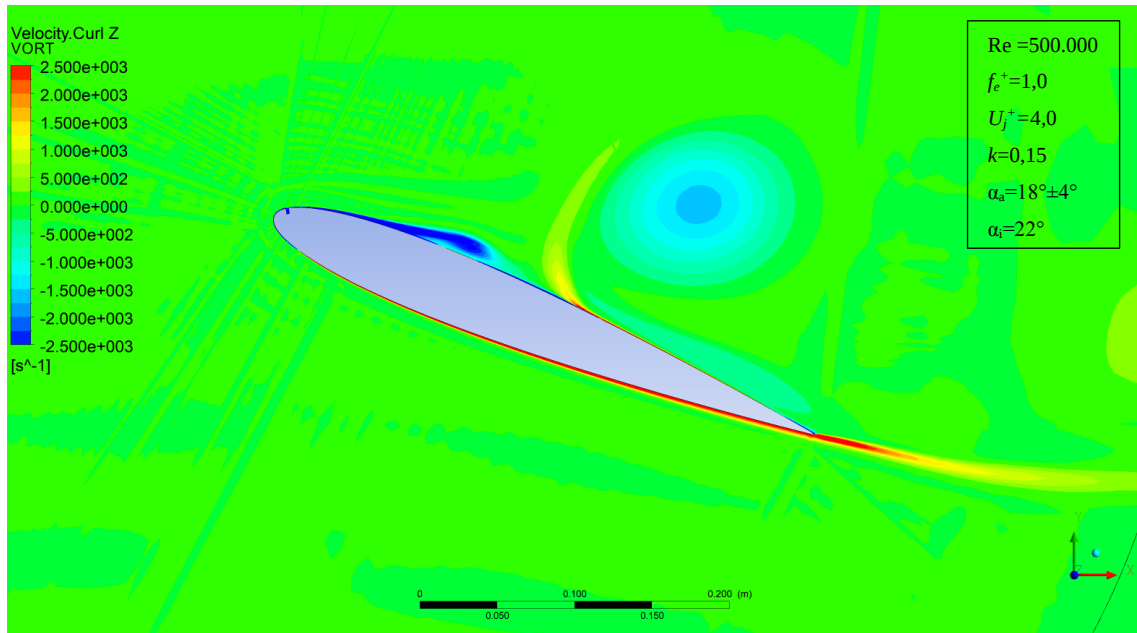
Şekil 6.39. Hücum açısı  $\alpha = 16^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



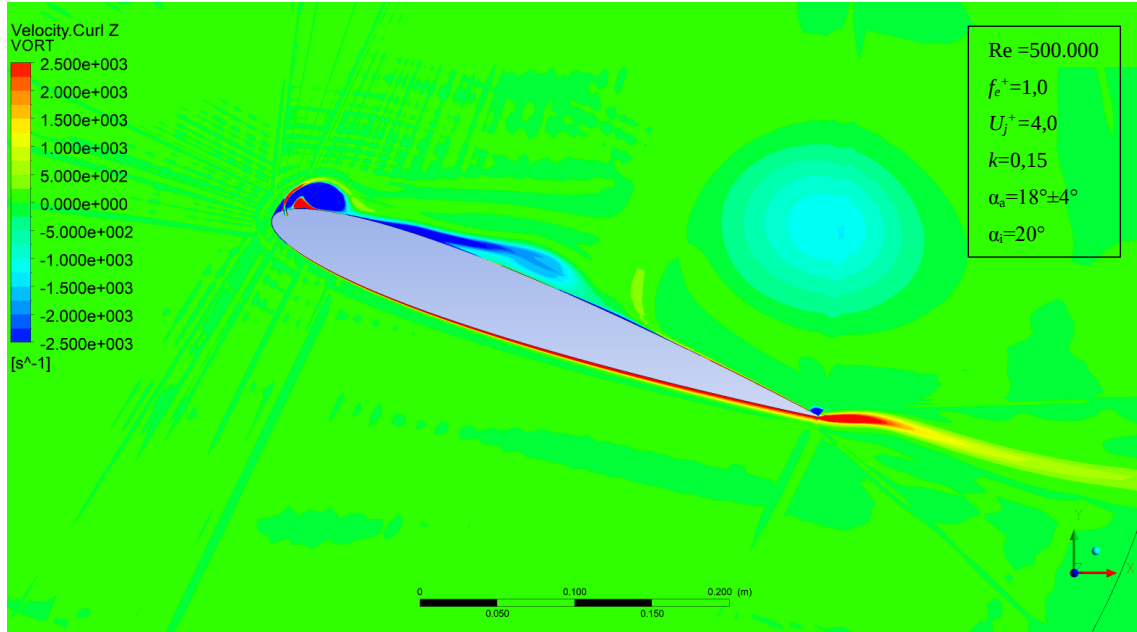
Şekil 6.40. Hücum açısı  $\alpha = 18^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



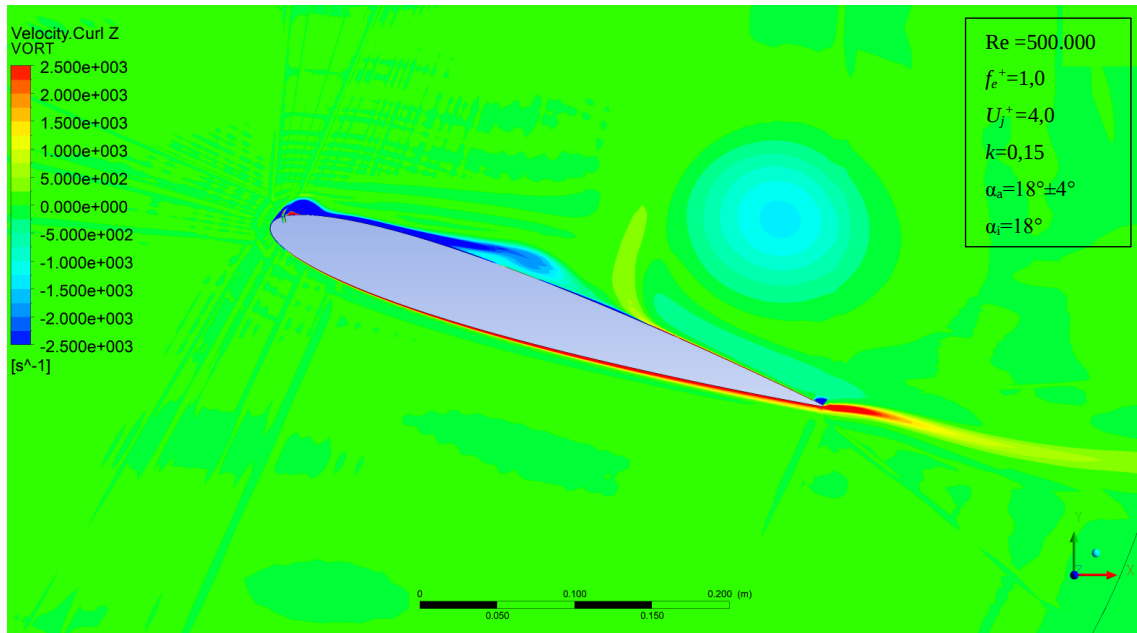
Şekil 6.41. Hücüm açısı  $\alpha=20^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



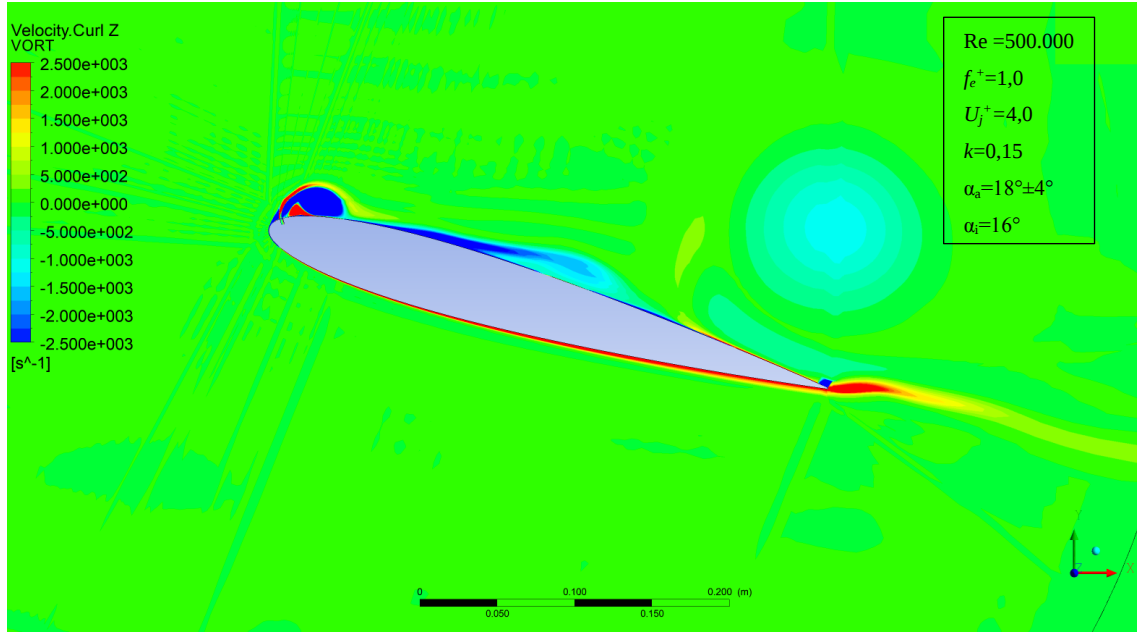
Şekil 6.42. Hücüm açısı  $\alpha=22^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



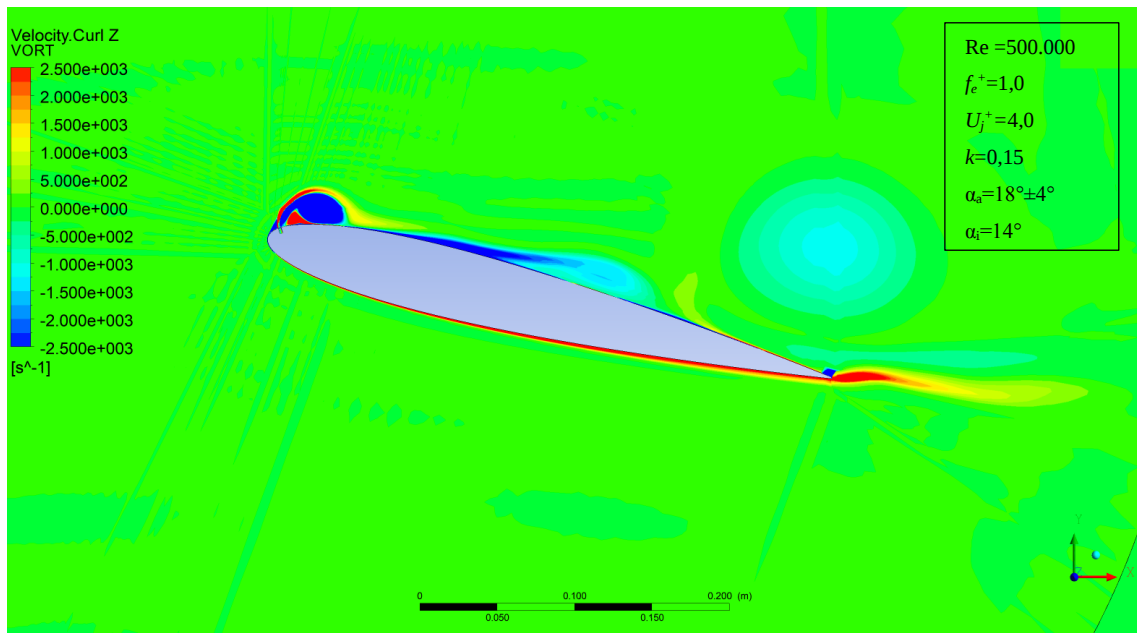
Şekil 6.43. Hücüm açısı  $\alpha=20^\circ$  için aşağı harekette girdap dağılımları



Şekil 6.44. Hücüm açısı  $\alpha=18^\circ$  için aşağı harekette girdap dağılımları



Şekil 6.45. Hücüm açısı  $\alpha=16^\circ$  için aşağı harekette girdap dağılımları



Şekil 6.46. Hücüm açısı  $\alpha=14^\circ$  için aşağı harekette girdap dağılımları

$f_e^+$  1,5 sabit değerindeki çalışmalar;

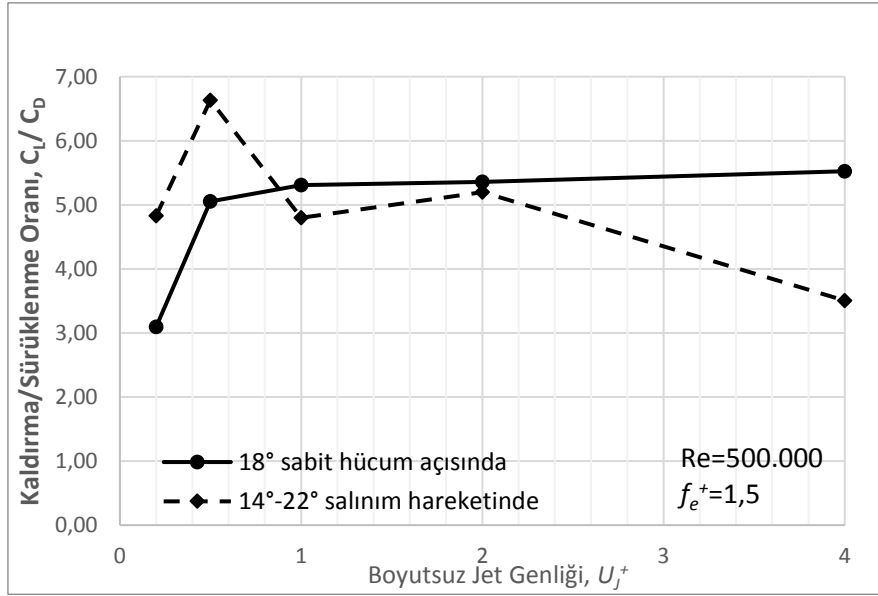
Çizelge 6.8.  $f_e^+=1,5$  için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları

| Analiz No. | Parametreler |         |      | Yukarı hareket katsayıları |       |           |
|------------|--------------|---------|------|----------------------------|-------|-----------|
|            | $f_e^+$      | $U_j^+$ | $k$  | $C_L$                      | $C_D$ | $C_L/C_D$ |
| 15         | 1,5          | 0,2     | 0,2  | 0,274                      | 1,323 | 4,828     |
| 11         | 1,5          | 0,5     | 0,5  | 0,160                      | 1,058 | 6,633     |
| 12         | 1,5          | 1       | 1    | 0,296                      | 1,420 | 4,796     |
| 13         | 1,5          | 2       | 0,15 | 0,220                      | 1,146 | 5,199     |
| 14         | 1,5          | 4       | 0,1  | 0,365                      | 1,279 | 3,506     |

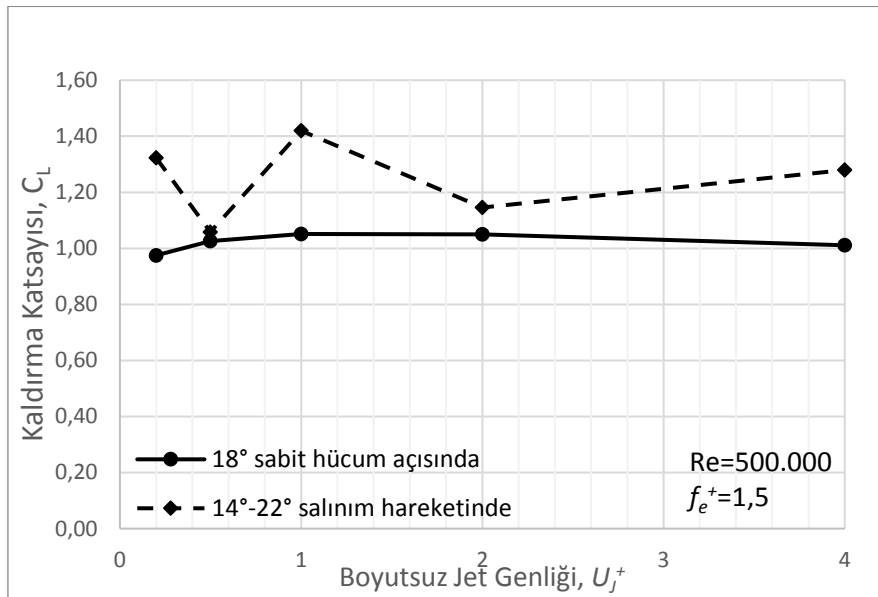
Çizelge 6.9.  $f_e^+=1,5$  için  $U_j^+$  değer aralıkları ve  $C_L$  üzerine baskın parametreler

| $U_j^+$ değer aralıkları ve baskın parametreler |           |                        |                        |                         |
|-------------------------------------------------|-----------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| $f_e^+$                                         | 0,2-0,5   | 0,5-1,0                | 1,0-2,0                | 2,0-4,0                 |
| 1,5                                             | $\approx$ | $k \blacktriangledown$ | $U_j^+ \blacktriangle$ | $k \blacktriangleright$ |

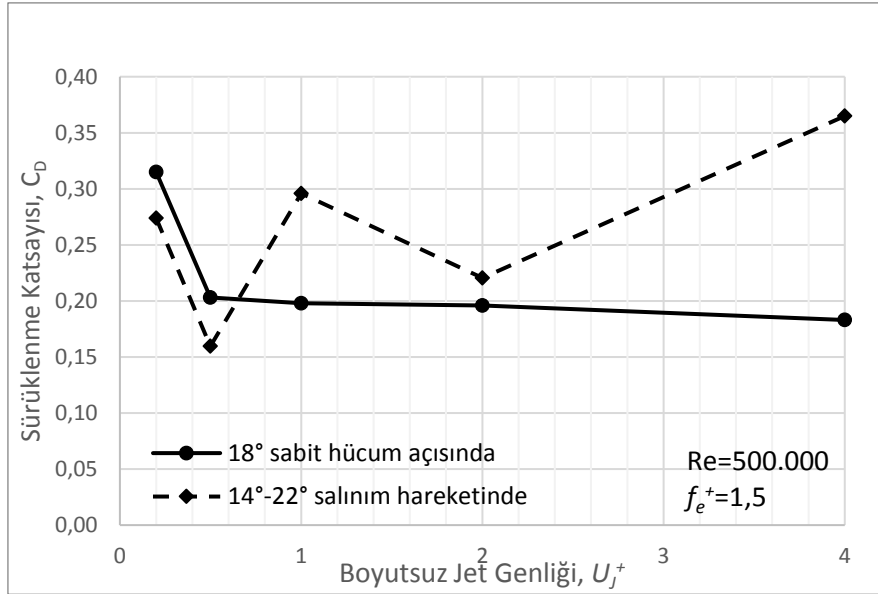
$f_e^+$ , jet frekansının sabit 1,5 olduğu durumlardan itibaren görülmektedir ki, kanat salınımı jet hızı üzerinde baskın bir rol oynamaya başlamıştır. 0,2-0,5 aralığındaki jet hızında artış gösteren aerodinamik verime jet hızı ve kanat salınımı beraber etki etmektedir. 0,5-1,0 aralığında, jet hızı artışına rağmen aerodinamik verimin azalması, sürüklenme kuvvetinin daha fazla gelişme göstermesinden kaynaklanmaktadır. 1,0-2,0 değerleri arasındaki jet hızında, kanat salınıminin 1,0'dan 0,15'e düşmesine rağmen aerodinamik verimde artış görülmektedir. Bu bölümde, jet hızının artışının etkisinin baskın olduğu görülmektedir. 2,0-4,0 jet hızındaki analiz geçişlerinde genel olarak akış karakteristiği, kanat salınım frekansının etkisinde kalmaktadır. Jet hızındaki artışa rağmen, 0,15-0,1 arası salınım frekansı düşüşü aerodinamik verimi olumsuz etkilemektedir. Hem kaldırma katsayısında hem sürüklenme katsayısında artış görülmüş ancak verim azalma yönünde tepki göstermiştir.



Şekil 6.47.  $f_e^+=1,5$  için yukarı hareketinde  $C_L/C_D$  karşılaştırmaları



Şekil 6.48.  $f_e^+=1,5$  için yukarı yönlü hareketinde  $C_L$  karşılaştırmaları



Şekil 6.49.  $f_e^+=1,5$  için yukarı yönlü hareketinde  $C_D$  karşılaştırmaları

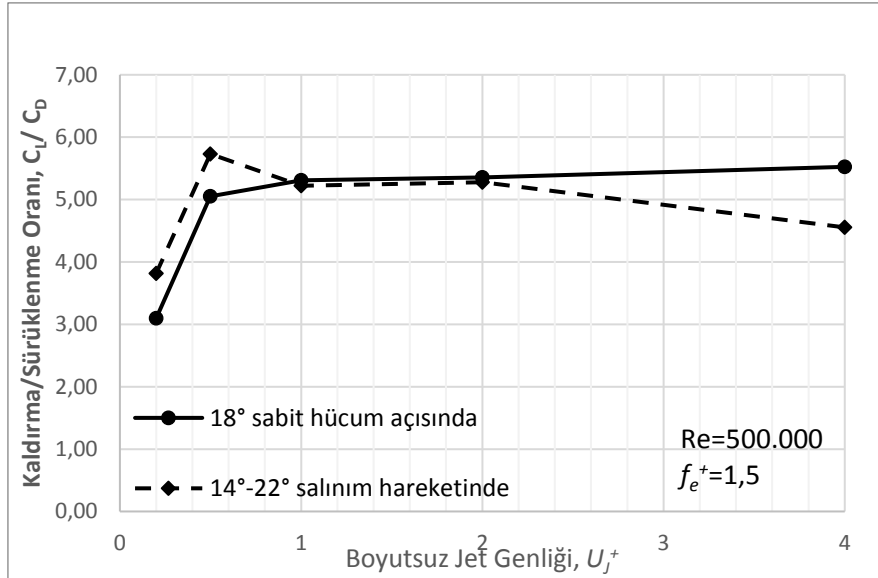
Bu frekans değerindeki, jet hızının değerlendirilmesi için yapılan 9 numaralı analizin serbest akış çizgilerini farklı hücum açılarındaki inceleyebiliriz. Bu analizlerde  $14^\circ$  hücum açısından başlayan salınım hareketine  $22^\circ$  hücum açısına ulaşmış tekrar  $14^\circ$  ye dönüşünde  $2^\circ$  derecelik açılarla akış çizgileri kaydedilmiştir. Yukarı harekette yorumları yapılan bölümlerin, hangi akış karakteristiğinden etkilendiği görülebilir.

#### Salınım hareketinde elde edilen katsayılar, $f_e^+=1,5$

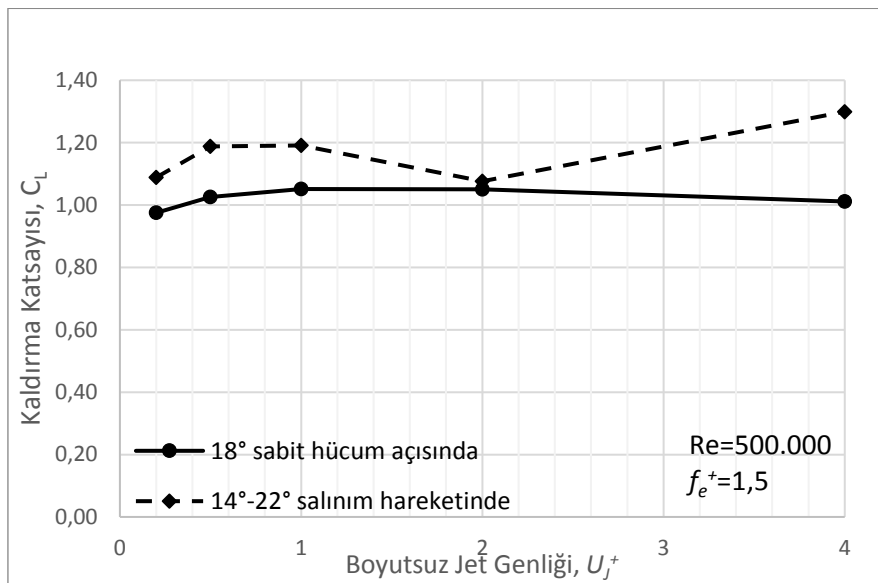
Çizelge 6.10'da 1,5 sabit boyutsuz jet frekansında  $14^\circ$ - $22^\circ$  salınım tam döngüsünde,  $(f_e^+)$ , değişken boyutsuz jet hızına  $(U_j^+)$  ve indirgenmiş salınım katsayısına  $(k)$  göre, kaldırma, sürüklenme katsayıları ve kaldırma/sürüklenme oranları görülmektedir.

Çizelge 6.10.  $f_e^+=1,5$  için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları

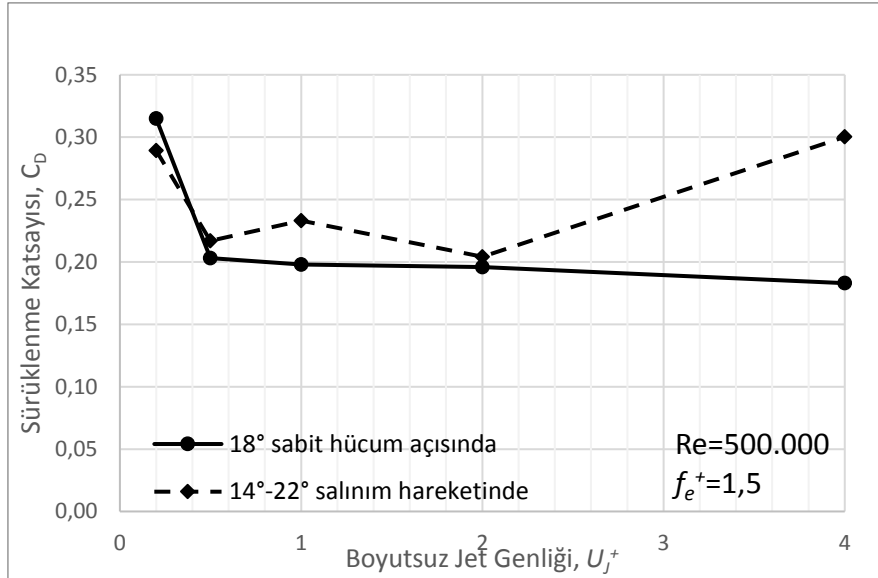
| Analiz No. | Parametreler |         |      | Salınım hareketi katsayıları |       |           |       |
|------------|--------------|---------|------|------------------------------|-------|-----------|-------|
|            | $f_e^+$      | $U_j^+$ | $k$  | $C_L$                        | $C_D$ | $C_L/C_D$ | $C_M$ |
| 15         | 1,5          | 0,2     | 0,2  | 0,289                        | 1,088 | 3,815     | 0,069 |
| 11         | 1,5          | 0,5     | 0,5  | 0,217                        | 1,188 | 5,731     | 0,073 |
| 12         | 1,5          | 1       | 1    | 0,233                        | 1,191 | 5,223     | 0,065 |
| 13         | 1,5          | 2       | 0,15 | 0,204                        | 1,076 | 5,278     | 0,048 |
| 14         | 1,5          | 4       | 0,1  | 0,3                          | 1,3   | 4,553     | 0,072 |



Şekil 6.50.  $f_e^+=1,5$  için salınım hareketinde  $C_L/C_D$  karşılaştırmaları



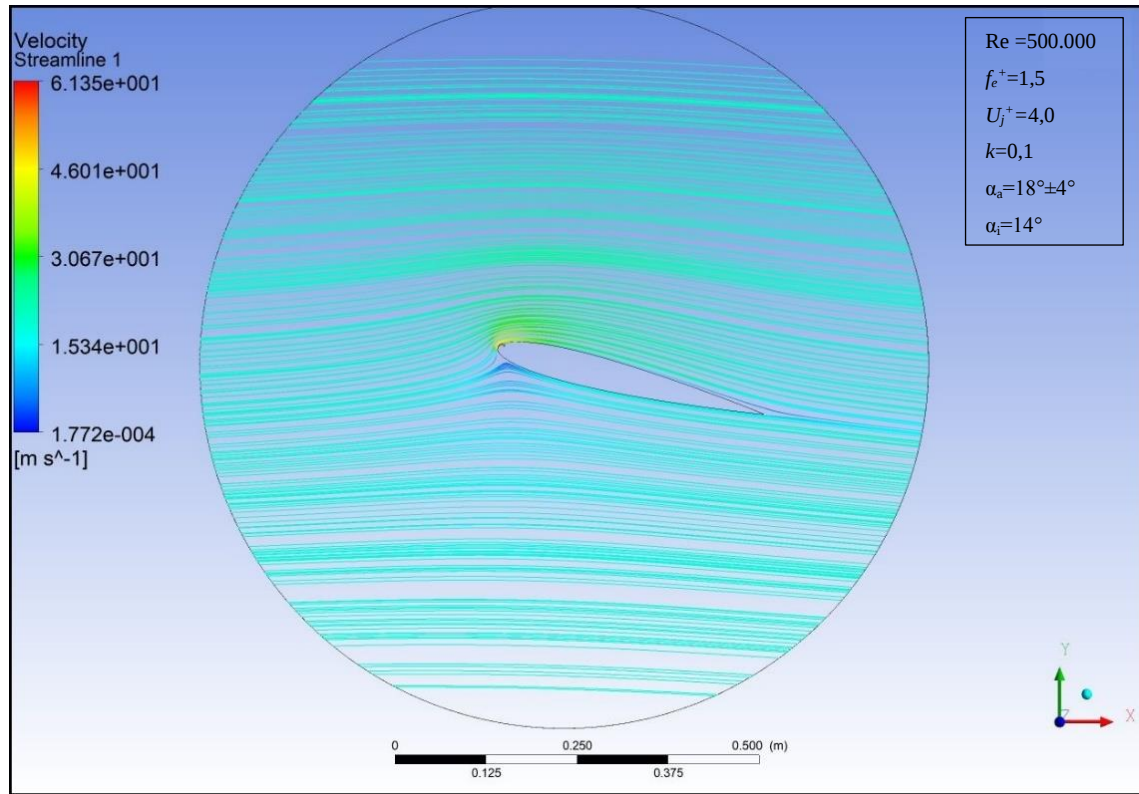
Şekil 6.51.  $f_e^+=1,5$  için salınım hareketinde  $C_L$  karşılaştırmaları



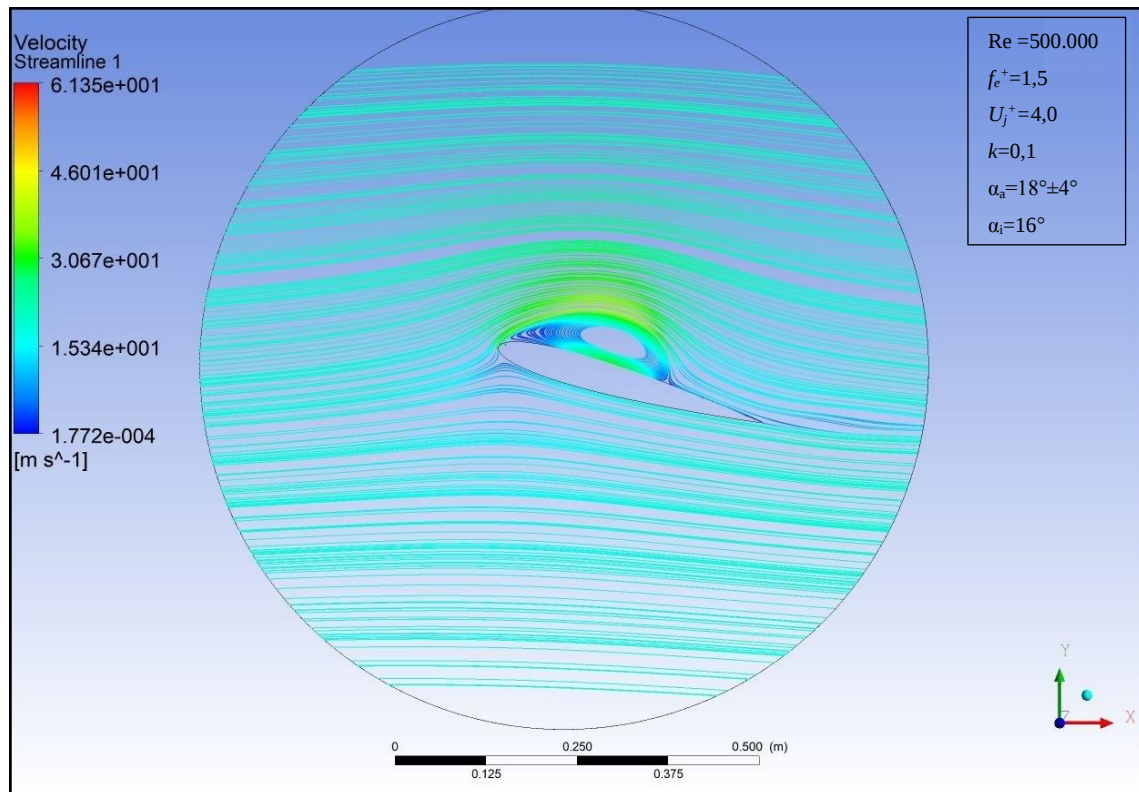
Şekil 6.52.  $f_e^+=1,5$  için salınım hareketinde  $C_D$  karşılaştırmaları

Şekil 6.53-6.61 arasında, 14 numaralı parametrelerde yapılan analizin, kanat çevresindeki serbest akış çizgileri görülmektedir.  $14^\circ$  hücum açısında salınıma başlayan kanat profilinin serbest akış çizgileri  $2^\circ$ lik açılarla anlık olarak şekillerde gösterilmiştir.

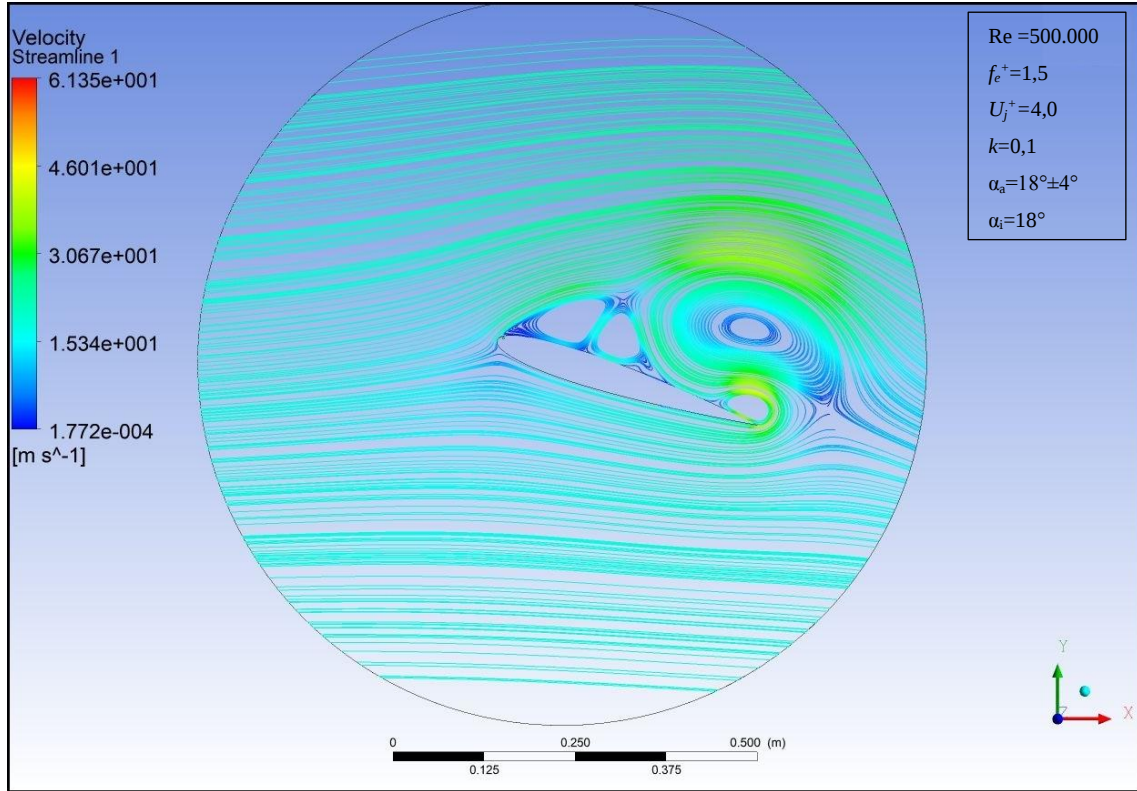
$14^\circ$  de salınıma başlayan kanat üzerinde akışın bağlı olduğu görülmektedir. Yukarı harekete başlayan kanatın, yüksek orandaki jet hızının etkisi ve jet frekansının artışı ile hücum kenarına yakın bölümden akış ayrılımları oluşturduğu ancak kopan akışın kanat üst yüzeyi boyunca geri bağlanma fırsatı olduğu ve tüm kanat boyunca oluşturduğu girdap sonucu kaldırma kuvvetinde düşüşe sebep olmaktadır. Bir önceki başlıkta incelenen, değerlere göre kaldırma kuvvetinde düşüş görülmektedir.



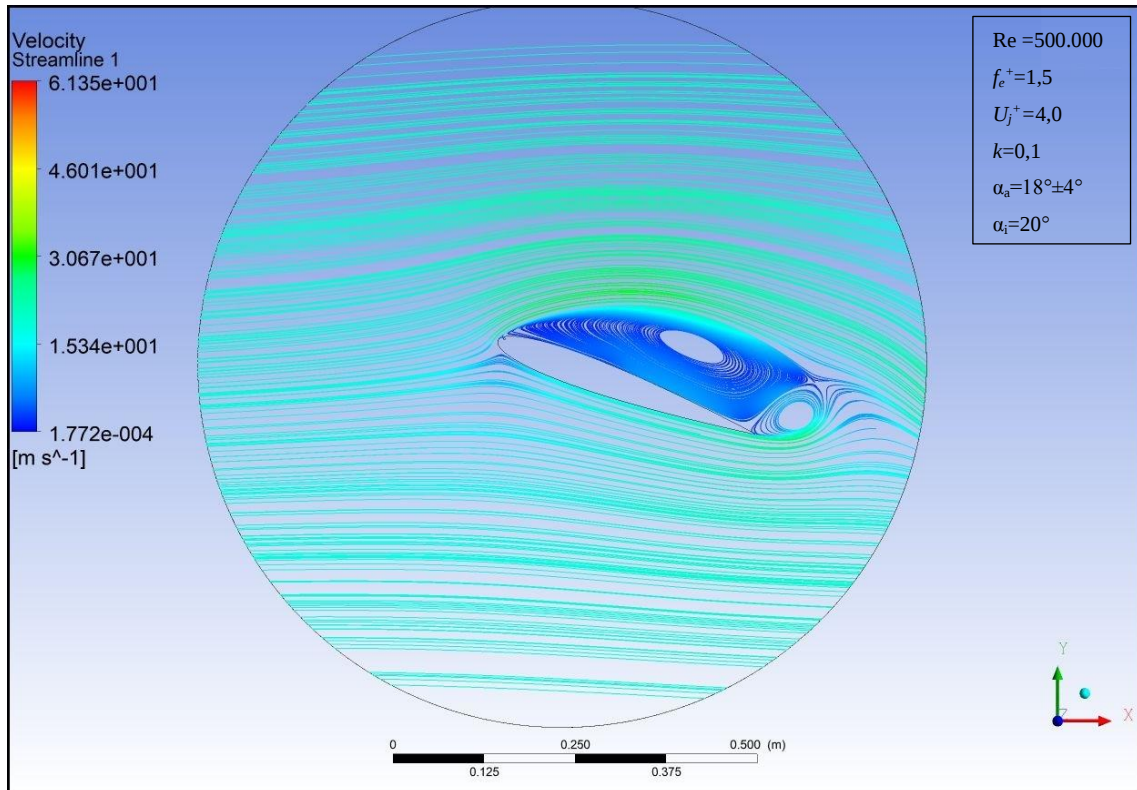
Şekil 6.53. Hücüm açısı  $\alpha = 14^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



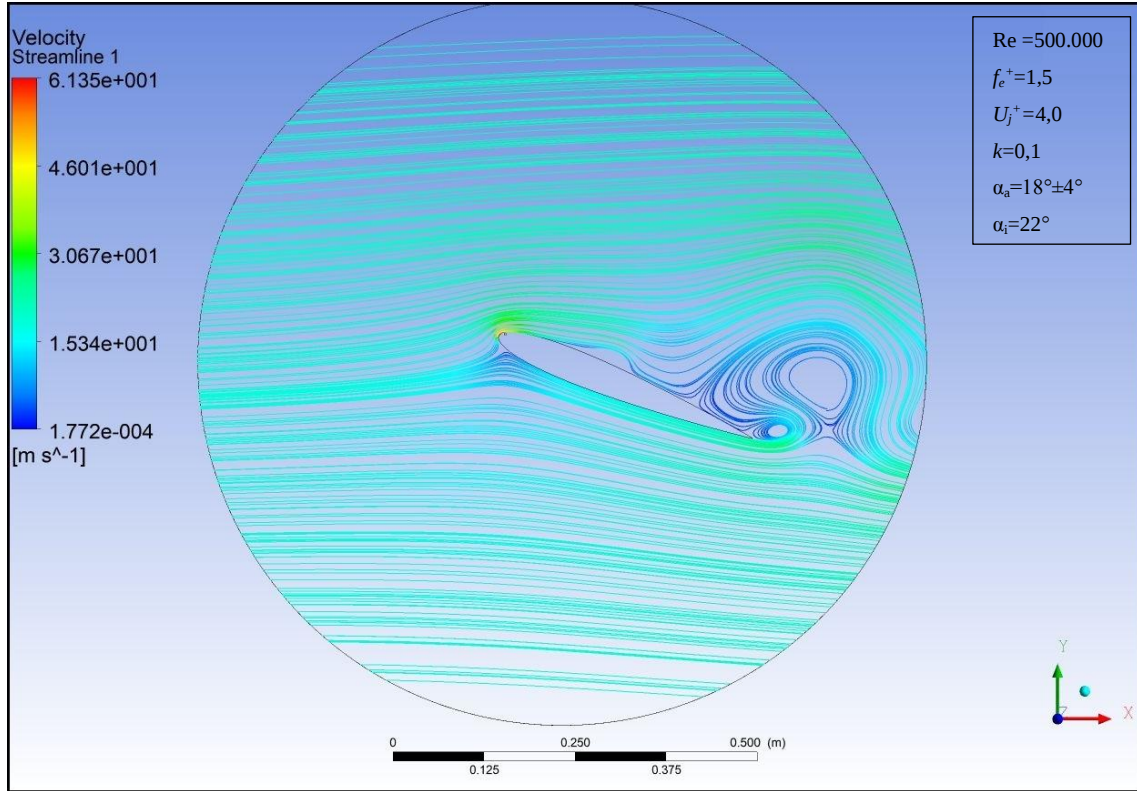
Şekil 6.54. Hücüm açısı  $\alpha = 16^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



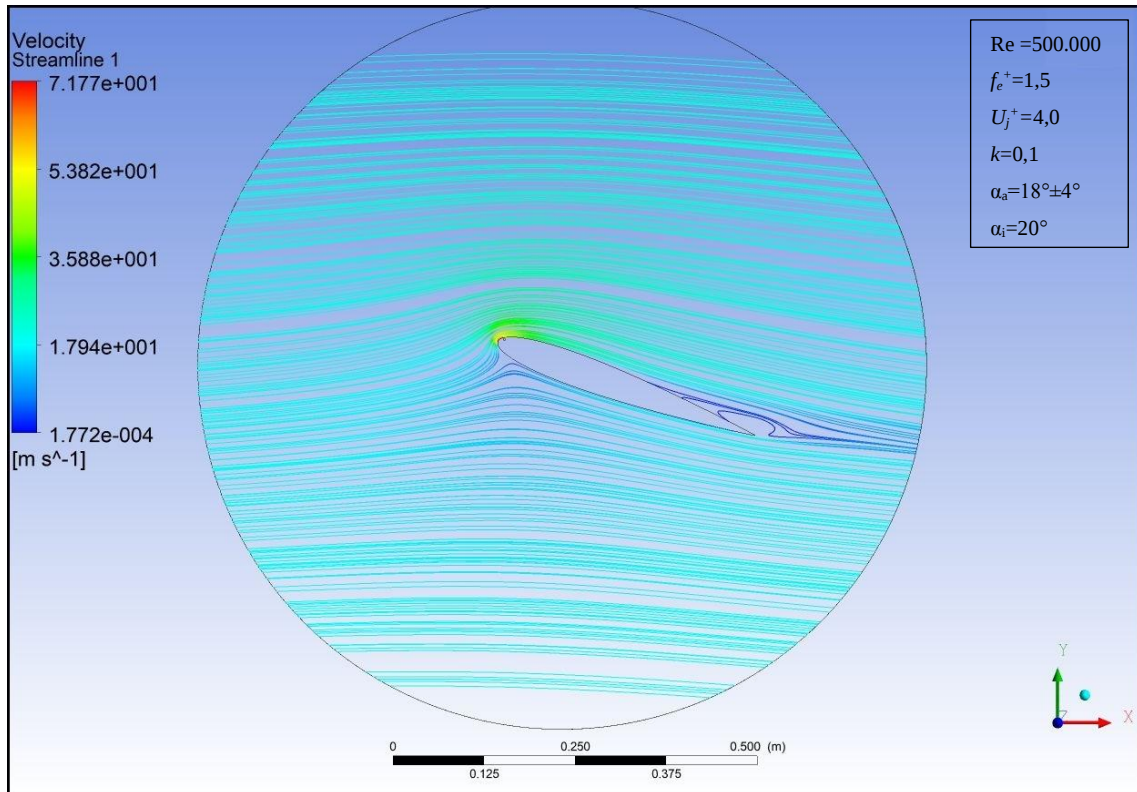
Şekil 6.55. Hücüm açısı  $\alpha = 18^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



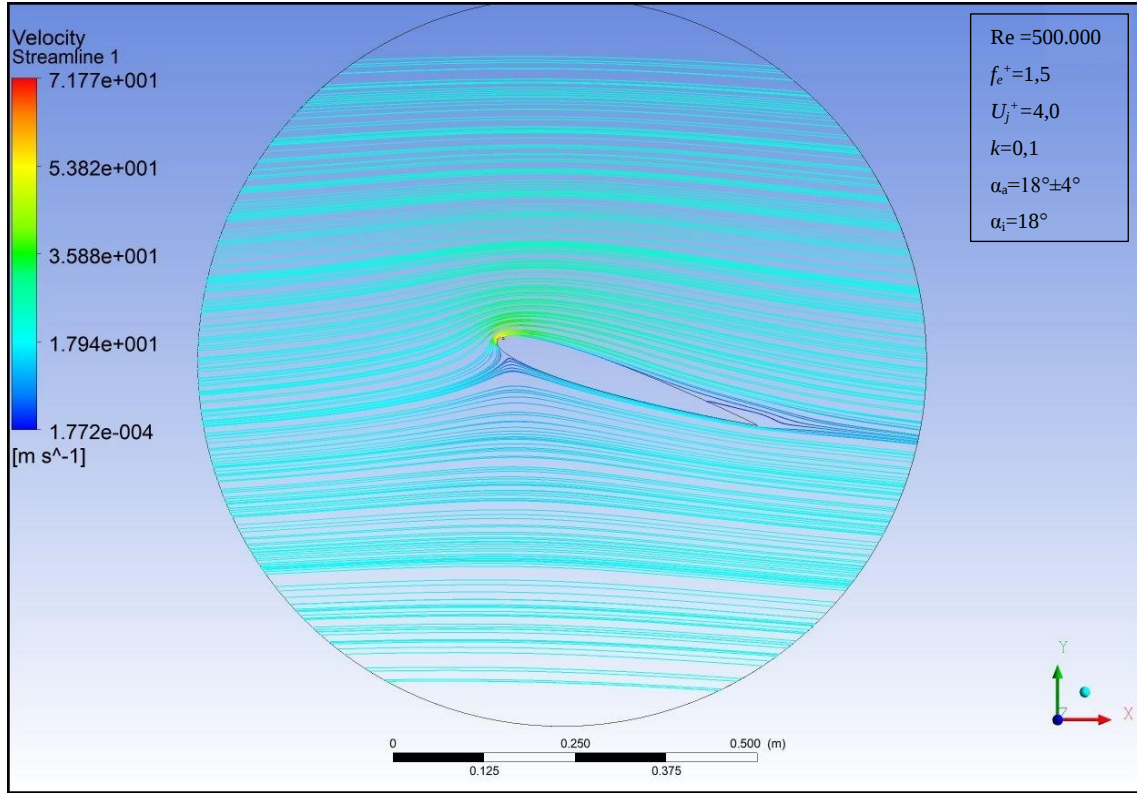
Şekil 6.56. Hücüm açısı  $\alpha = 20^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



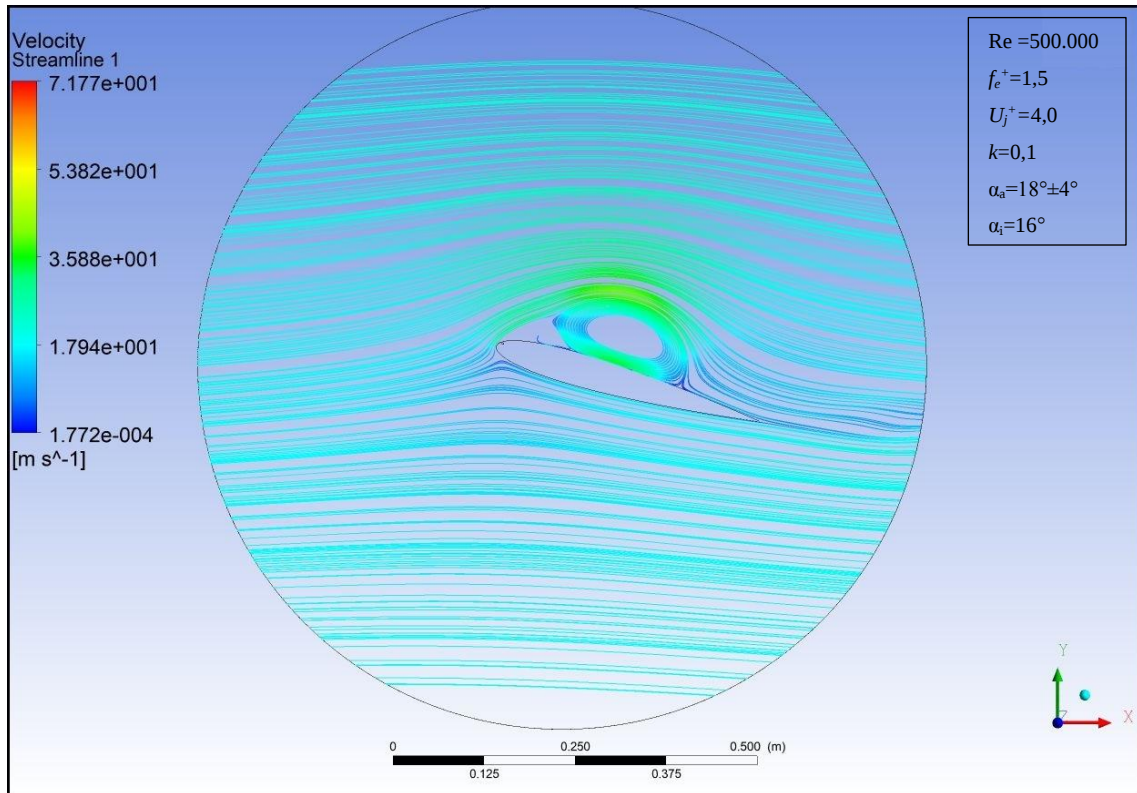
Şekil 6.57. Hücüm açısı  $\alpha = 22^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



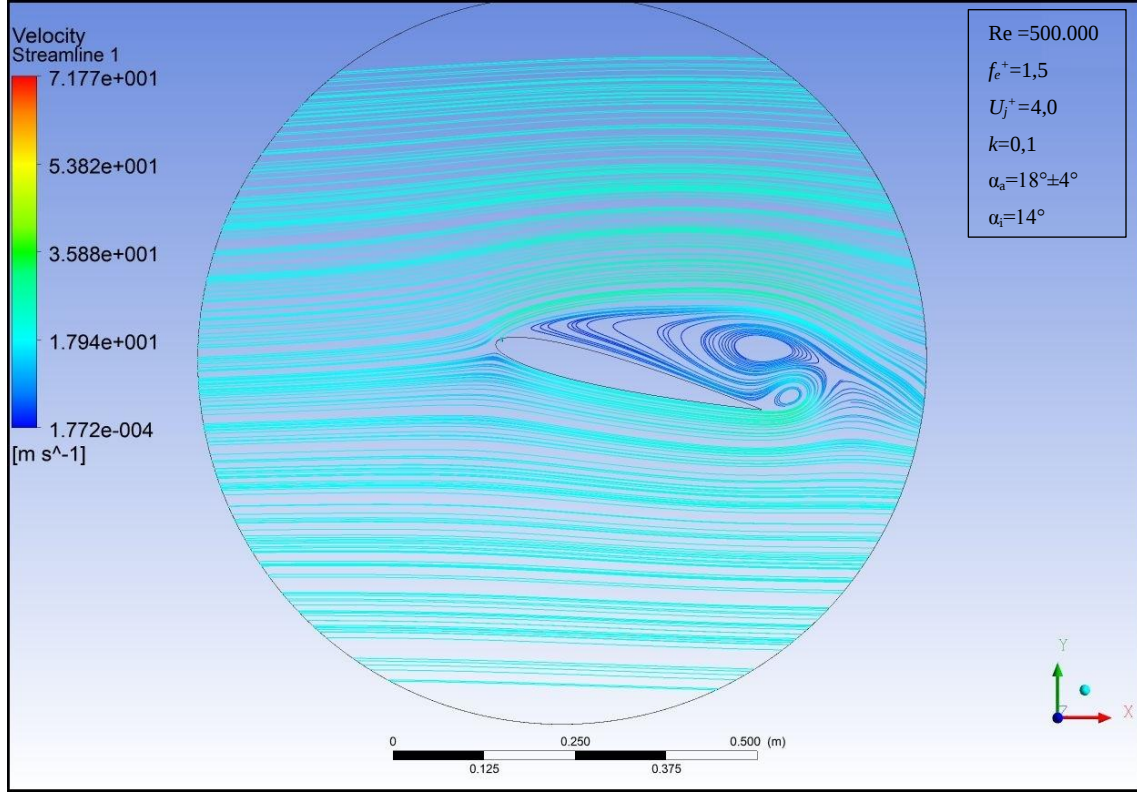
Şekil 6.58. Hücüm açısı  $\alpha = 20^\circ$  için aşağı harekette serbest akış çizgileri



Şekil 6.59. Hücüm açısı  $\alpha = 18^\circ$  için aşağı harekette serbest akış çizgileri

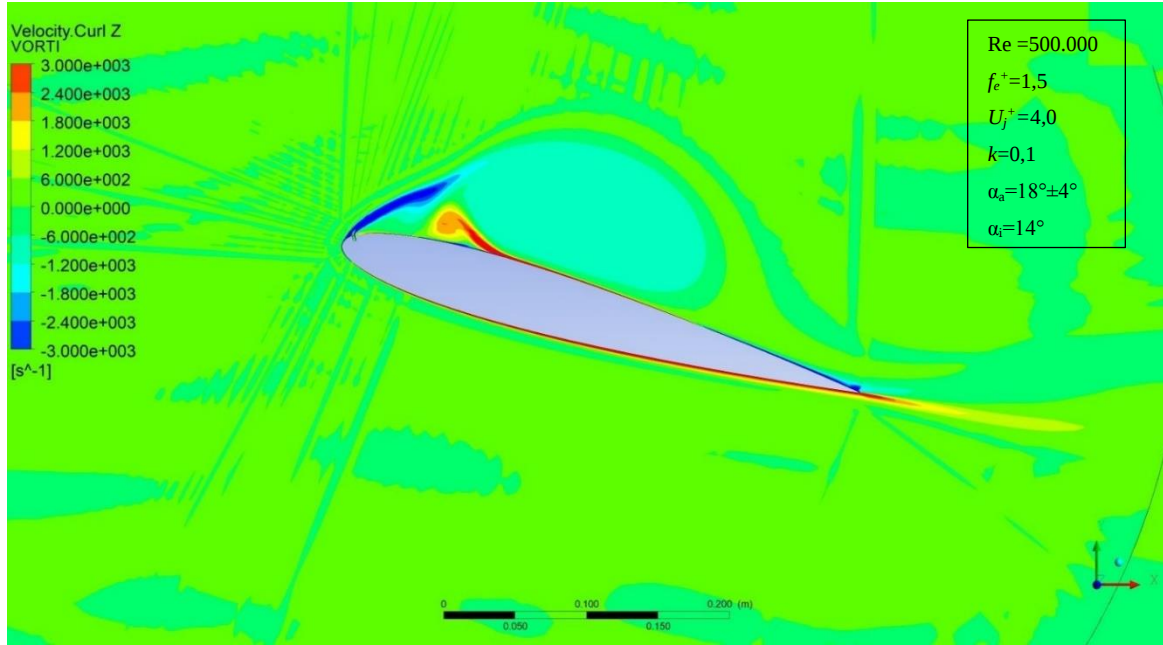


Şekil 6.60. Hücüm açısı  $\alpha = 16^\circ$  için aşağı harekette serbest akış çizgileri

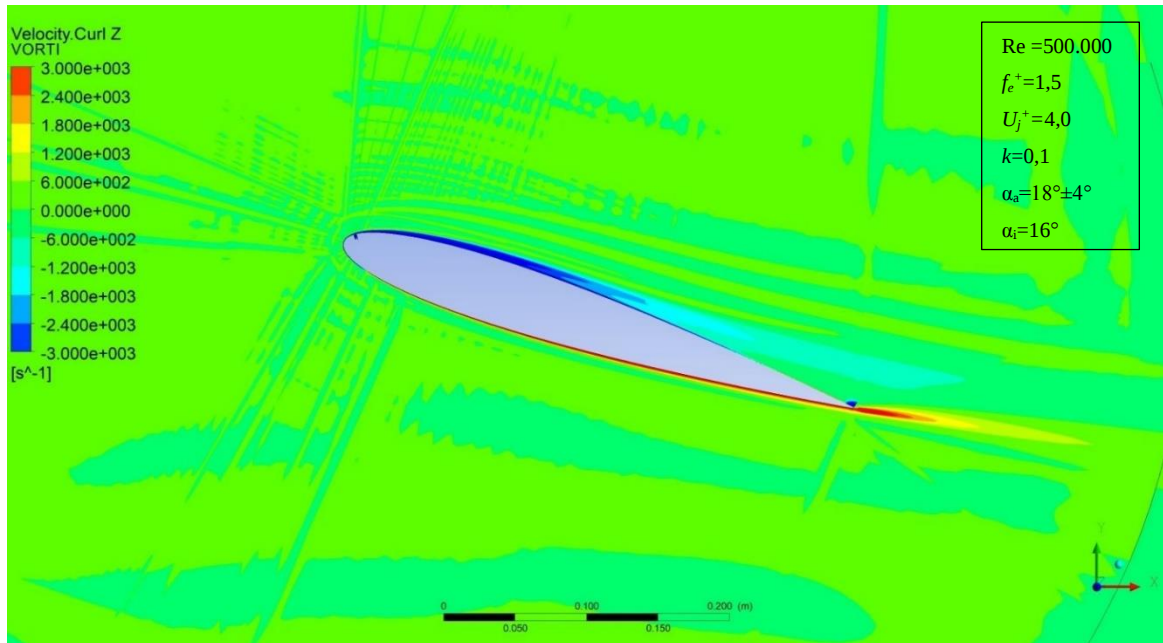


Şekil 6.61. Hücüm açısı  $\alpha=14^\circ$  için aşağı harekette serbest akış çizgileri

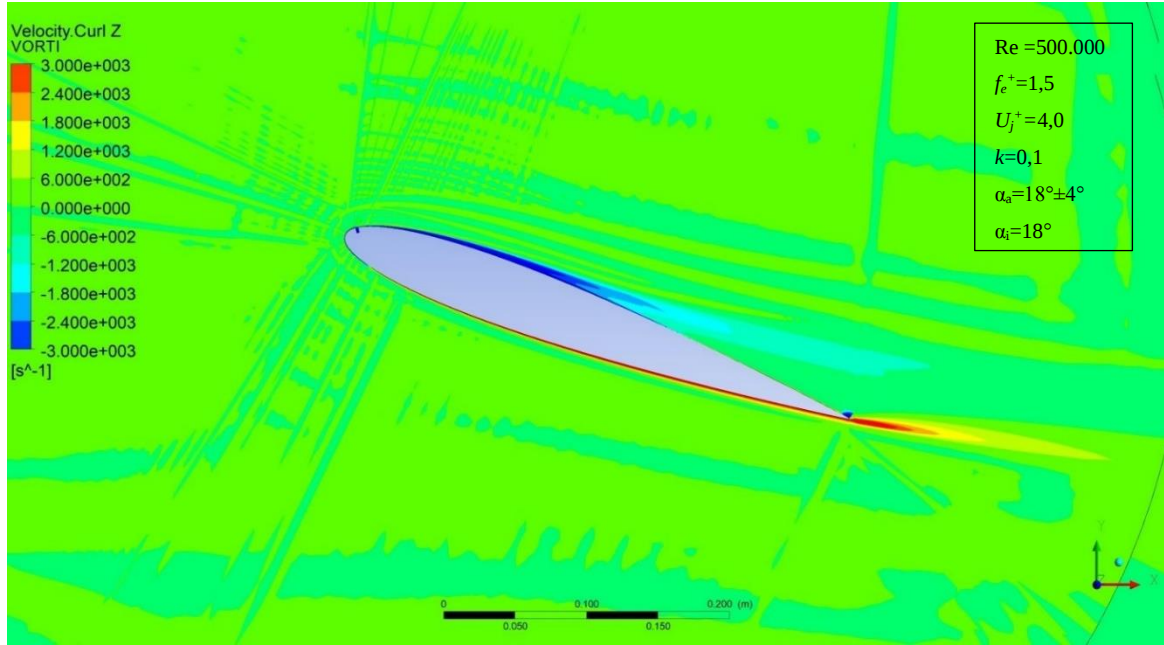
Şekil 6.62-6.70. arasında Analiz-14 parametre değerlerinde belirtilen hücüm açılarında kanat çevresindeki girdap dağılımları görülmektedir. Sentetik jet düşük açılarda emme durumunda iken akışın kanat üzerinden ayrılmasını engellemiştir. Ancak üfleme durumunda daha büyük hücüm açılarında doğru kanat duvarı üzerinde sınır tabakasını bozarak akış ayrılmasını ve akış üzerinde girdap oluşumuna sebep olmuştur.  $18^\circ$  hücüm açısında sentetik jetin oluşturduğu negatif yönlü girdabın devamında pozitif yönlü girdap ile kanatın kuyruk bölümüne doğru akış ayrılması görülmektedir. Bu ayrılma toplam kanat veriminde düşüşe neden olmuştur.  $22^\circ$  hücüm açısında ve geri dönüş hücüm açılarında, sentetik jet emme akışın hem kanat üzerinde kalmasına katkı sağlamış hem de girdap oluşumunu negatif yönlü oluşturarak akışın yüzeyden tamamen kopmasına engel olmuştur.



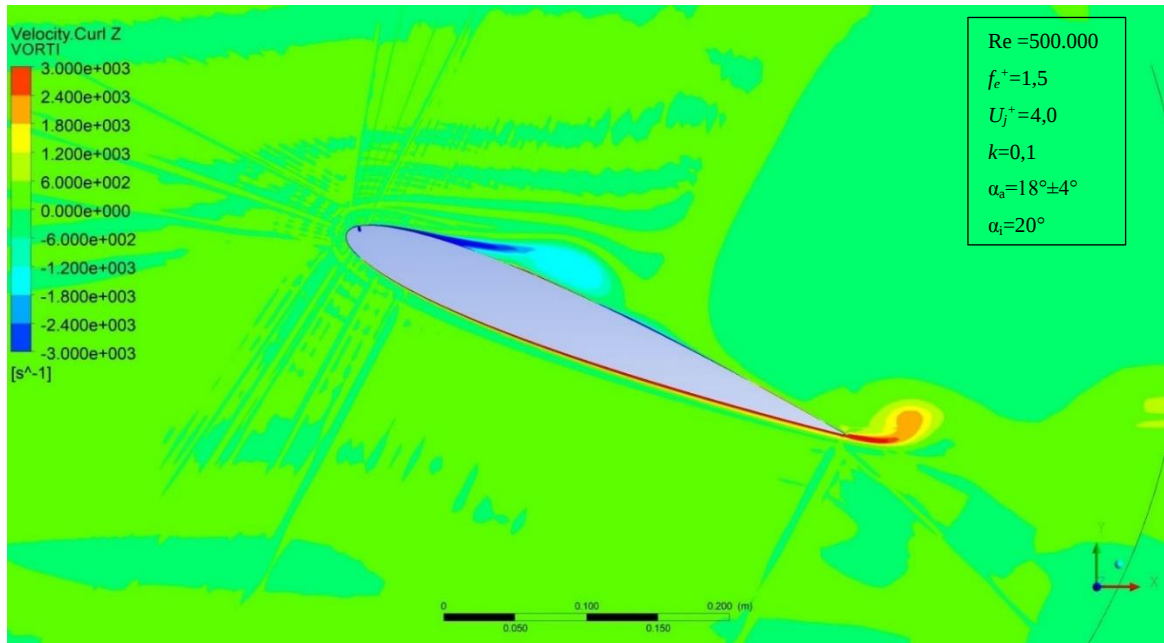
Şekil 6.62. Hücüm açısı  $\alpha = 14^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



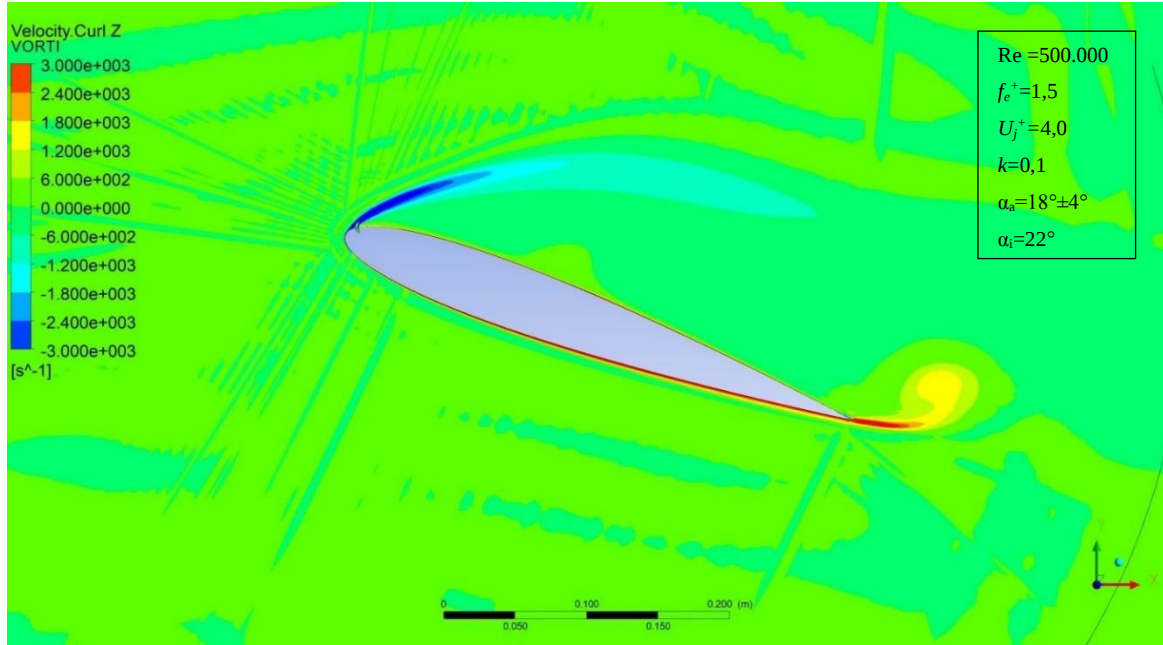
Şekil 6.63. Hücüm açısı  $\alpha = 16^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



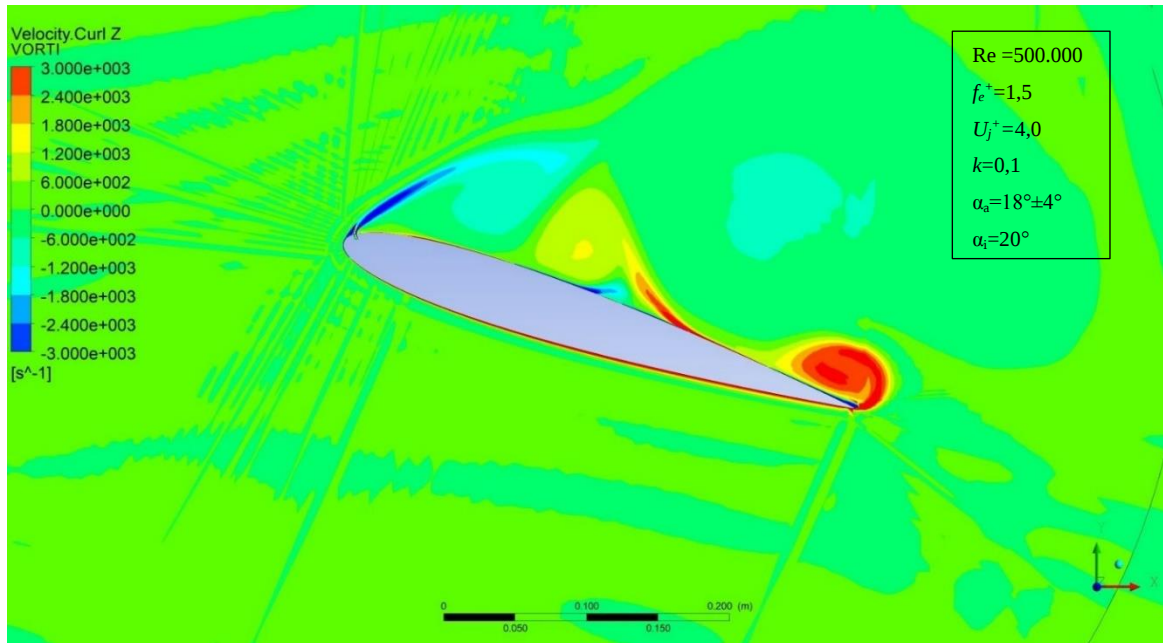
Şekil 6.64. Hücüm açısı  $\alpha = 18^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



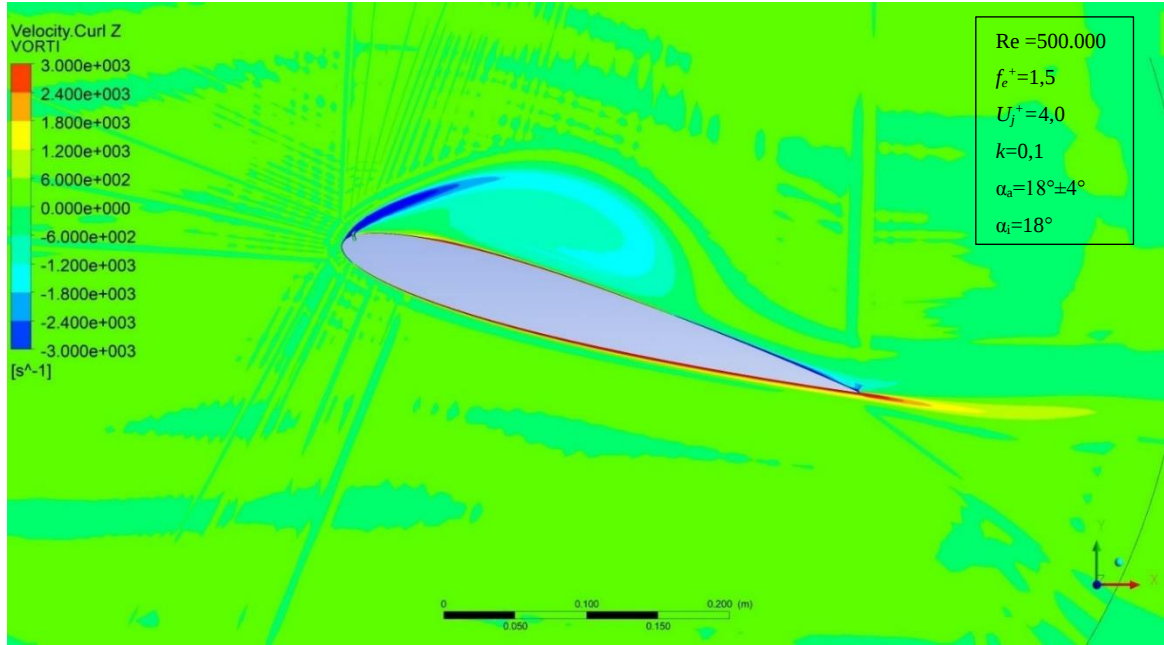
Şekil 6.65. Hücüm açısı  $\alpha = 20^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



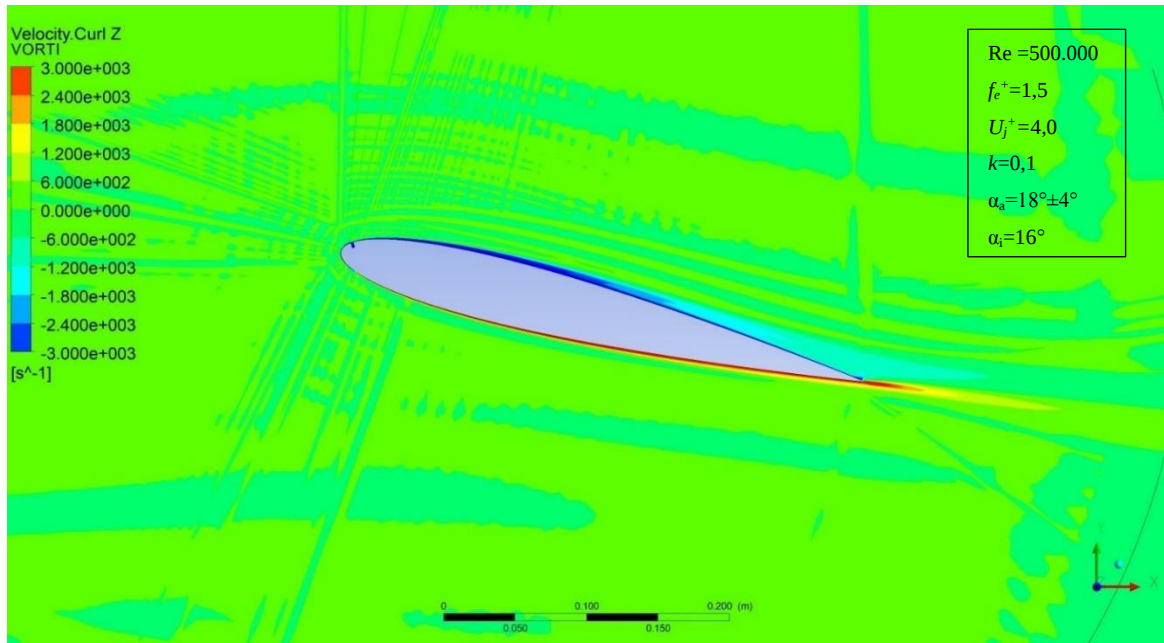
Şekil 6.66. Hücüm açısı  $\alpha = 22^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



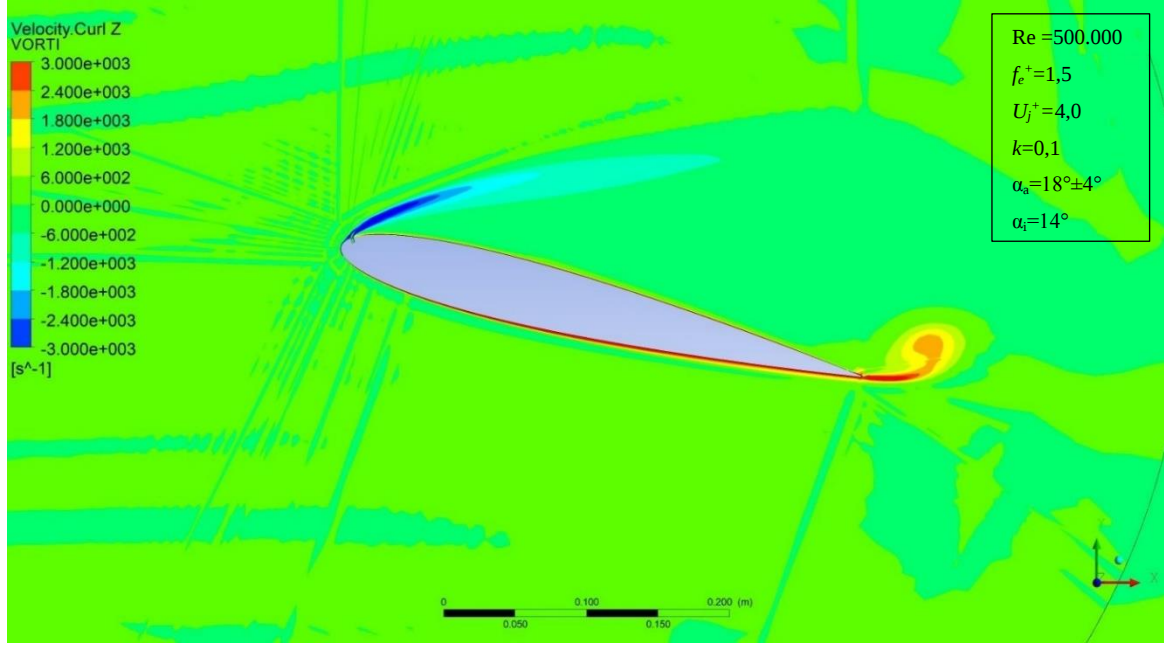
Şekil 6.67. Hücüm açısı  $\alpha = 20^\circ$  için aşağı harekette girdap dağılımları



Şekil 6.68. Hücüm açısı  $\alpha = 18^\circ$  için aşağı harekette girdap dağılımları

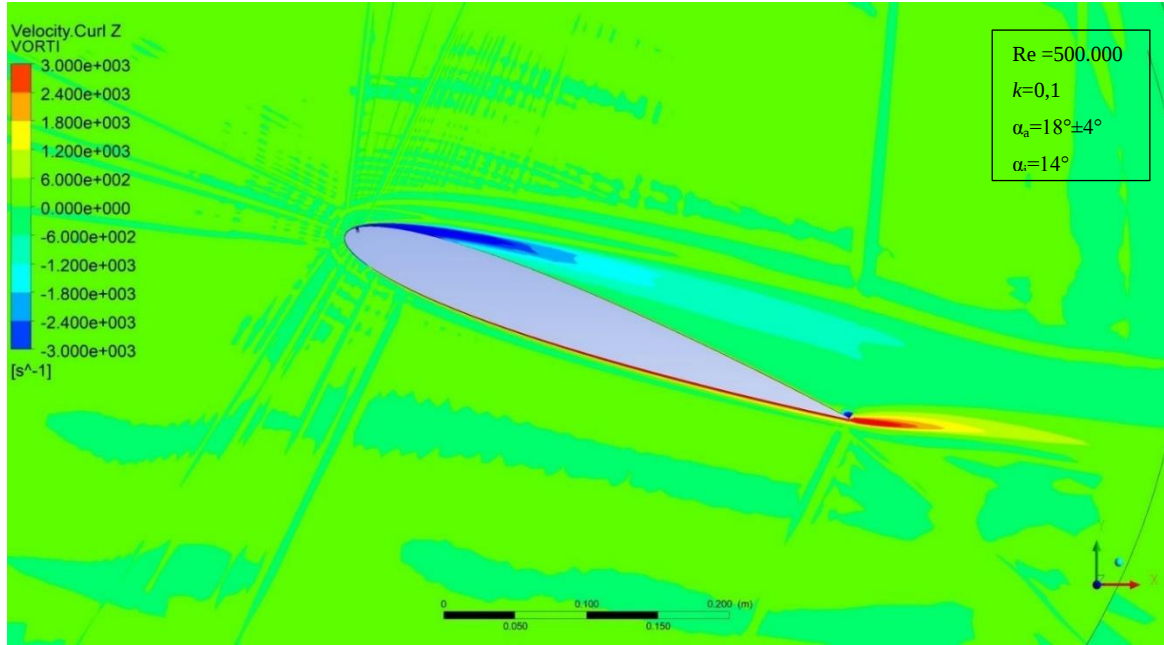


Şekil 6.69. Hücüm açısı  $\alpha = 16^\circ$  için aşağı harekette girdap dağılımları

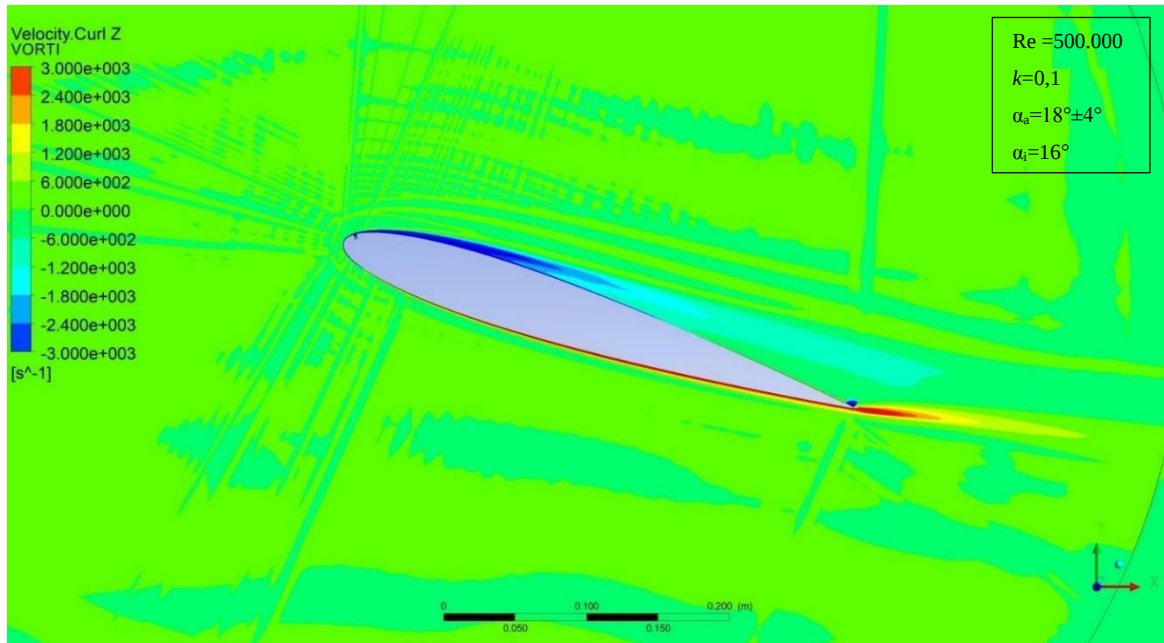


Şekil 6.70. Hücüm açısı  $\alpha=14^\circ$  için aşağı harekette girdap dağılımları

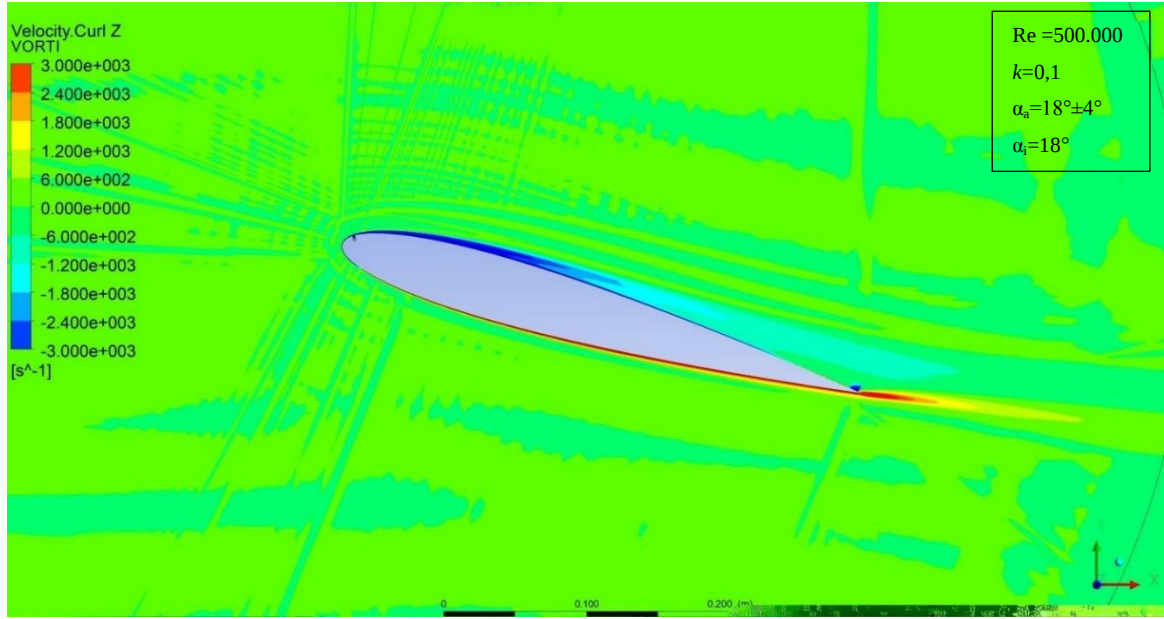
Analiz-4 kanat salınımı şartlarında ancak jetsiz olarak yapılan analizin girdap dağılımları Şekil.. de görülmektedir. Jetli analiz durumuna göre karşılaştırıldığında, üfleme olmadığı için salınım etkisi ile  $20^\circ$  hücüm açılarına geldiğinde akış ayrılmalarında girdapların kopması engellenemez. Bu hücüm açısından itibaren akış kanat üzerinden ayrılır verim düşer. Kanat üzerinden ayrılan akış büyük girdap yapılarını oluşturur. Kanat üzerindeki akışın yavaşlaması ile birlikte kanat alt yüzeyinden gelen akış kanat üst yüzeyine pozitif yönlü girdap oluşumuna neden olur.



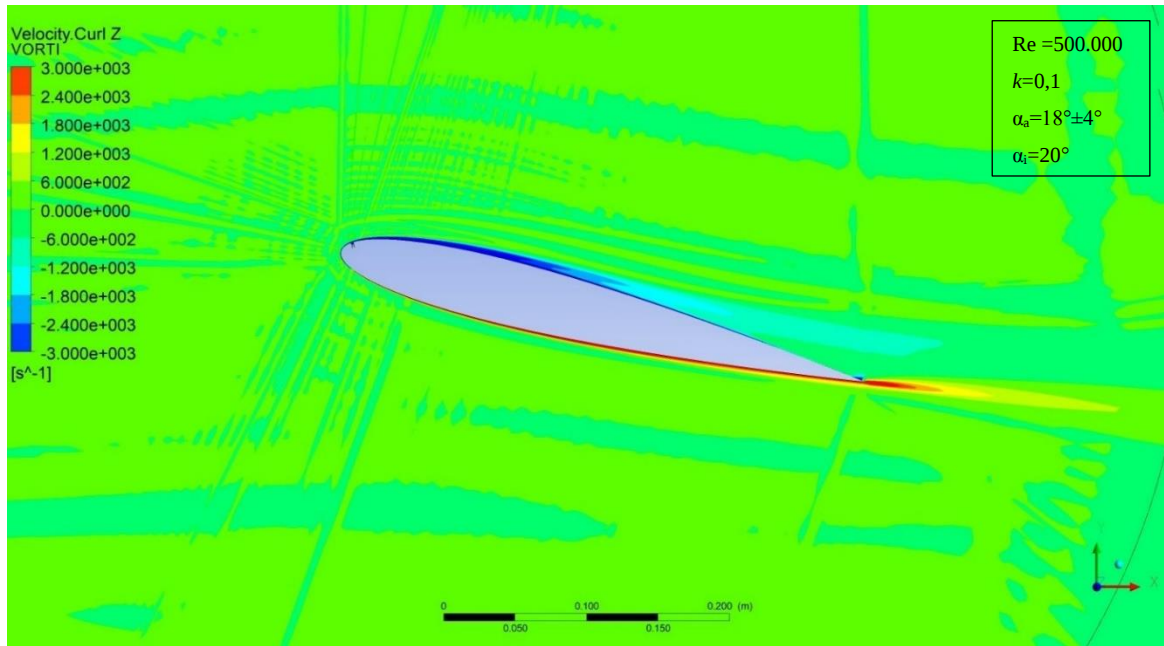
Şekil 6.71. Jetsiz durumda hücum açısı  $\alpha=14^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



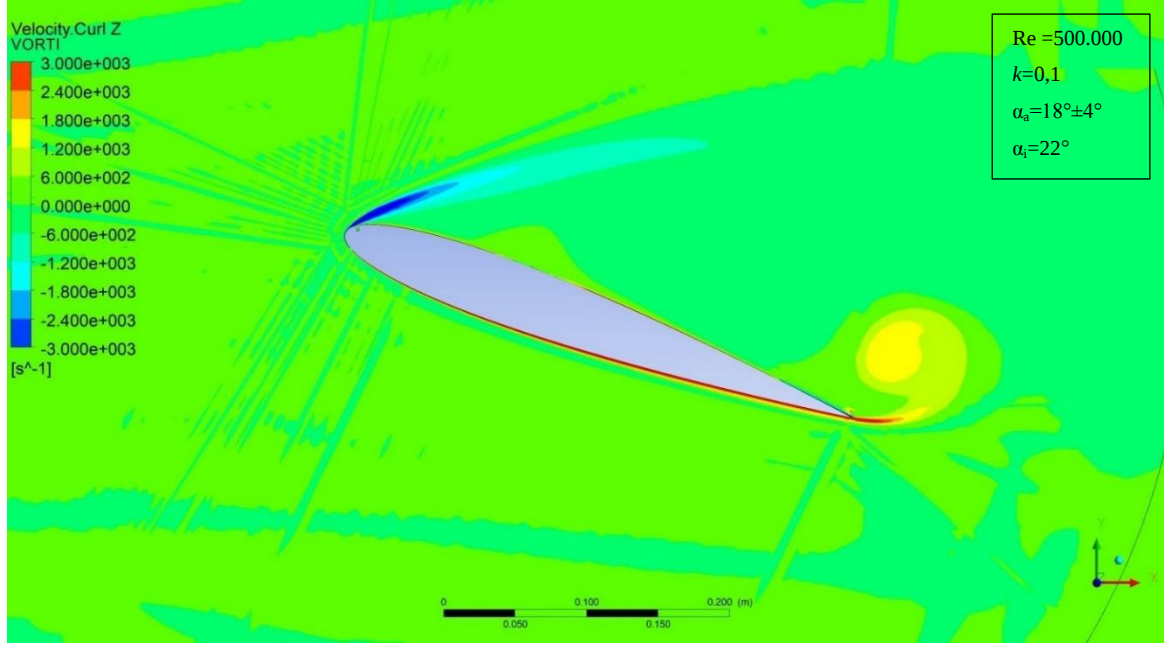
Şekil 6.72. Jetsiz durumda hücum açısı  $\alpha=16^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



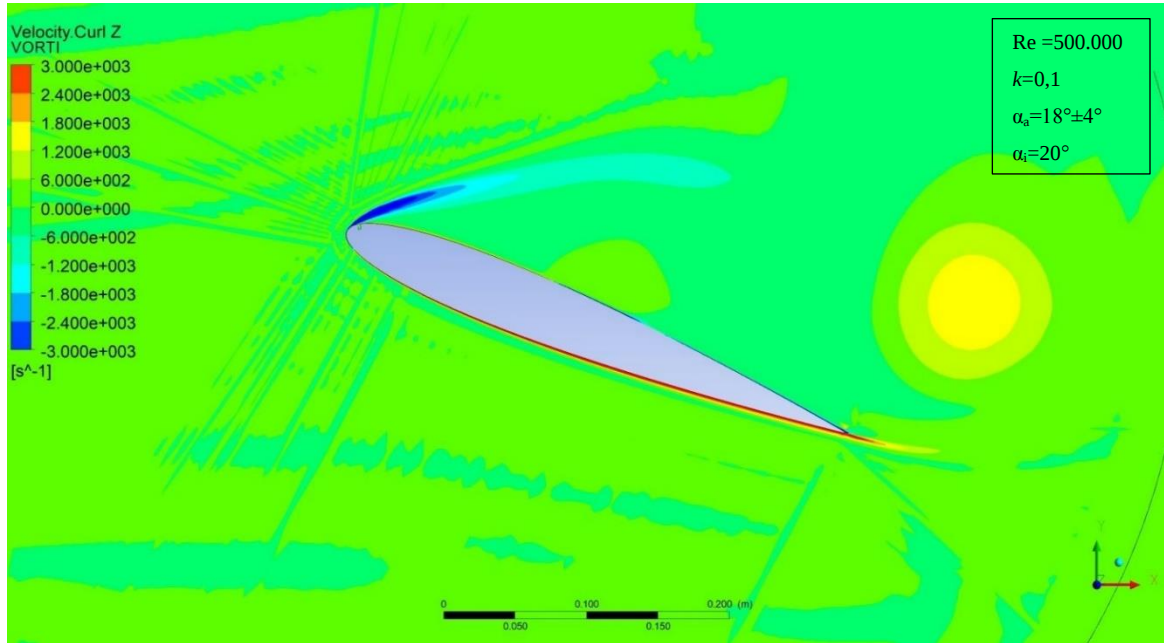
Şekil 6.73. Jetsiz durumda hücum açısı  $\alpha=18^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



Şekil 6.74. Jetsiz durumda hücum açısı  $\alpha=20^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



Şekil 6.75. Jetsiz durumda hücum açısı  $\alpha=22^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



Şekil 6.76. Jetsiz durumda hücum açısı  $\alpha=20^\circ$  için aşağı harekette girdap dağılımları

$f_e^+$  2,0 sabit değerindeki çalışmalar;

Çizelge 6.11’de 2,0 sabit boyutsuz jet frekansında  $14^\circ$ - $22^\circ$  salınım yukarı hareketinde, ( $f_e^+$ ), değişken boyutsuz jet hızına ( $U_j^+$ ) ve indirgenmiş salınım katsayısına ( $k$ ) göre, kaldırma, sürüklenme katsayıları ve kaldırma/sürüklenme oranları görülmektedir.

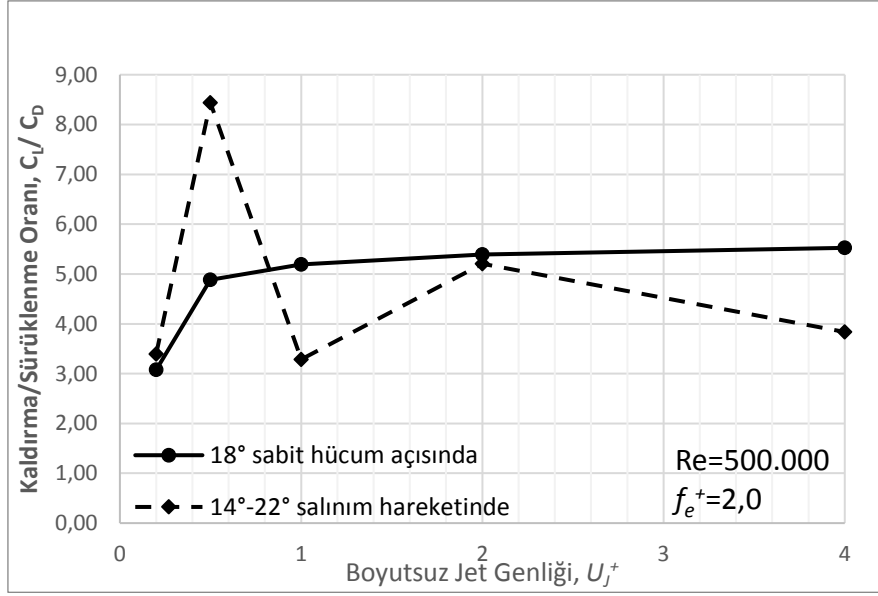
Çizelge 6.11.  $f_e^+=2,0$  için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları

| Analiz No. | Parametreler |         |      | Yukarı hareket katsayıları |       |           |
|------------|--------------|---------|------|----------------------------|-------|-----------|
|            | $f_e^+$      | $U_j^+$ | $k$  | $C_L$                      | $C_D$ | $C_L/C_D$ |
| 20         | 2,0          | 0,2     | 0,5  | 0,459                      | 1,557 | 3,393     |
| 16         | 2,0          | 0,5     | 1,0  | 0,149                      | 1,258 | 8,440     |
| 17         | 2,0          | 1,0     | 0,15 | 0,267                      | 0,876 | 3,287     |
| 18         | 2,0          | 2,0     | 0,1  | 0,201                      | 1,044 | 5,203     |
| 19         | 2,0          | 4,0     | 0,2  | 0,425                      | 1,629 | 3,836     |

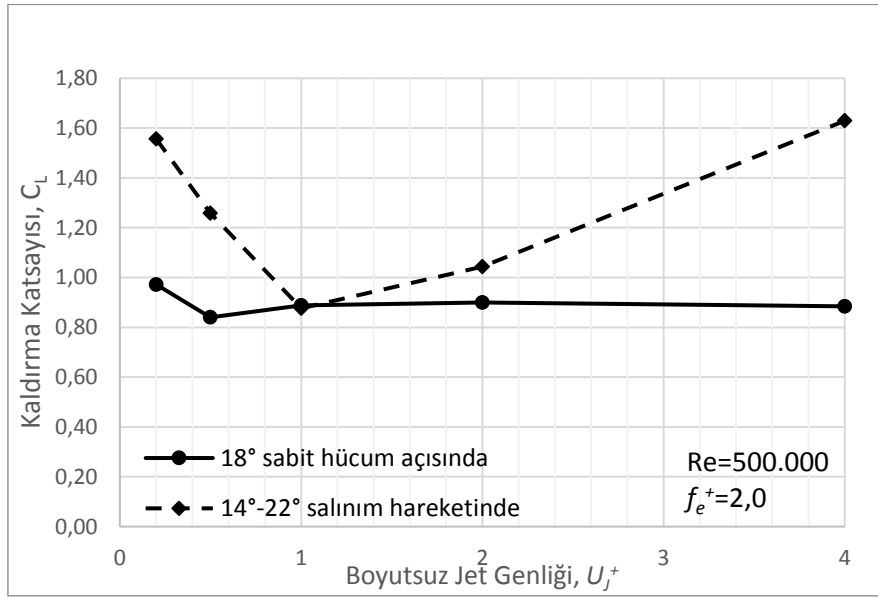
Çizelge 6.12.  $f_e^+=2,0$  için  $U_j^+$  değer aralıkları ve  $C_L$  üzerine baskın parametreler

| $U_j^+$ değer aralıkları ve baskın tepkiler |           |                        |                        |                         |
|---------------------------------------------|-----------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| $f_e^+$                                     | 0,2-0,5   | 0,5-1,0                | 1,0-2,0                | 2,0-4,0                 |
| 2                                           | $\approx$ | $k \blacktriangledown$ | $U_j^+ \blacktriangle$ | $k \blacktriangleright$ |

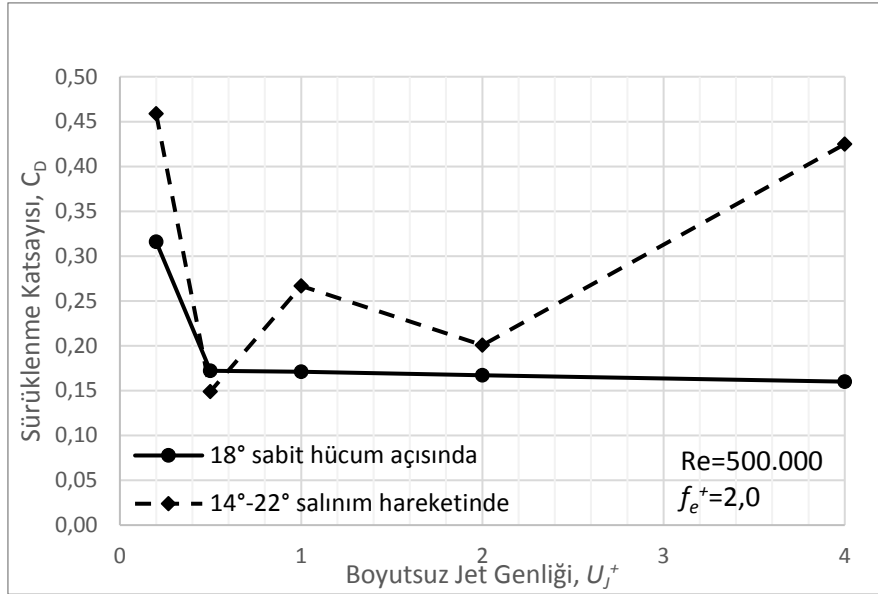
2,0 jet frekansında yapılan analizlerde, 0,2-0,5 jet hızı aralığındaki değerlerde, jet hızı ve salınım frekansı beraber etki ederek aerodinamik verimde yüksek bir artış sağlamıştır. 0,2-0,5 aralıklarında genel olarak jet hızının etkin olduğu görülmektedir. Düşük ya da yüksek derecedeki salınım frekansı azalmalarında ve 0,5 ve 3,0 jet frekanslarında, jet hızının etkisinde aerodinamik verim geliştirilebildiği görülmektedir. 0,5-1,0 jet hızı etkisindeki durumda, salınım frekansının 1,0-0,15 değerine düşmesi verimi olumsuz etkilemiştir. Kaldırma kuvveti keskin azalma gösterirken, sürüklenme kuvveti keskin artış göstermiştir. 1,0-2,0 jet hızı artışı, salınım frekansının bir miktar azalmasını da baskılayarak toplam verimde artış sağlamasında etkili olmuştur. 2,0-4,0 etkisiz jet hızı aralığında, salınım hızındaki 0,15-0,20 aralığındaki zayıf yükselişi verimde de bir gelişme sağlayarak, bu bölümde üstün bir parametre olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.77.  $f_e^+=2,0$  için yukarı yönlü harekette  $C_L/C_D$  karşılaştırmaları



Şekil 6.78.  $f_e^+=2,0$  için yukarı yönlü harekette  $C_L$  karşılaştırmaları



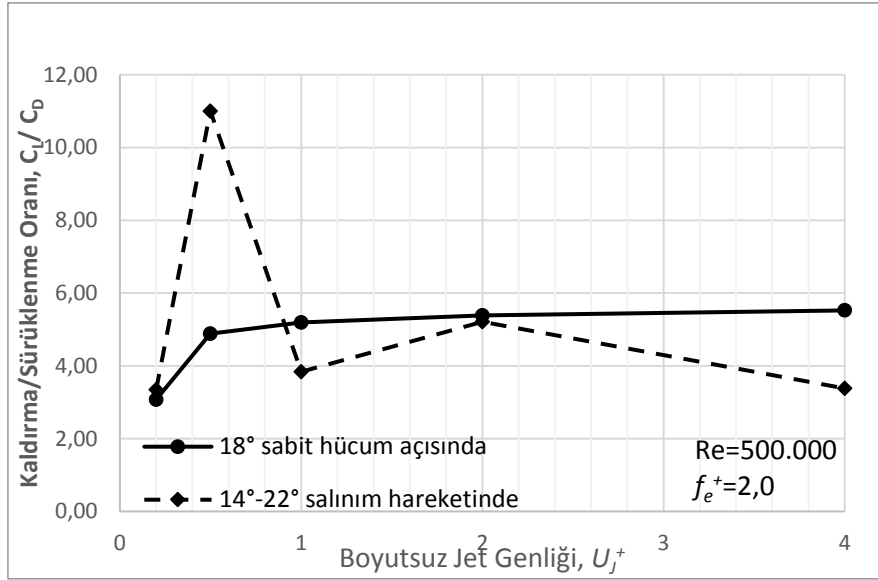
Şekil 6.79.  $f_e^+=2,0$  için yukarı yönlü harekette  $C_D$  karşılaştırmaları

Salınım hareketinde elde edilen katsayılar,  $f_e^+=2,0$

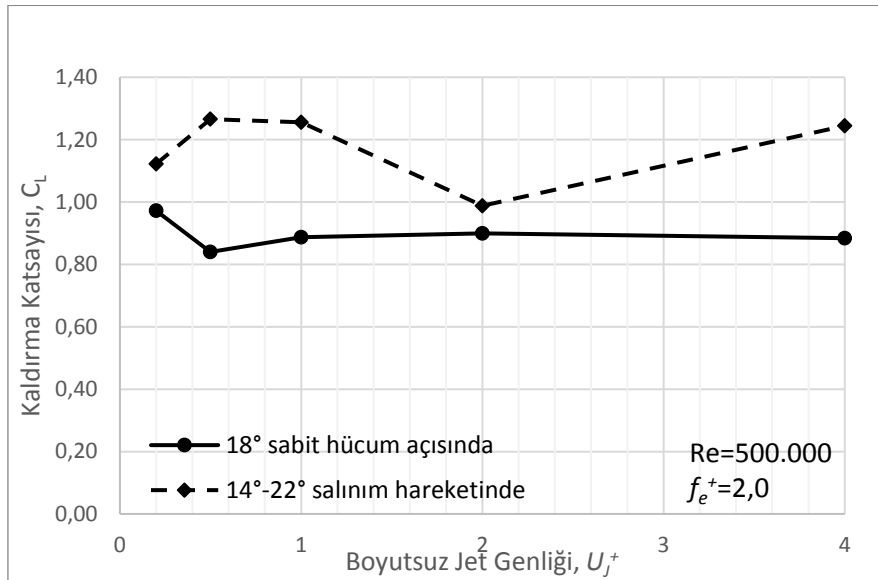
Çizelge 6.13.  $f_e^+=2,0$  için analiz parametreleri ve salınım hareketin katsayı sonuçları

| Analiz No. | Parametreler |         |      | Salınım hareketi katsayıları |       |           |       |
|------------|--------------|---------|------|------------------------------|-------|-----------|-------|
|            | $f_e^+$      | $U_j^+$ | $k$  | $C_L$                        | $C_D$ | $C_L/C_D$ | $C_M$ |
| 20         | 2            | 0,2     | 0,5  | 0,334                        | 1,123 | 3,346     | 0,059 |
| 16         | 2            | 0,5     | 1    | 0,121                        | 1,266 | 11,004    | 0,057 |
| 17         | 2            | 1       | 0,15 | 0,319                        | 1,256 | 3,842     | 0,076 |
| 18         | 2            | 2       | 0,1  | 0,19                         | 0,988 | 5,211     | 0,045 |
| 19         | 2            | 4       | 0,2  | 0,359                        | 1,245 | 3,38      | 0,076 |

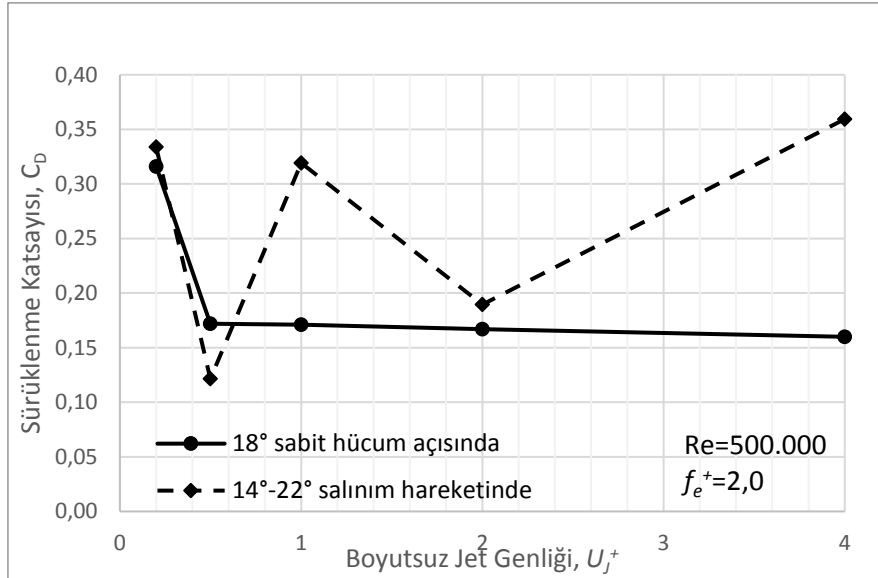
Jet frekansının sabit 2,0 değeri için yapılan salınım hareketinde, 0,2-0,5 jet genliğinde oluşan gelişme ile aerodinamik değerlerde yüksek oranda bir gelişme kaydedilmiştir. Hem salınım frekansının 0,5-1,0 aralığında artışı hem jet genliğinin verimli oranda olması bu duruma katkı sağlamıştır. Bu kısımdaki analizlerin incelenmesi faydalı olacaktır.



Şekil 6.80.  $f_e^+=2,0$  için salınım hareketinde  $C_L/C_D$  karşılaştırmaları



Şekil 6.81.  $f_e^+=2,0$  için salınım hareketinde  $C_L$  karşılaştırmaları



Şekil 6.82.  $f_e^+=2,0$  için salınım hareketinde  $C_D$  karşılaştırmaları

$f_e^+ 3,0$  sabit değerindeki çalışmalar;

Çizelge 6.14'de 3,0 sabit boyutsuz jet frekansında ( $f_e^+$ ) 14°-22° salınım yukarı hareketinde, değişken boyutsuz jet hızına ( $U_j^+$ ) ve indirgenmiş salınım katsayısına ( $k$ ) göre, kaldırma, sürüklenme katsayıları ve kaldırma/sürüklenme oranları görülmektedir.

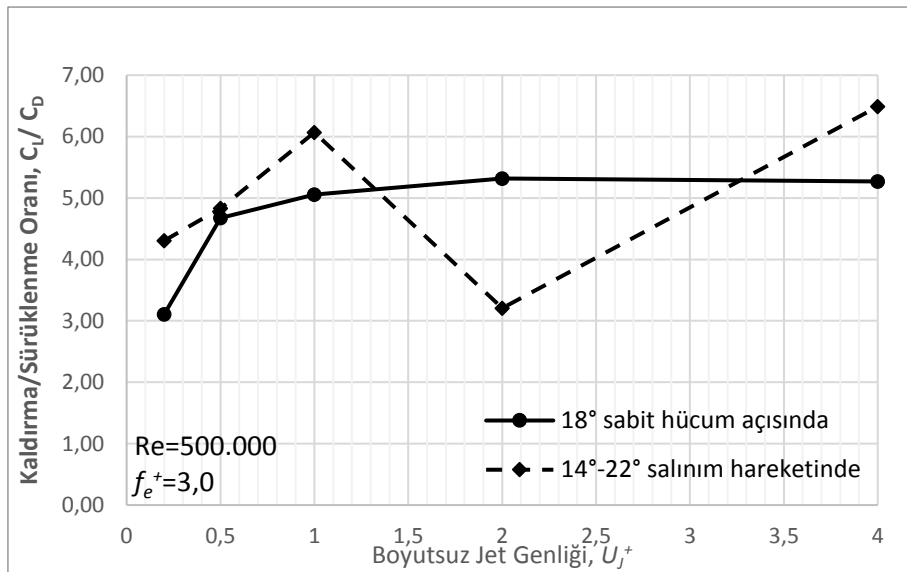
Çizelge 6.14,  $f_e^+=3,0$  için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları

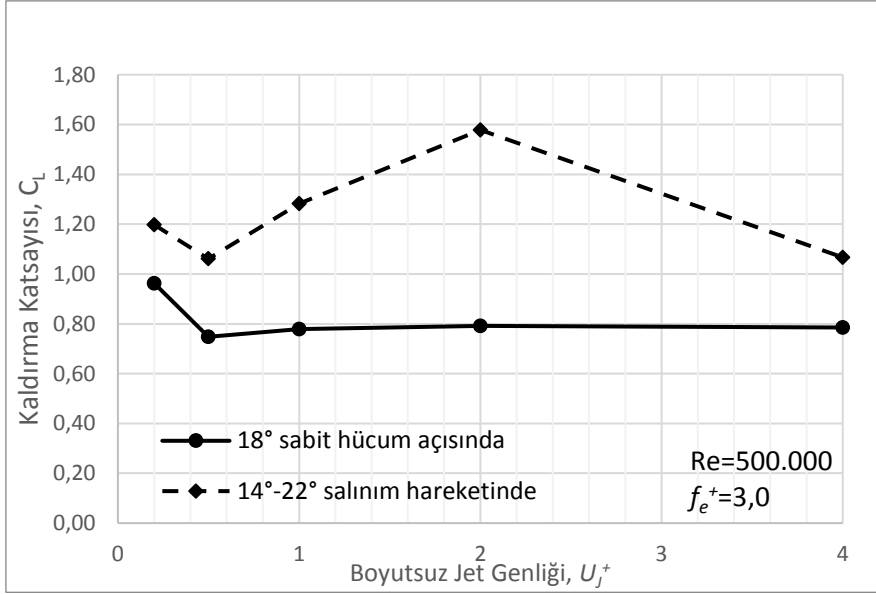
| Analiz No. | Parametreler |         |      | Yukarı hareket katsayıları |       |           |
|------------|--------------|---------|------|----------------------------|-------|-----------|
|            | $f_e^+$      | $U_j^+$ | $k$  | $C_L$                      | $C_D$ | $C_L/C_D$ |
| 25         | 3,0          | 0,2     | 1,0  | 0,278                      | 1,197 | 4,306     |
| 21         | 3,0          | 0,5     | 0,15 | 0,220                      | 1,061 | 4,832     |
| 22         | 3,0          | 1,0     | 0,1  | 0,211                      | 1,282 | 6,066     |
| 23         | 3,0          | 2,0     | 0,2  | 0,492                      | 1,578 | 3,207     |
| 24         | 3,0          | 4,0     | 0,5  | 0,164                      | 1,067 | 6,489     |

Çizelge 6.15.  $f_e^+=3,0$  için  $U_J^+$  değer aralıkları ve  $C_L$  üzerine baskın parametreler,

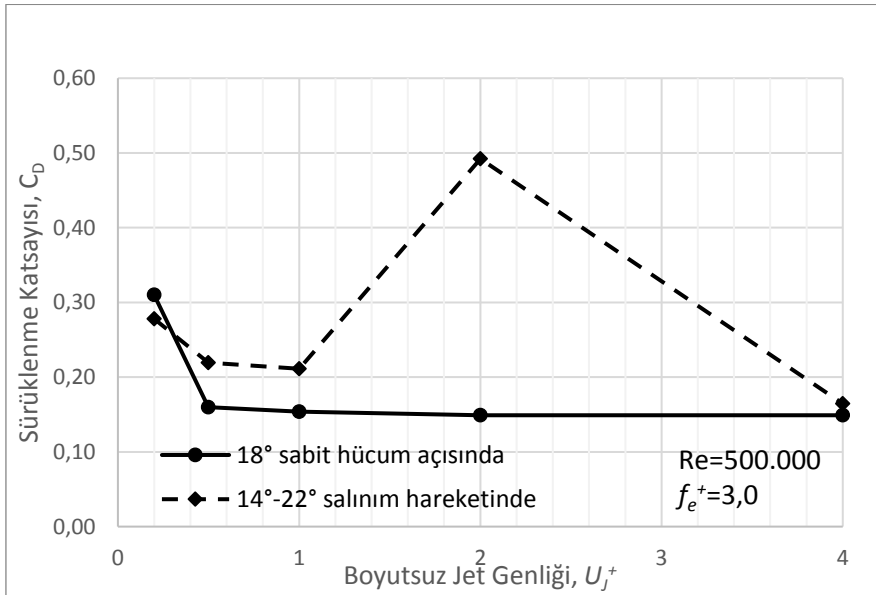
| $U_J^+$ değer aralıkları ve baskın tepkiler |                        |                        |                        |           |
|---------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------|
| $f^+$                                       | 0,2-0,5                | 0,5-1,0                | 1,0-2,0                | 2,0-4,0   |
| 3,0                                         | $U_J^+ \blacktriangle$ | $U_J^+ \blacktriangle$ | $k \blacktriangledown$ | $\approx$ |

3,0 jet frekansında gerçekleşen analiz sonuçlarına göre, 0,2-0,5 aralığındaki jet hızı değerleri, salınım frekansının ani düşmesi fark etmeksizin toplam verimde artışa yardımcı olmuştur. 0,5-1,0 jet hızı artışı bölümünde de sürüklenme azaltılması ve kaldırma katsayısı artışı toplam verimi artırmıştır. 1,0-2,0 aralığında, salınım frekansı 0,1'den 0,2 değerine çıkmıştır. Kaldırma katsayısı artarken, sürüklenme katsayısı daha yüksek oranda artış göstermiş, toplam verimde yüksek bir azalma görülmektedir. 2,0-4,0 değerlerinde frekans değerinin artışı ve 0,2'den 0,5'e ulaşan salınım frekansının artışı, kaldırma ve sürüklenme kuvvetinde düşüşe neden olmuş ancak toplam verim oranında artış sağlanmıştır.

Şekil 6.83.  $f_e^+=3,0$  için yukarı yönlü hareketinde  $C_L/C_D$  karşılaştırmaları



Şekil 6.84.  $f_e^+=3,0$  için yukarı yönlü hareketinde  $C_L$  karşılaştırmaları



Şekil 6.85.  $f_e^+=3,0$  için yukarı yönlü hareketinde  $C_D$  karşılaştırmaları

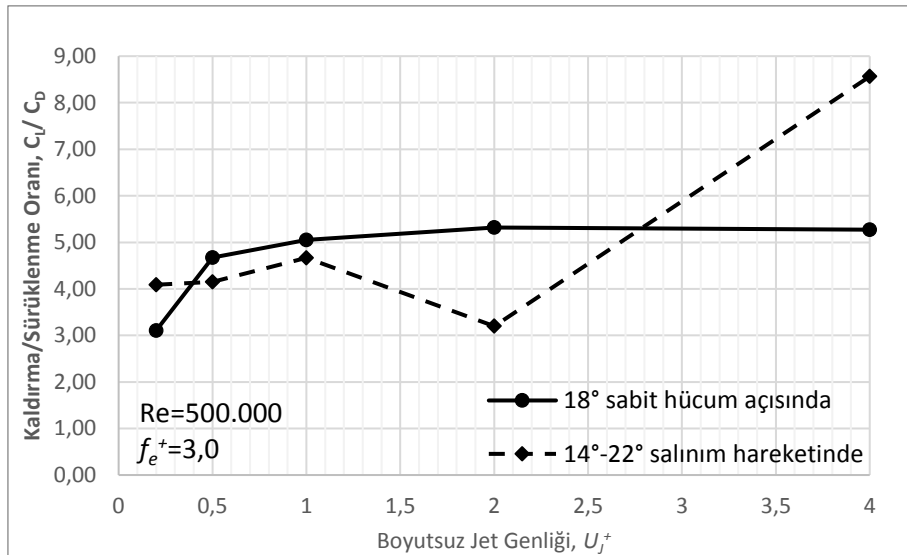
#### Salınım hareketinde elde edilen katsayılar, $f_e^+=3,0$

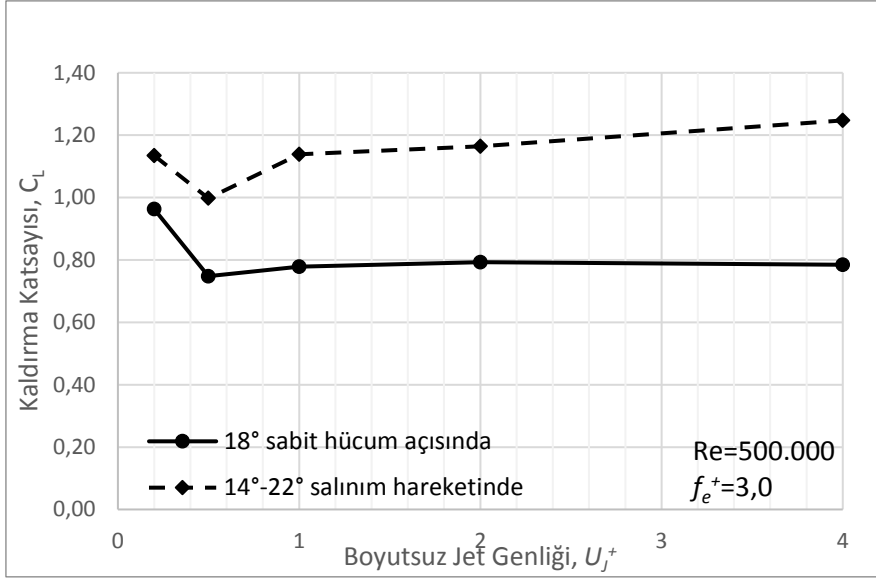
Çizelge 6.16'de 3,0 sabit boyutsuz jet frekansında ( $f_e^+$ ) 14°-22° salınım yukarı hareketinde, değişken boyutsuz jet hızına ( $U_j^+$ ) ve indirgenmiş salınım katsayısına ( $k$ ) göre, kaldırma, sürüklenme katsayıları ve kaldırma/sürüklenme oranları görülmektedir.

Çizelge 6.16.  $f_e^+=3,0$  için analiz parametreleri ve salınım hareketi katsayı sonuçları

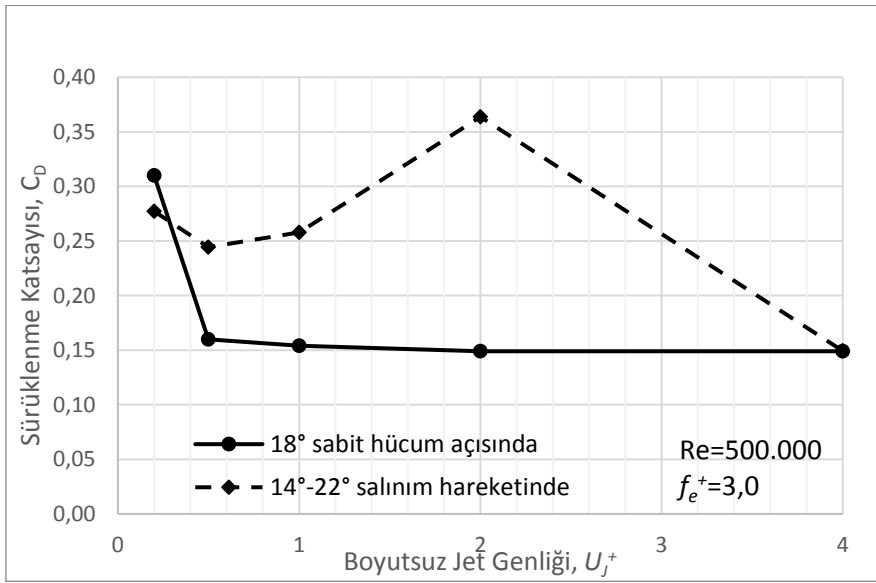
| Analiz No. | Parametreler |         |      | Salınım hareketi katsayıları |       |           |       |
|------------|--------------|---------|------|------------------------------|-------|-----------|-------|
|            | $f_e^+$      | $U_j^+$ | $k$  | $C_L$                        | $C_D$ | $C_L/C_D$ | $C_M$ |
| 25         | 3,0          | 0,2     | 1,0  | 0,277                        | 1,135 | 4,092     | 0,072 |
| 21         | 3,0          | 0,5     | 0,15 | 0,244                        | 0,998 | 4,151     | 0,055 |
| 22         | 3,0          | 1,0     | 0,1  | 0,258                        | 1,139 | 4,667     | 0,071 |
| 23         | 3,0          | 2,0     | 0,2  | 0,364                        | 1,164 | 3,199     | 0,069 |
| 24         | 3,0          | 4,0     | 0,5  | 0,149                        | 1,247 | 8,564     | 0,084 |

3,0 sabit jet frekansındaki analizler incelendiğinde, 0,2-0,5 aralığındaki jet hızının artışı salınımdaki düşüşe rağmen etkisini göstererek toplam verimi artırmada yararlı olmuştur. 0,5-1,0 aralığındaki jet hızının artışı, yine salınım düşmesine rağmen daha güçlü olarak verime katkı vermeye devam etmiştir. 1,0-2,0 aralığında artan jet hızına rağmen, sürüklenme kuvvetinde oluşan aşırı gelişme toplam verimi olumsuz etkilemiştir. Bu verimsizliğin sebebi, yüksek frekanslı jet parametresi ile salınım frekansının oluşturduğu türbülanslı bölge olarak tahmin edilebilir. Oluşan geniş girdaplar, kanat üzerine bağlanamadan kopmakta ve verim düşmektedir.

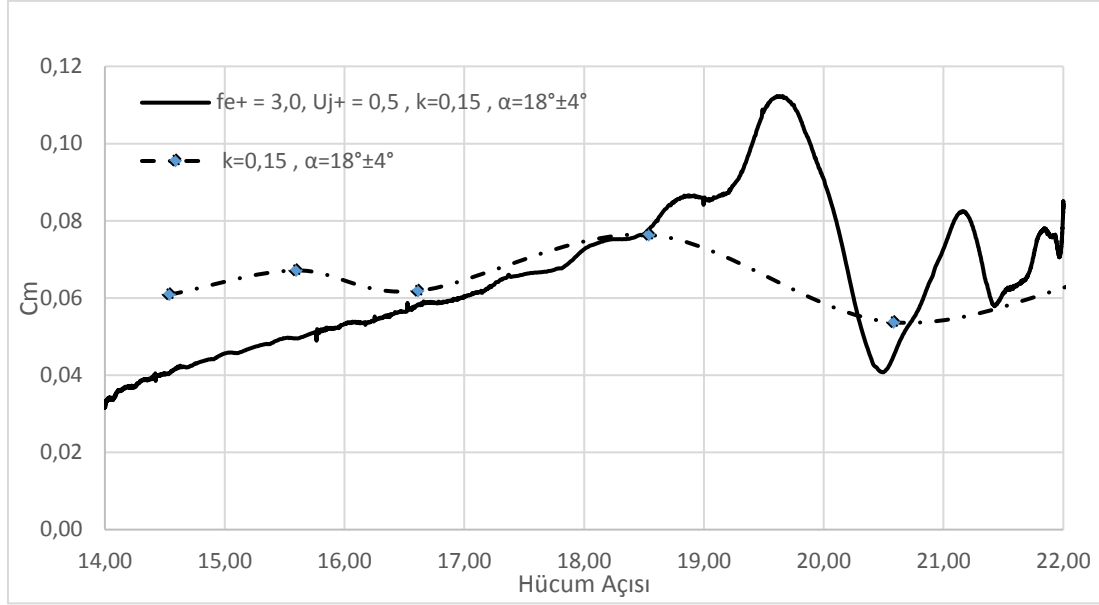
Şekil 6.86.  $f_e^+=3,0$  için salınım hareketinde  $C_L/C_D$  karşılaştırmaları



Şekil 6.87.  $f_e^+=3,0$  için salinim hareketinde  $C_L$  karşılaştırmaları



Şekil 6.88.  $f_e^+=3,0$  için salinim hareketinde  $C_D$  karşılaştırmaları



Şekil 6.89. Analiz çalışmasının ve deneyin moment katsayılarının karşılaştırılması

Şekil 6.89. da boyutsuz jet frekansının 3,0 , boyutsuz jet hızının 0,5 olduğu Analiz-21 ve [39] deneyindeki moment katsayıları gösterilmektedir. Bu grafikte, boyutsuz jet hızının düşük olmasının ve boyutsuz jet frekansının düşük olmasının etkisi dalgalı bir grafik oluşumunu engellemiştir. Yaklaşık  $18,5^\circ$  hücum açısına kadar stabiliteye olumlu katkı yapan sentetik jet bu açıdan sonra negatif etki yapmıştır. Moment katsayılarının jet parametrelerinden etkisi değerlendirildiğinde, yüksek boyutsuz hızları daha kanat profili stabilitesini daha yüksek hücum açılara genişletmektedir. Daha yüksek boyutsuz jet frekansları moment katsayısındaki dalgalanmayı engellese de hücum açısını artırmamaktadır.

### 6.3. Jet Frekansının Etkisi

Jet frekansı, birim zamanda gerçekleşen salınım miktarı olarak açıklanabilir. Analizler göstermektedir ki, jet frekansı kaldırma kuvveti kazanımında önemli bir yere sahiptir. Baskın frekansın yüksek kaldırma katsayılarına faydası olduğu görülmektedir [38].

Bu yüzden, frekansın çıkış karakteristikleri üzerindeki etkisi, göz ardı edilemez. Döngü süresinde, frekansta bir artış ile azalma oluşmaktadır. Bu nedenle, frekans artışı esas olarak aynı süre boyunca, akışı kontrol etmek için kullanılabilecek daha fazla salınım sayısı olduğu

anlamına gelir. Üfleme frekansının kaldırma katsayısı üzerindeki etkisi yine büyük ölçüde yerel genlik ve açı parametrelerine bağlıdır [38].

Jet genliğinin aksine, kontrol baskınlığı boyutsuz frekans  $f_e^+ = f_e / f_s$  ile monoton olmayan yüksek derecede bir çeşitliliğe sahiptir, burada  $f_s$ , bazal kontrolsüz akışta bazı doğal frekanstır. İlk çalışmalarda kullanılan  $f_s$ , yerine boyutsuz  $f_e^+$  kullanılmasının daha etkili bir kontrol sağladığı görülmüştür. Daha önce yapılan çalışmalarda,  $f_s$ 'nin genellikle ayırma bölgesinin zaman ölçeğiyle ilişkili olduğu varsayılmıştır [38]. Çalışmalar, etkili kontrol sağlayan geniş bir  $f^+$  değeri aralığı göstermiştir.

$F^+$  değeri Strouhal sayısına eşittir. Strouhal sayısı, akışkanlar mekaniğinde, birimsiz bir sayıdır, basitçe  $f_a/u$  olarak ifade edilir. Burada  $f$ , kanat veya yüzgecin çırpma frekansını,  $a$  kanat veya yüzgecin çırpma genliğini canlının hareket hızını temsil eder.

$$St = \frac{f_s c \sin \alpha}{U_\infty} \quad (6.3)$$

$$f_e^+ = \frac{f_e}{f_s} \quad (6.4)$$

Formüllerdeki,  $f_e^+$  bağıl zorlama frekansı,  $f_e$  sentetik jet zorlama frekansı,  $f_s$  doğal girdap dökülme frekansı,  $\alpha$  hücum açısı,  $U_\infty$  serbest alan akış hızı,  $St$  Strouhal sayısıdır.

Çizelge 2.1. de, indirgenmiş jet frekansı 0,5, 1, 1,5, 2 ve 3 karşılık gelen boyutsuz frekanslarda gerçekleştirilmiştir. En yüksek boyutsuz frekansı 3'e karşılık gelen değer jet frekansı 93,48 Hz. olarak hesaplanmıştır. En yüksek kaldırma kazanımı 2 frekansı değerinde gerçekleşmiştir. Jet genliği değeri; 0,5 kanat indirgenmiş salınım değeri 1'dir. Hem kanat yukarı hareketinde hem de iniş hareketinde  $C_L / C_D$  değeri en yüksek değerlere ulaşmıştır. Sabit durumlardan beklenenin aksine düşük frekans ve yüksek genlik oranında elde edilmesi gereken kaldırma verimi, salınım frekansının da devreye girmesi ile daha yüksek derecede kaldırma verimi elde edilmiştir [38].

Frekansın  $C_L/C_D$  değerlerindeki etkisi de görülmektedir. Elde edilen jet frekansının değişimi ile basınç dağılımının etkisi kanat üzerinde ve jet açıklığı üzerinde incelenmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen  $C_L$  ve  $C_D$  aerodinamik katsayılarının, ‘Grafiksel Gösterimi Yönetimi’nin değişkenlere analiz yöntemi uygulanmıştır. Bu bağlamda, etki eden parametreler Taguchi tablosuna yerleştirilerek, grafiksel sonuçları alınmıştır.

$14^\circ$  hücum açısından  $22^\circ$  hücum açısına yapılan salınım hareketinde değerler incelendiğinde, frekansın 0,5 değerinden 3,0 değerine olan artışı,  $C_L$  değerinde azalarak etki ettiği görülmektedir. Aşağı yönlü harekette, frekans artarken  $C_L/C_D$  oranına etkisi azalmaktadır. Ancak, yukarı yönlü harekette  $C_L/C_D$  oranına frekans artışı olumlu gelişme sağlamaktadır. Bu çalışmada, daha etkili olunan 0,5-3,0 aralığındaki frekans değerleri ile çalışılmıştır. D.H. Luo ve arkadaşlarının çalışmalarında alınan sonuçlardan farklı bir sonuç olarak, yukarı salınım hareketinde 1,5-2,0-3,0 değerlerinde, 0,5-1,0 değerlerine göre daha iyi bir frekans etkisi görülmektedir. Aşağı salınım hareketinde ise, sabit durumdaki frekans etkisine benzer tepkiler alınmıştır.

Guoqing, Z. Ve arkadaşının yaptığı çalışmada,  $20^\circ$  sabit hücum açısında sentetik jet parametrelerin kaldırma katsayısına olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, jet zorlama frekansı, jet konumu ve momentum katsayısı, jet yönü ve jet dağılımını parametrelerini incelemişlerdir. Jet frekansının değişiminin kaldırma katsayı üzerindeki etkisini aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Düşük jet frekans değerlerinin, maksimum kaldırma katsayısını artırdığı görülmektedir [11].

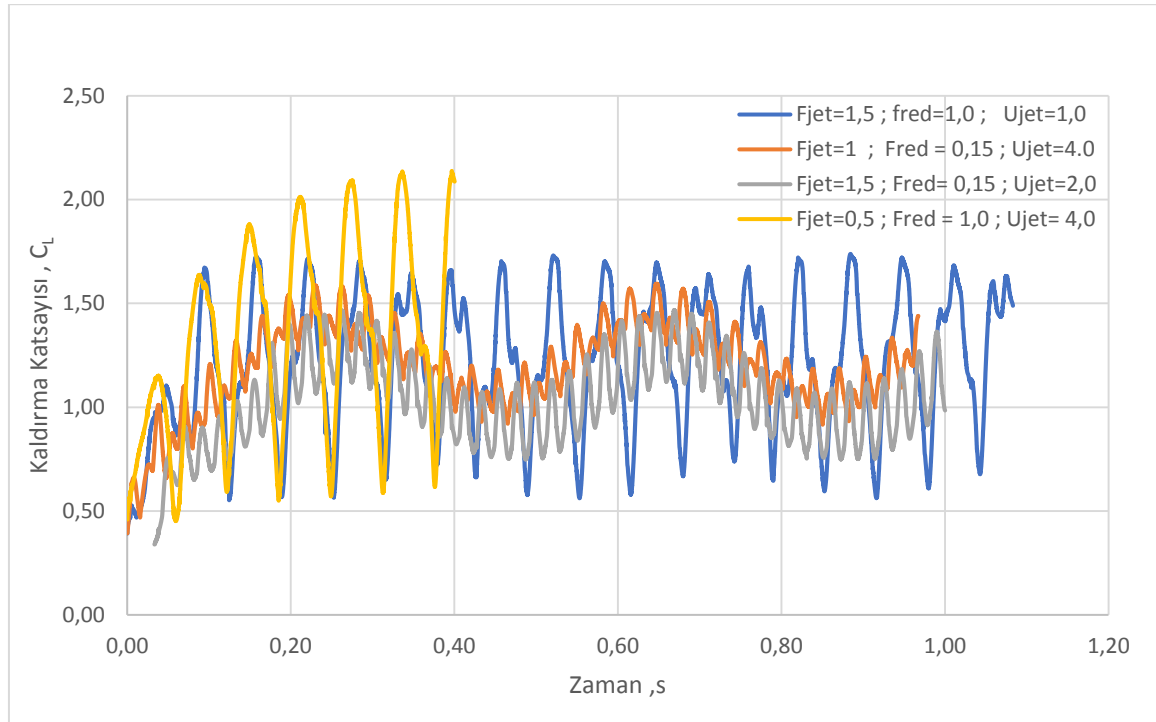
Bu çalışmadan alınan sonuçlardan bazıları aşağıdaki grafikte gösterilmektedir. Farklı jet frekansı, jet genlikleri ve farklı kanat salınımlarının kaldırma katsayısına olan etkileri açıkça görülmektedir.

Öncelikle ilk özellik olarak, kanat salınıminin  $C_L$  değişimi üzerindeki etkisi, çözüm zamanı boyunca turuncu ve gri çizgilerin aynı sinüzoidal eksenini takip ettiği görülmektedir. Mavi çizginin daha düşük salınım frekansında olmasında dolayı salınım yapılan süre uzamış görülmektedir. Böylece, kanat salınıminin  $C_L$  ortalama değerlerine olan etkisi geniş zamana yayılarak azalmış olur.

İkinci olarak incelenecek jet genliğinin azaldıkça, maksimum ve minimum  $C_L$  değerlerindeki mesafenin de arttığı görülmektedir. Aynı kanat salınımini yapan gri ve

turuncu değerlerin, jet genliğinin yüksek olduğu turuncu değerlerde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu da jet genliğinin  $C_L$  üzerindeki etkisini göstermektedir.

Son olarak jet frekansının değerlerini inceleyecek olursak,  $C_L$  genliğinin yakın değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.90.  $C_L$  ve boyutsuz zaman grafiği

Şekil 6.90. da kaldırma katsayılarına ait analizler; mavi çizgiler Analiz-12, turuncu çizgiler Analiz-9, Gri çizgiler Analiz-13, sarı çizgiler Analiz-4'e aittir.

Son olarak jet frekansını incelediğimizde, daha önce elde ettiğimiz verileri doğrulayacak şekilde, en etkisiz frekansın 1,5 olduğu görülmektedir. Gri ve mavi verilerin 1,5 frekansında olmasına rağmen farklı eğilimler takip ettiği görülmektedir. Maksimum ve minimum değerlerin en geniş olduğu mavi ve sarı verilerin, frekans etkisinden ziyade, aynı kanat salınımlarında olduğunu göz önüne alırsak, sarı hatlardaki verilerin jet genlik değerlerinin, 1,0 ve 4,0 gibi çok farklı olmasının etkili olduğu görülmektedir.

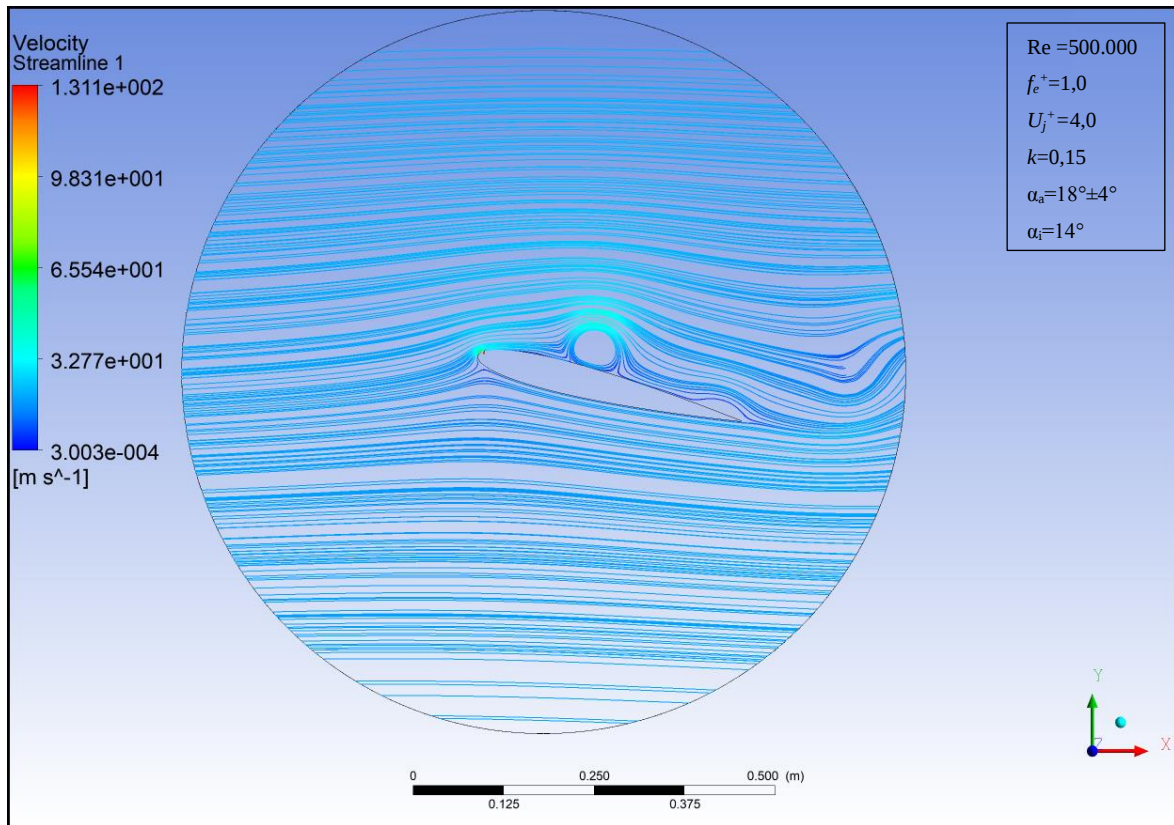
Çizelge 6.17. Farklı kanat salınımlarında kaldırma katsayıları

| Salınım Frekansı | Analiz-1                 | Analiz-11                | Analiz-21                  | $C_L$    |
|------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------|
| Hücum açısı (°)  | $C_L (F_j^+=0,5; k=0,1)$ | $C_L (F_j^+=1,5, k=0,5)$ | $C_L (F_j^+=3,0 ; k=0,15)$ | Ortalama |
| 14               | 0,646                    | 0,997                    | 0,771                      | 0,805    |
| 16               | 0,886                    | 1,232                    | 0,991                      | 1,036    |
| 18               | 1,124                    | 1,504                    | 1,154                      | 1,261    |
| 20               | 1,279                    | 1,571                    | 0,947                      | 1,266    |
| 22               | 1,381                    | 1,150                    | 1,478                      | 1,336    |
| 20               | 1,290                    | 0,928                    | 0,744                      | 0,987    |
| 18               | 1,362                    | 1,296                    | 1,257                      | 1,305    |
| 16               | 1,282                    | 1,233                    | 0,714                      | 1,077    |
| 14               | 1,360                    | 1,176                    | 0,699                      | 1,078    |

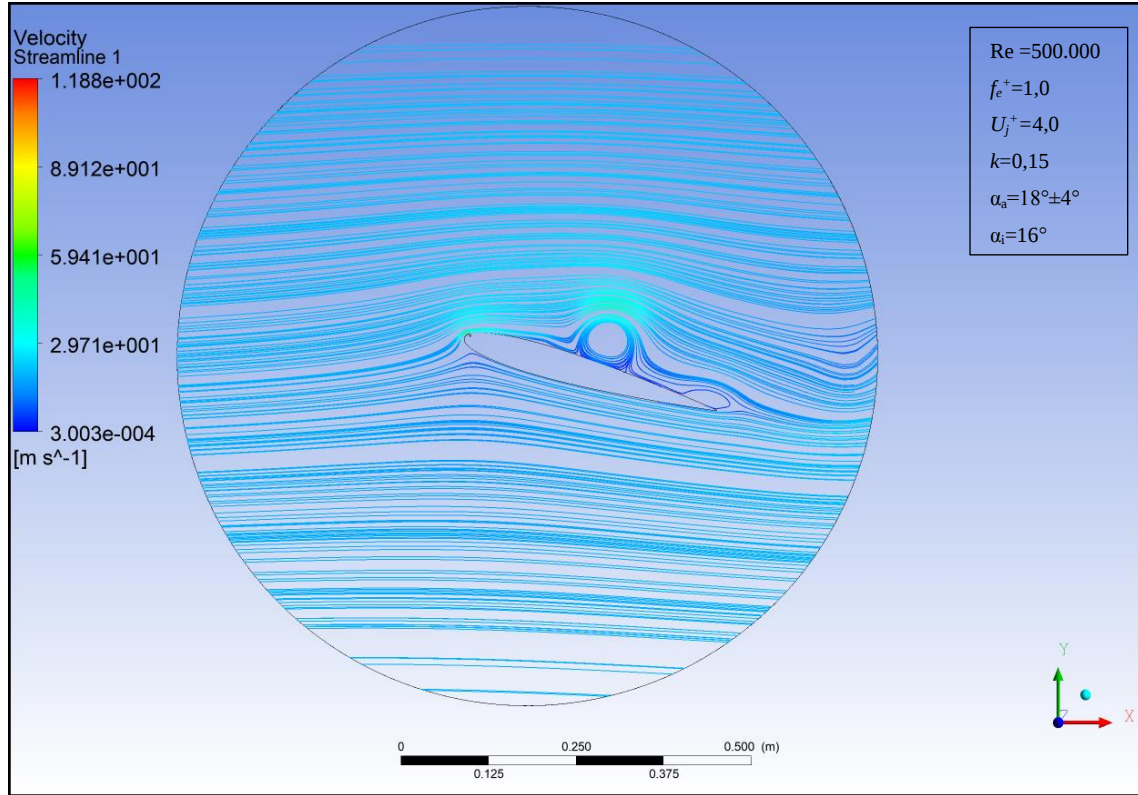
Çizelge 6.17. de kaldırma katsayıları belirtilen analizler 0,5 boyutsuz jet genliğinde ve yakın salınım genliklerinde gerçekleştirilmiştir. Buna göre Analiz-1 ve Analiz-21 in aynı hücum açılarındaki değerleri incelenirse, 0,5 etkisiz bir jet frekansından sonra 3,0 olarak uygulanan jet frekansının artan salınım katsayısı ile beraber hareket ederek kaldırma katsayısına katkı sağladığı görülmektedir. Bu kazanım, salınım hareketinde yukarı doğru bölümünde gerçekleşmiştir. Salının aşağı doğru hareketindeki kısmında kaldırma katsayısına olumsuz bir etki yapmaktadır.

Çizelge 6.17. de 0,5 jet frekansı yapılan salınının 18°-22° arasındaki anlık hız dağılımları gösterilmiştir. Salınım frekansının ve jet genliğinin düşük olduğu durumda etkisiz kalan jet frekansı, jet genliği ile beraber akışa etki ederek, 22° hücum açılarında da akışın bağlanmasına yardımcı olmaktadır. Düşük açılarda jet mekanizmasının düşük etkili halinde bile kopan akış kısa sürede kanat üzerine tekrar bağlanabilmekte, ancak daha yüksek açılarda kopmalar oluşmaktadır. Salınının aşağı dönüş hareketinde, akışın ağlanması kolaylaşmaktadır. Girdaplar oluştuğunda da kısa bir döngü ile kanat üzerine tekrar bağlanmaktadır.

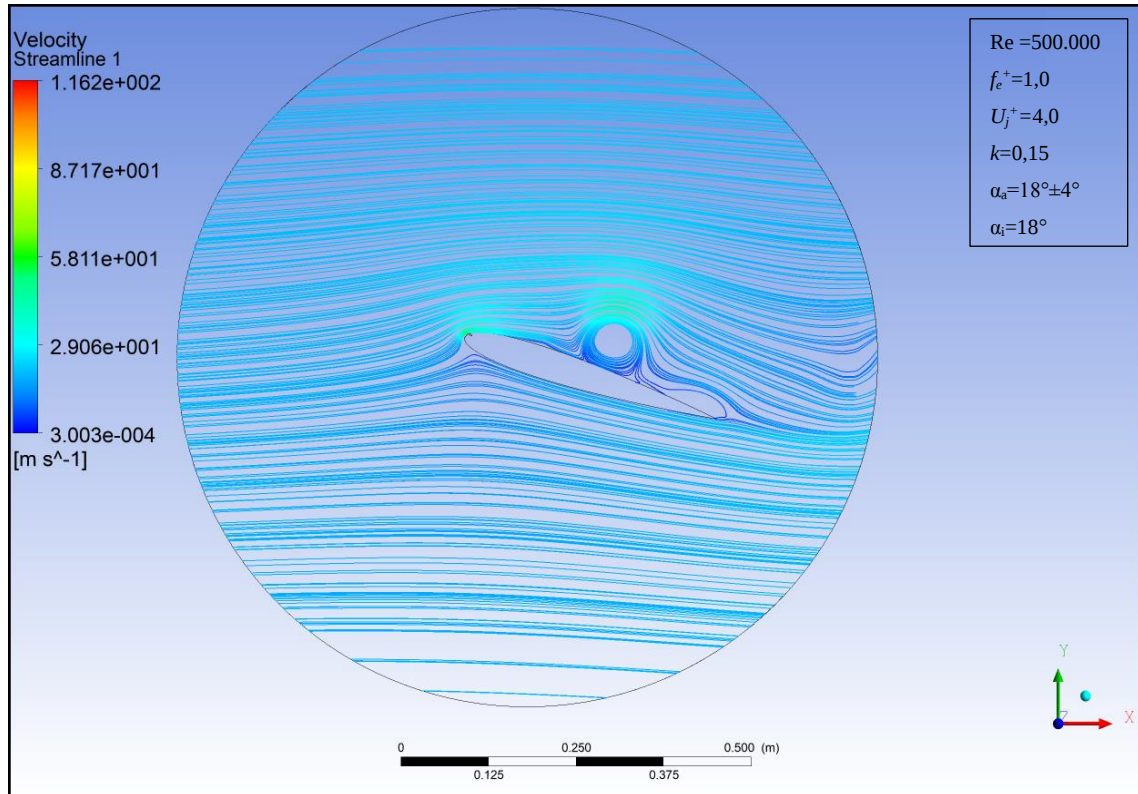
Şekil 6.91. de 9 numaralı analiz kanat çevresi serbest akış çizgileri gösterilmiştir. Bu analiz, 1,0 jet frekansı, 4,0 jet hızı ve 0,15 kanat salınım frekansı parametre değerlerinde yapılmıştır. Analiz-1 ile karşılaştırıldığında, daha sık jet frekansının etkisi akış genel olarak kanat üzerinde devam etmesini sağlamış, ancak devam etmeyip sınır tabakasından ayrılan akışın geri bağlanmamasının nedeni 4,0 gibi yüksek orandaki jet genişliğinden kaynaklanmaktadır. Görülmektedir ki, jet genişliğinin artan oranına yardımcı olan jet frekansı aerodinamik verimde de Analiz-1'e göre 3,87 den 4,74 oranına artış sağlanmasında etkili olmuştur. Daha yüksek hücum açılarında da sınır tabakasından kopmalar aynı şekilde devam ettiği görülmektedir. Ayrılma noktası hücum kenarına doğru ilerlemiştir. Salınımın  $22^\circ$  den geri dönüşünde akış kanat yüzeyine tutunma oranını artırmış ve türbülanslı bölge kuyruk bölümüne doğru kaymıştır. Burada jet genişliğinin yüksek olması birinci etken olarak görülebilir ve gelişen jet frekansı aerodinamik verimde yardımcı olarak görev almıştır.



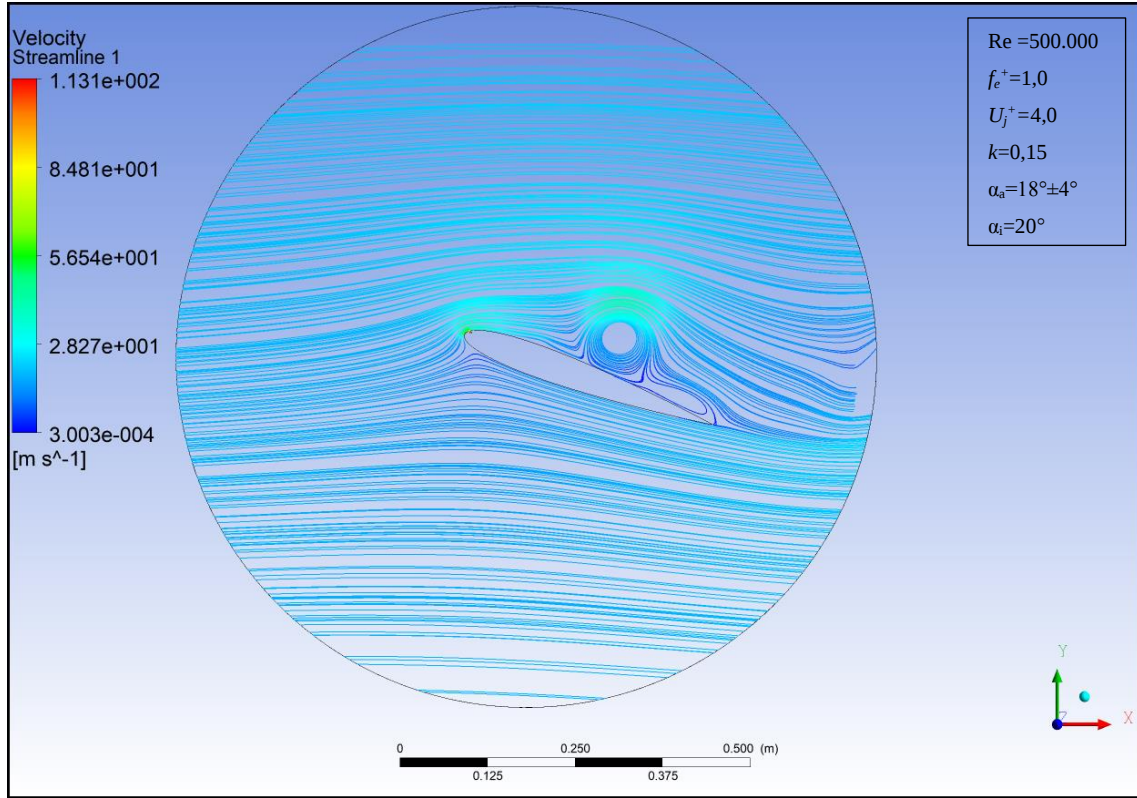
Şekil 6.91. Hücum açısı  $\alpha=14^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



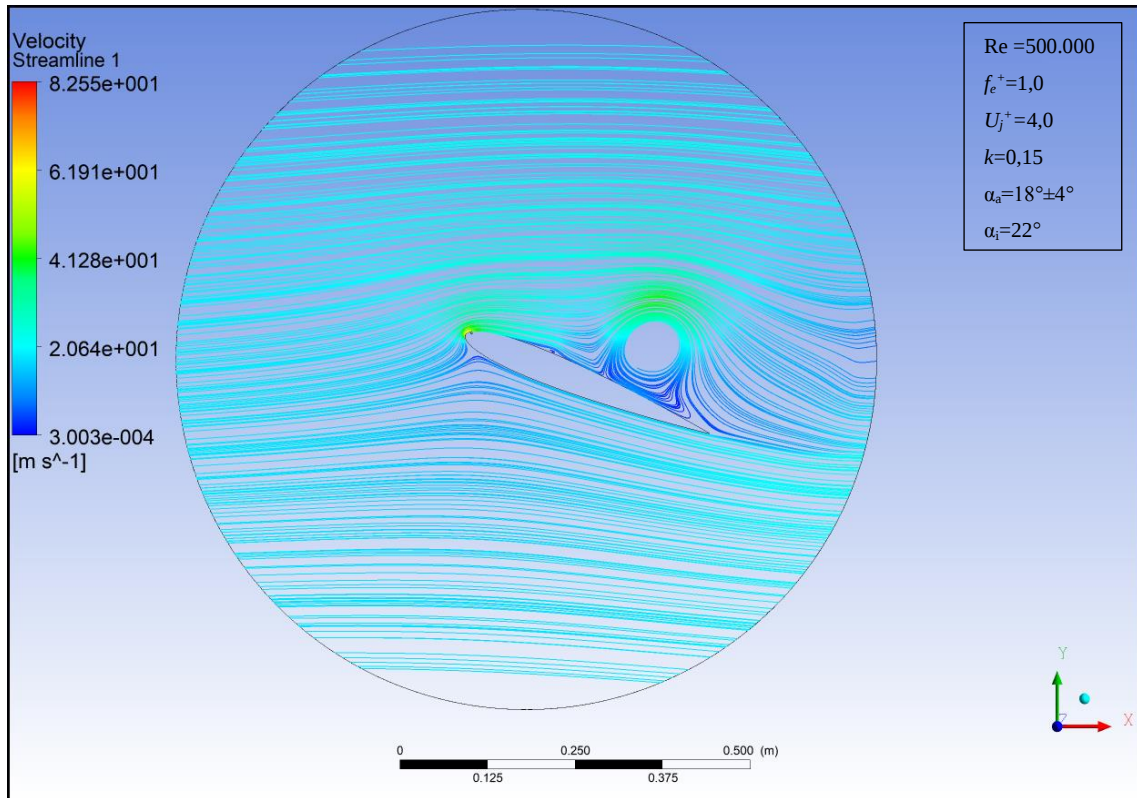
Şekil 6.92. Hücum açısı  $\alpha = 16^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



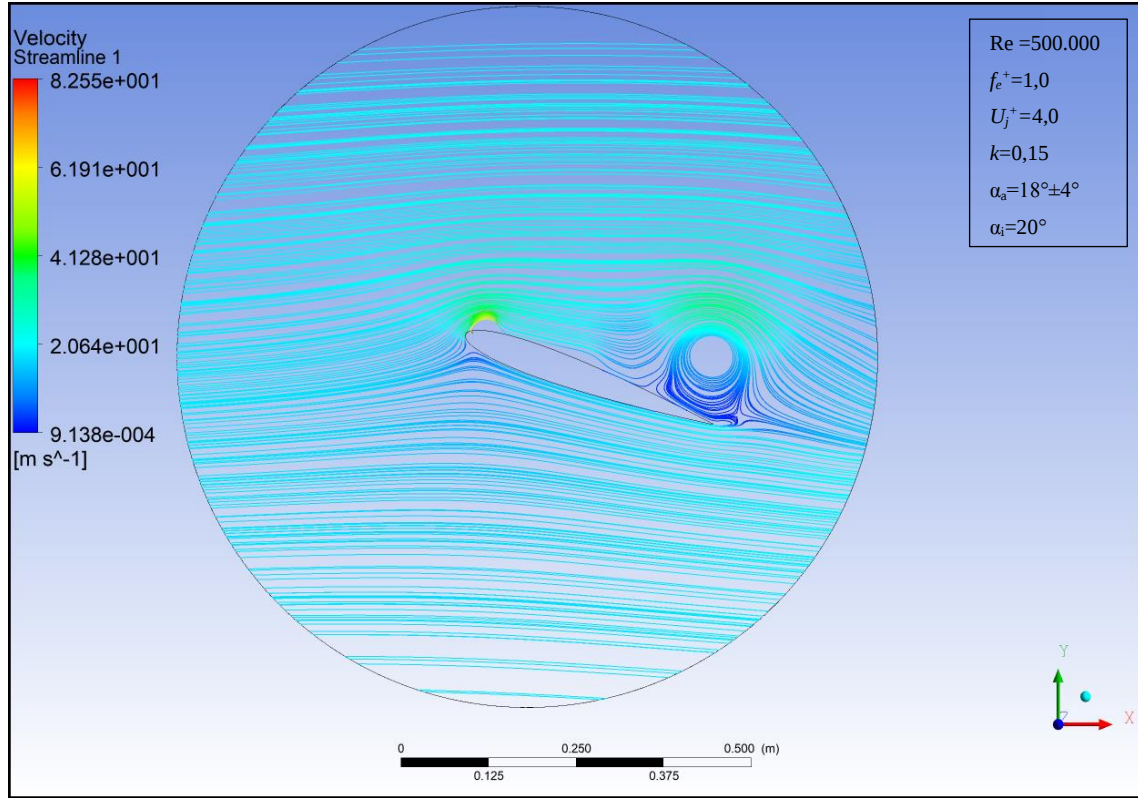
Şekil 6.93. Hücum açısı  $\alpha = 18^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



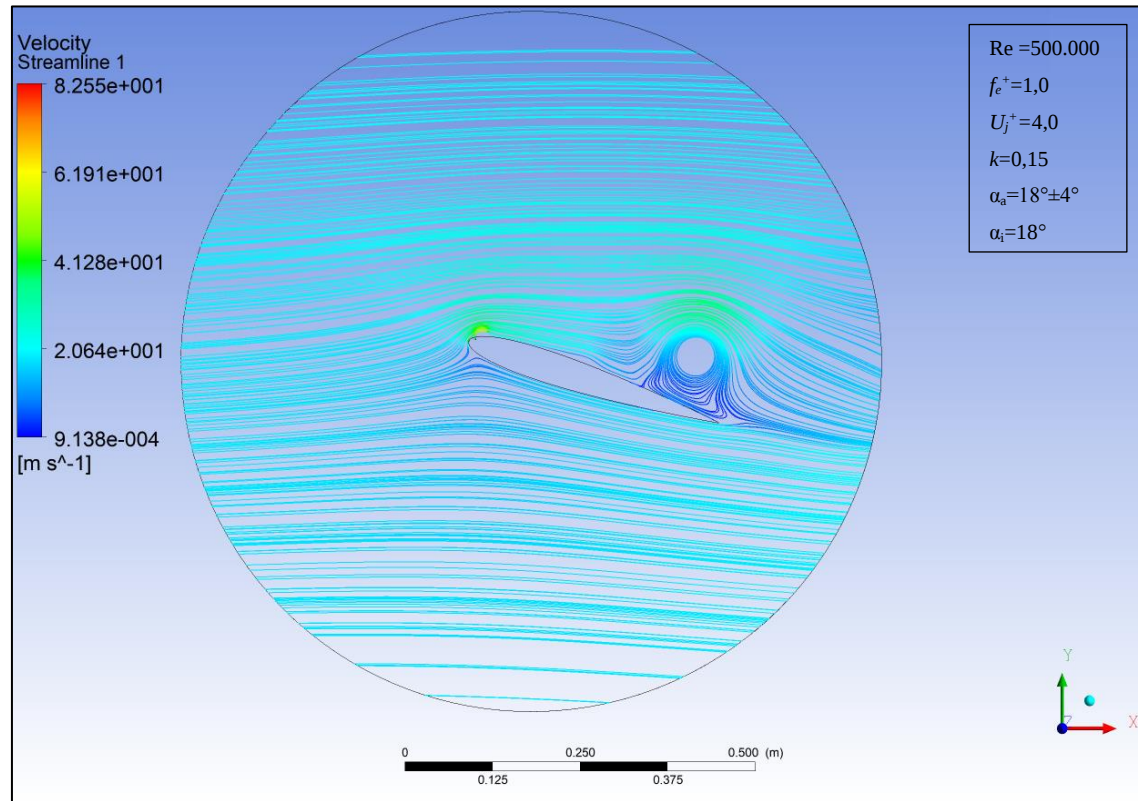
Şekil 6.94. Hücüm açısı  $\alpha = 20^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



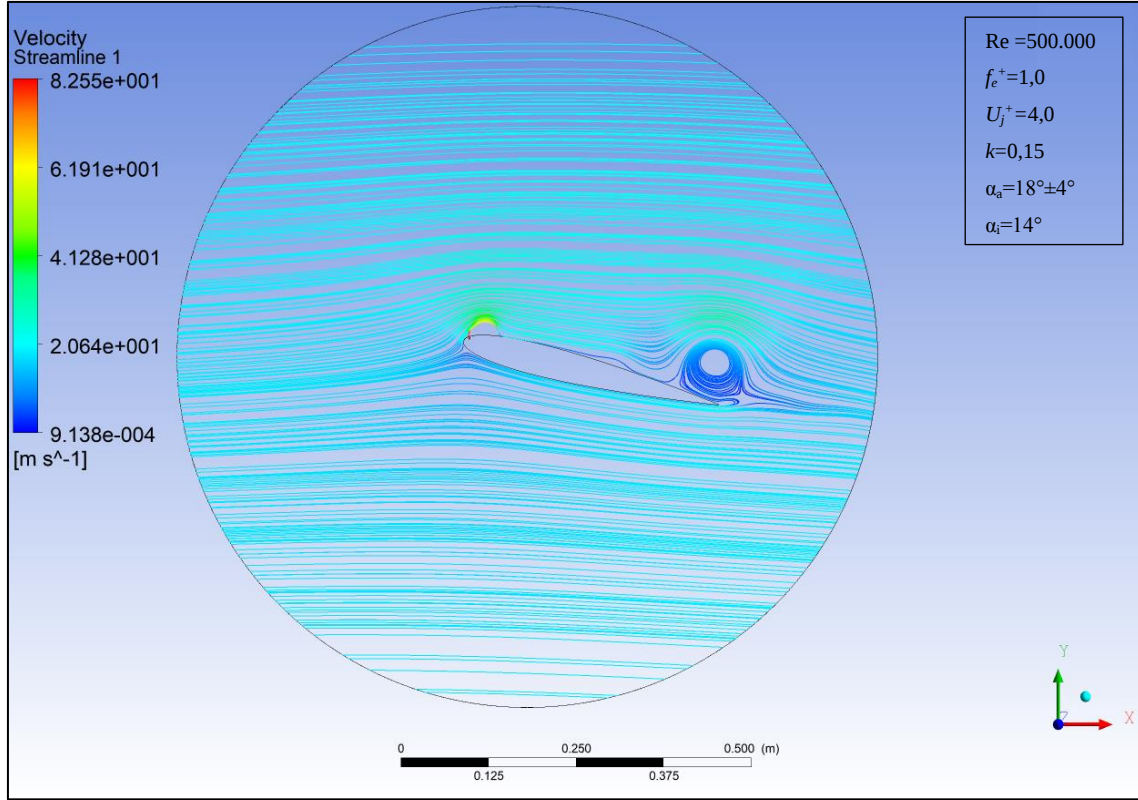
Şekil 6.95. Salınım hareketi anlık serbest akış çizgileri, Analiz-9,  $22^\circ$  yukarı



Şekil 6.96. Hücüm açısı  $\alpha = 20^\circ$  için aşağı harekette serbest akış çizgileri



Şekil 6.97. Hücüm açısı  $\alpha = 18^\circ$  için aşağı harekette serbest akış çizgileri



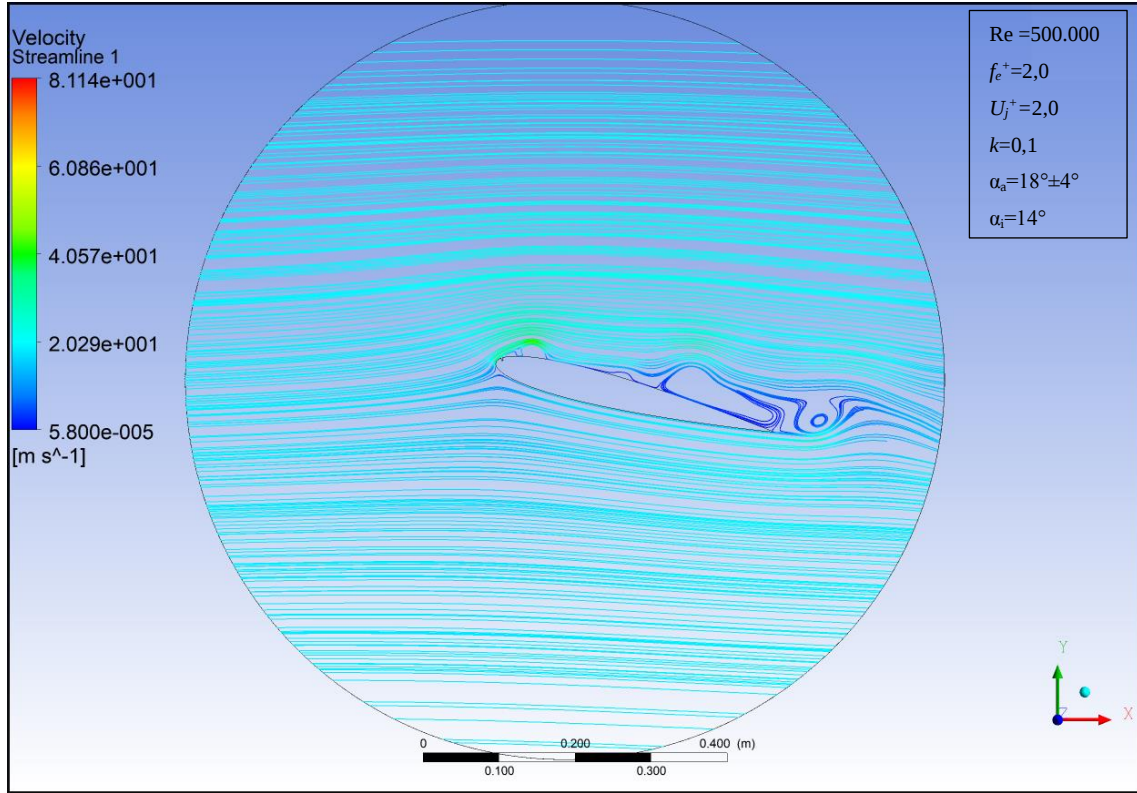
Şekil 6.98. Hücum açısı  $\alpha=14^\circ$  için aşağı harekette serbest akış çizgileri

Şekil 6.59.-6.70. arasında Analiz-14 için sonuçlar verilmektedir.  $f_e^+$  değerinin 1,5, Analiz-9'daki gibi jet genliğinin 4,0 olduğu durum için serbest akış çizgileri gösterilmektedir. Salınım değerleri çok yakın olan bu analizler için, farklı serbest akış çizgileri oluştuğu görülmektedir. Burada 1,0 değerinden 1,5 jet frekansına yükselen parametrenin önemi mevcuttur.  $16^\circ$  de oluşan girdabın hücum kenarına daha yakın olduğu görülmektedir. Artan hücum açısı ile birlikte, girdabın tüm üst yüzeyde oluştuğu görülmektedir. Daha geniş türbülans alanının oluştuğu görülmektedir. Bu olumsuz durumda,  $C_L/C_D$  oranının 4,74 değerinden 4,55 değerine düştüğü görülmektedir. Bu düşüşün yavaşlamasında 0,1 değerinden 0,15 değerine yükselen salınım frekansının da etkili olduğu düşünülebilir. Salınımın geri dönüş hızının artması ile geri dönüşlerdeki akış bağlanmaları hızlanarak aerodinamik verime katkıda yüksek oranda katkıda bulunmuştur. Eğer Çizelge 6.8. ile 6.17 deki  $C_L/C_D$  değerlerini incelersek yukarı harekette 3,50 olan oran, aşağı harekette 5,60 civarındadır.

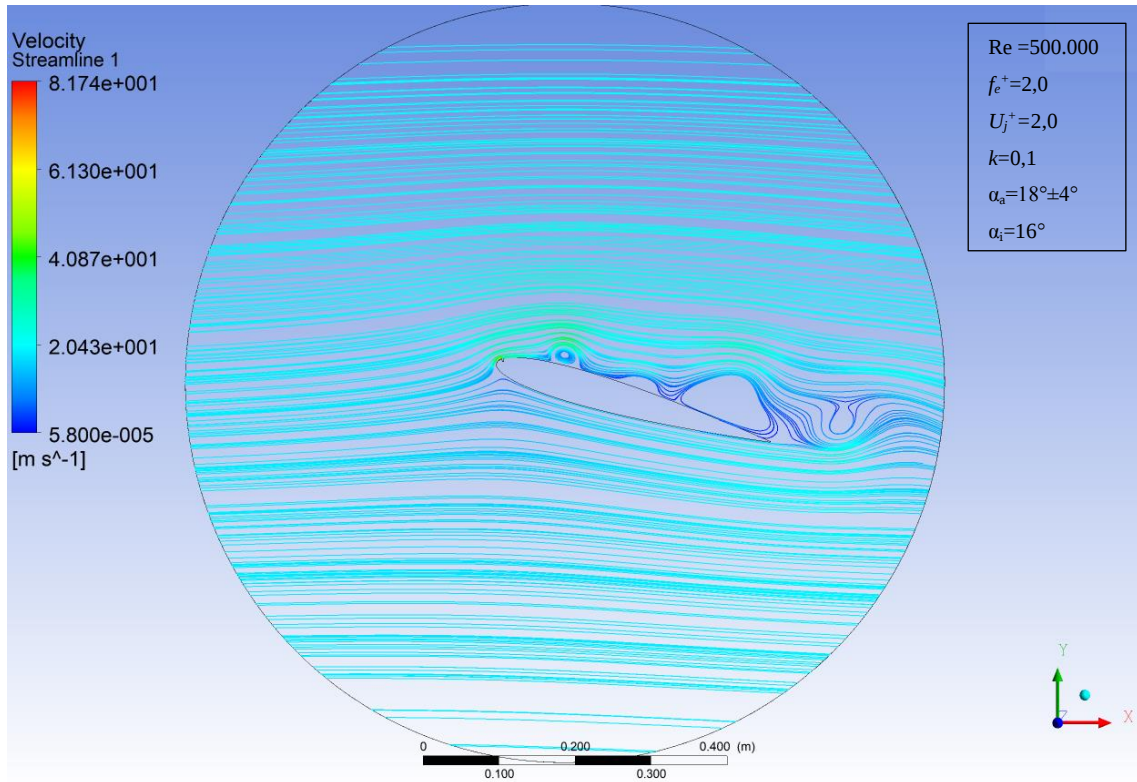
Çizelge 6.18.  $f_e^+=1,5$  için analiz parametreleri ve yukarı hareketin katsayı sonuçları

| Analiz No. | Parametreler |         |      | Aşağı hareket katsayıları |       |           |
|------------|--------------|---------|------|---------------------------|-------|-----------|
|            | $f_e^+$      | $U_j^+$ | $k$  | $C_L$                     | $C_D$ | $C_L/C_D$ |
| 15         | 1,5          | 0,2     | 0,2  | 0,305                     | 0,853 | 2,802     |
| 11         | 1,5          | 0,5     | 0,5  | 0,275                     | 1,317 | 4,798     |
| 12         | 1,5          | 1       | 1    | 0,170                     | 0,962 | 5,650     |
| 13         | 1,5          | 2       | 0,15 | 0,188                     | 1,007 | 5,357     |
| 14         | 1,5          | 4       | 0,1  | 0,236                     | 1,319 | 5,601     |

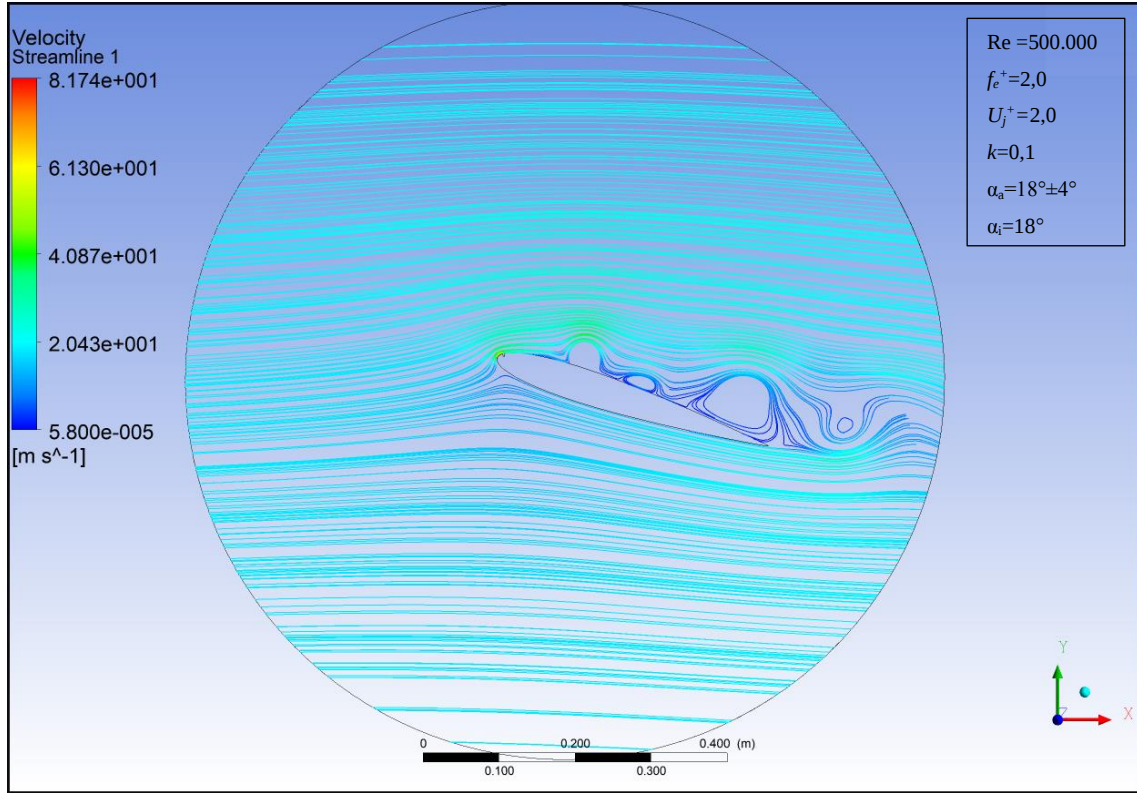
Şekil 6.99-6.107. arasında Analiz-18 parametrelerinde yapılan çalışmanın serbest akış çizgilerini göstermektedir. Bu analizde, jet frekansı 2,0'a yükselirken kanat üzerindeki akışı sık müdahaleler ile bozulmamasına neden olmaktadır. Üst kanat profilin yüzeyinde de akışın kısa kopmalar olduğu ve girdapların Analiz-14'e göre daha dar alanda oluşturduğu görülmektedir. Jet mekanizması  $14^\circ$  hücum açılarından itibaren etkisini göstermekte ve  $22^\circ$  ye kadar kanat üst yüzeyinde aynı karakterdeki türbülanslı bölge artıp, dönüşte azalmaktadır. Yüksek frekans ve 2,0 gibi verimli oranlardaki jet hızı ile birlikte kanat üzerinde küçük girdaplar oluşsa da kısa sürede akışın geri bağlandığı görülmektedir. Salınım frekansının düşük olması ile de geri dönüşte de nerdeyse aynı aerodinamik verim yakalanmıştır. Böylece, salınım hareketinin hem yukarı hem aşağı hareketinde benzer serbest akış çizgilerinin olduğu görülmektedir.



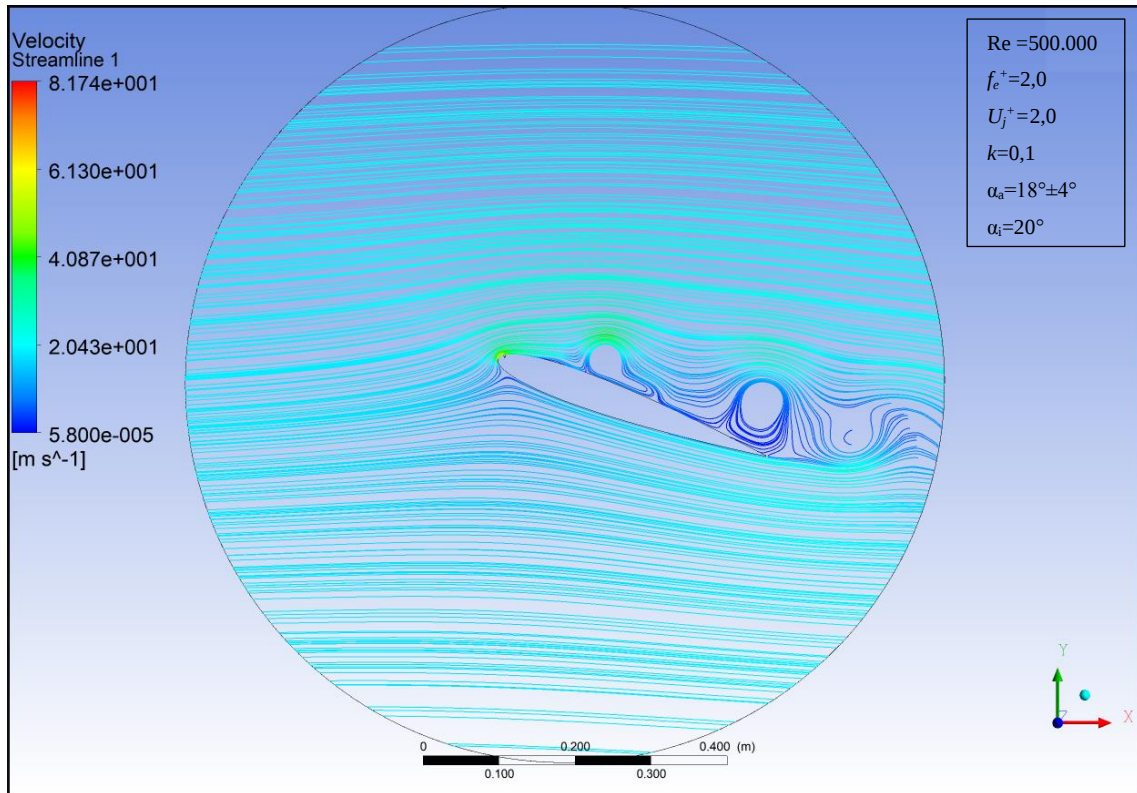
Şekil 6.99. Hücüm açısı  $\alpha = 14^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



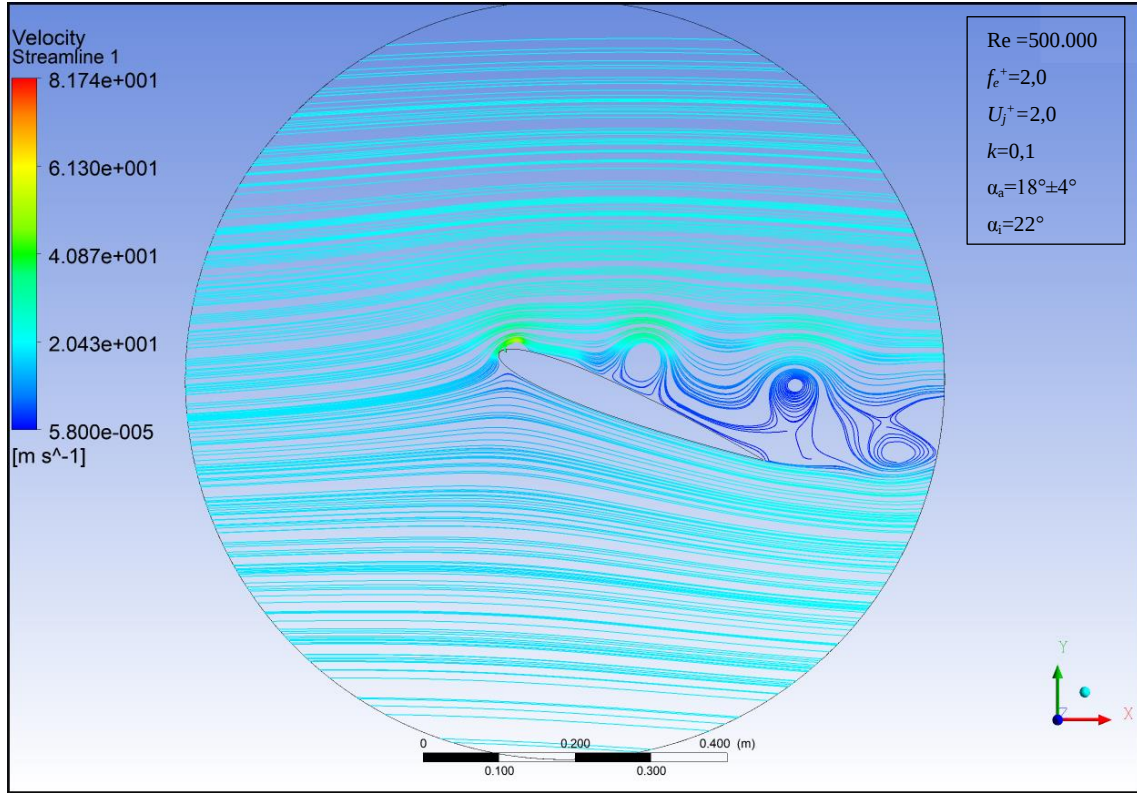
Şekil 6.100. Hücüm açısı  $\alpha = 16^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



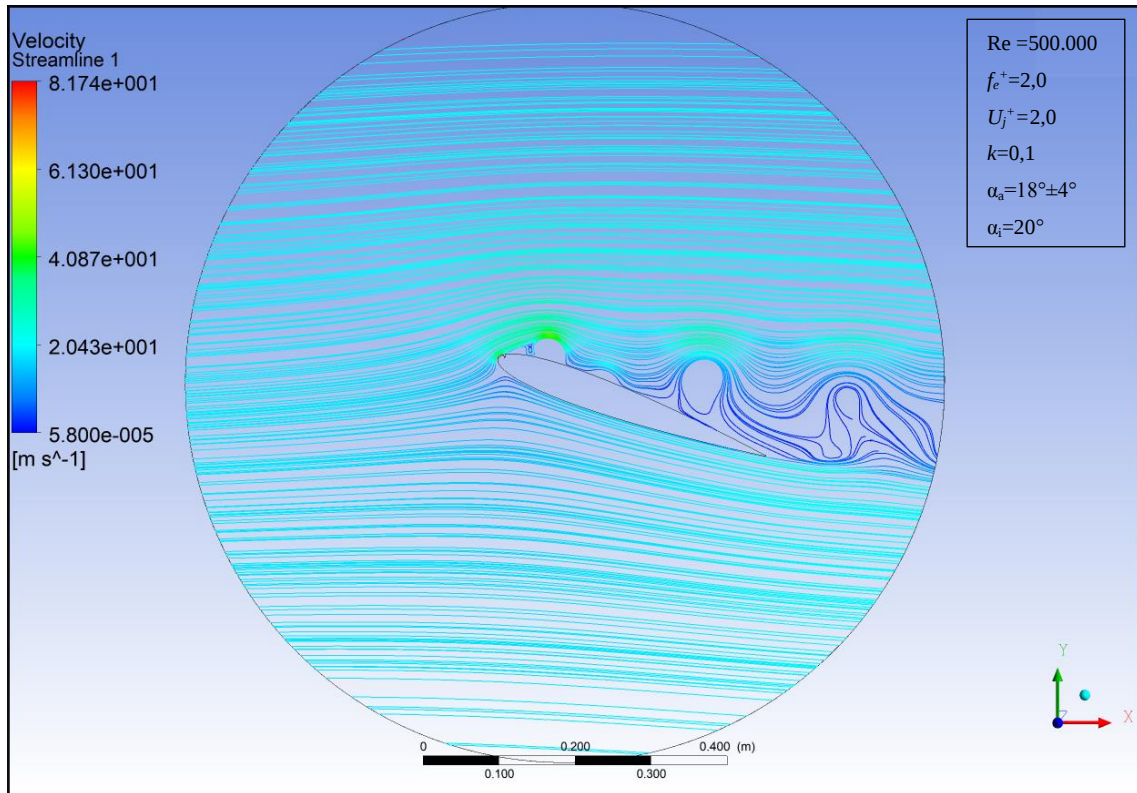
Şekil 6.101. Hücüm açısı  $\alpha = 18^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



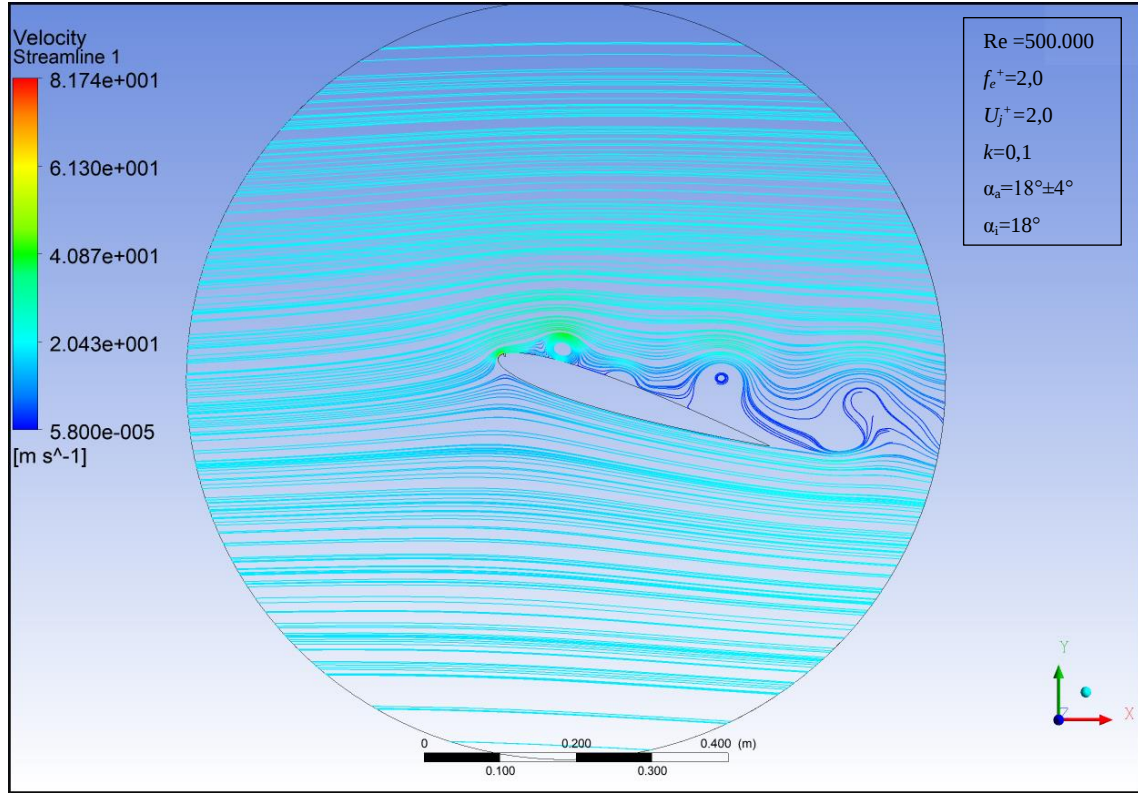
Şekil 6.102. Hücüm açısı  $\alpha = 20^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



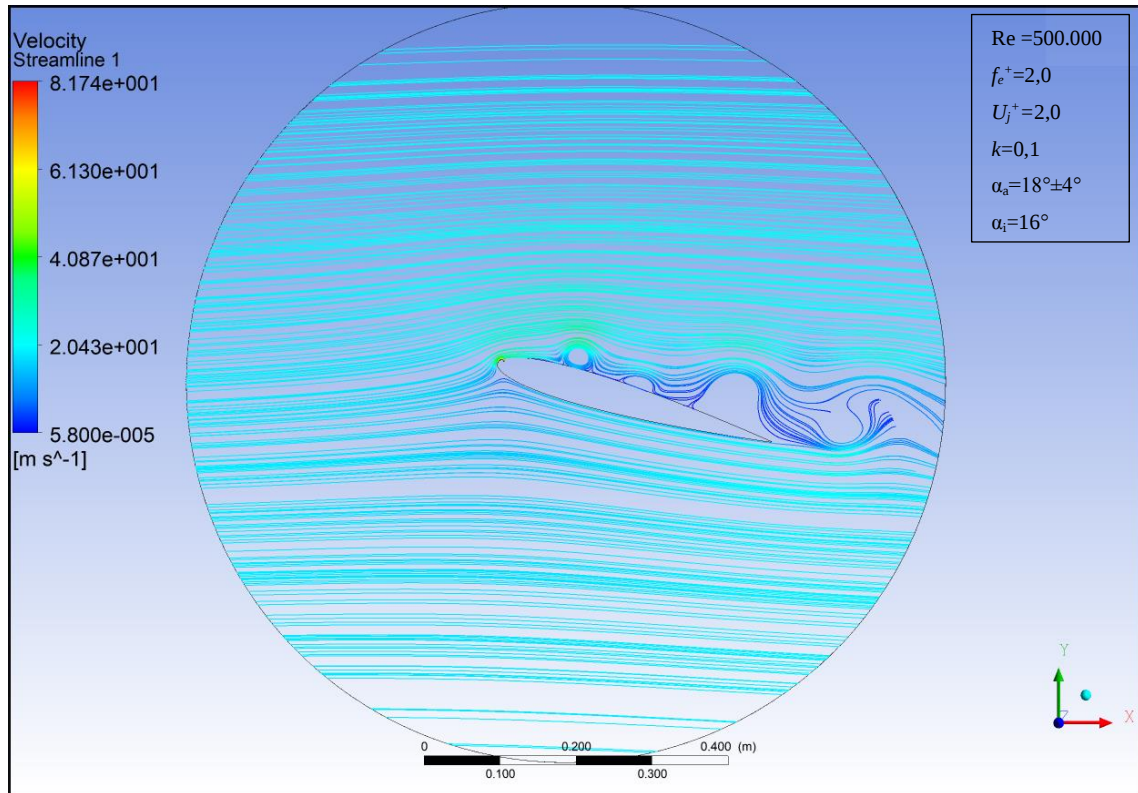
Şekil 6.103. Hücüm açısı  $\alpha = 22^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



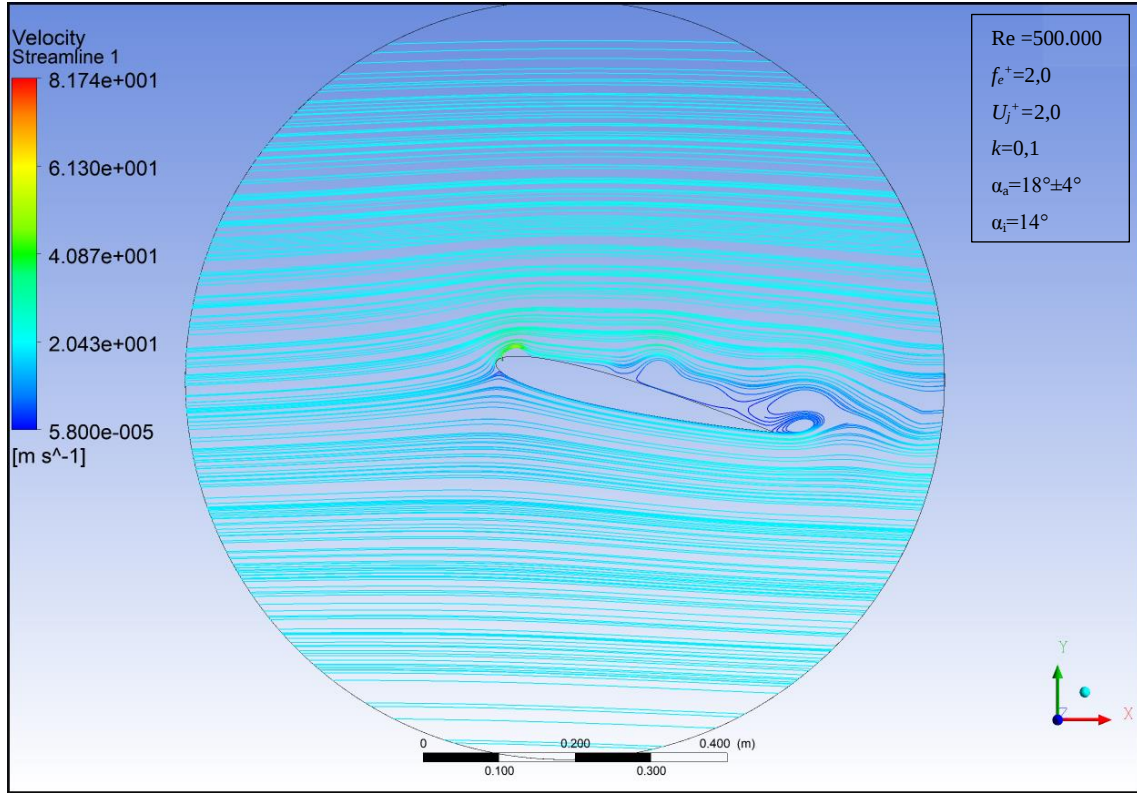
Şekil 6.104. Hücüm açısı  $\alpha = 20^\circ$  için aşağı harekette serbest akış çizgileri



Şekil 6.105. Hücüm açısı  $\alpha = 18^\circ$  için aşağı harekette serbest akış çizgileri

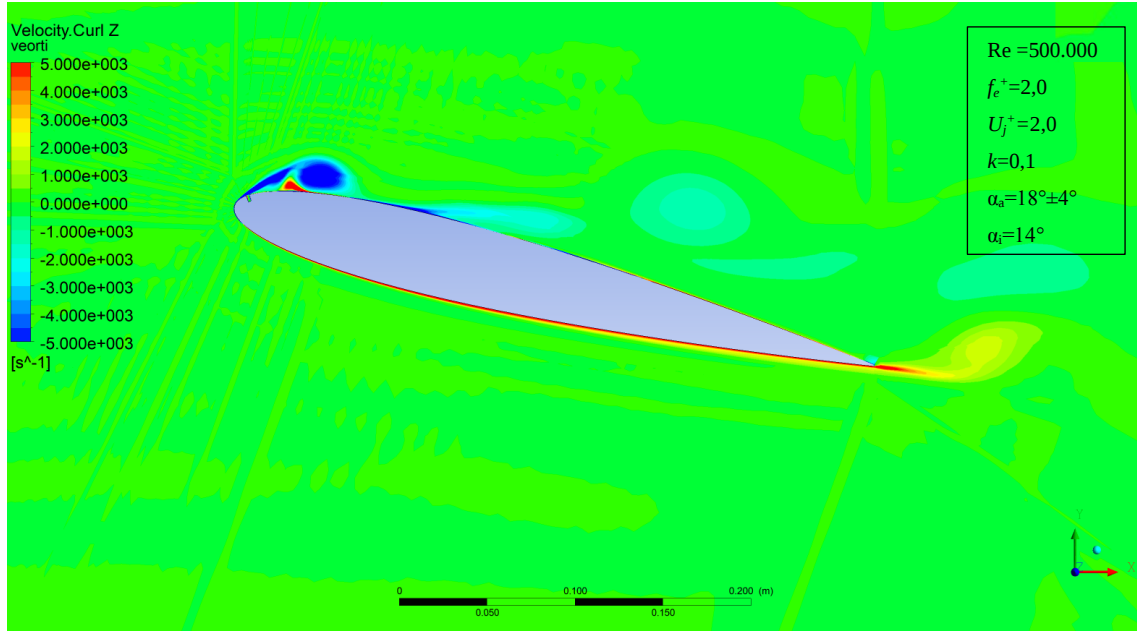


Şekil 6.106. Hücüm açısı  $\alpha = 16^\circ$  için aşağı harekette serbest akış çizgileri

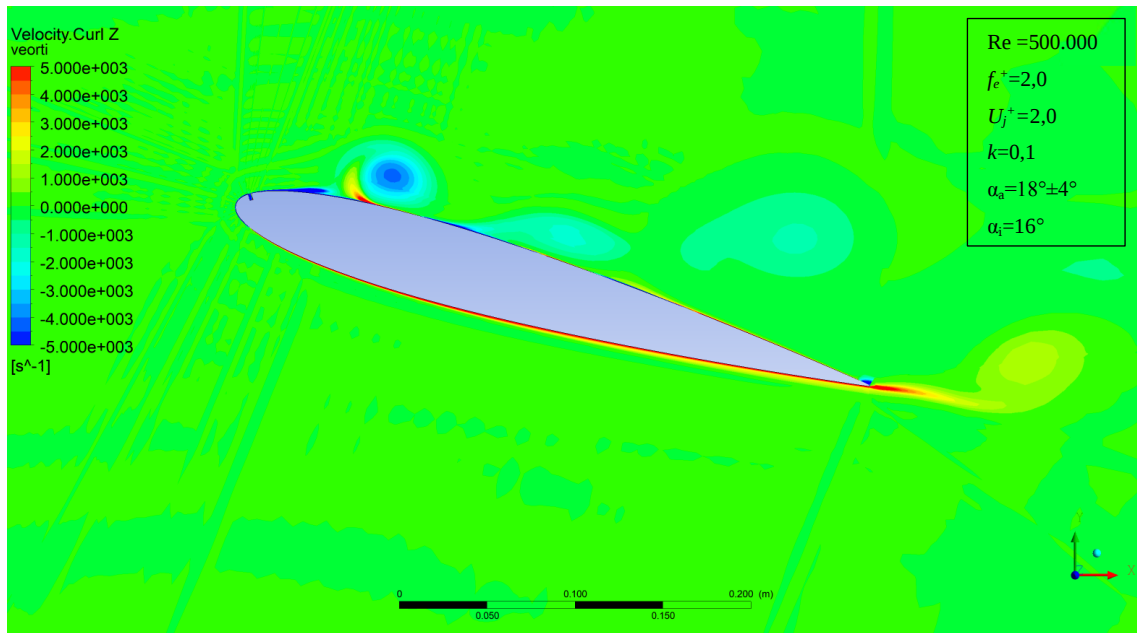


Şekil 6.107. Hücüm açısı  $\alpha=14^\circ$  için aşağı harekette serbest akış çizgileri

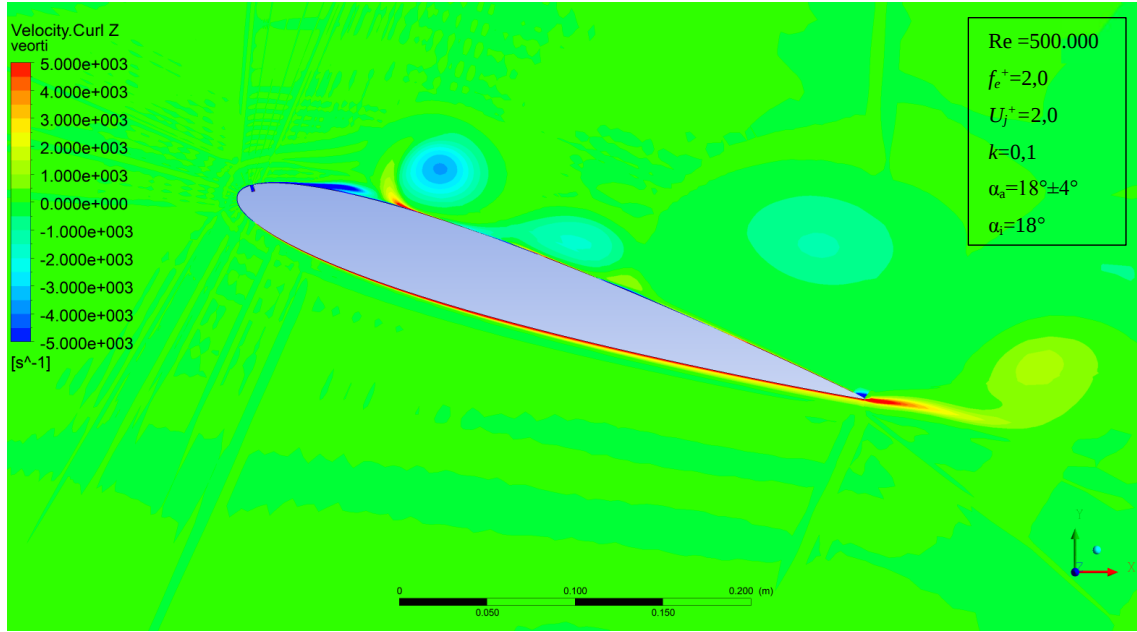
Şekil 6.108-116. da Analiz-18 parametre değerlerinde belirtilen hücüm açılarında kanat çevresindeki girdap dağılımları görülmektedir. Bu analizde, jet frekansının artışı kanat üzerinde akış ayrılmalarına engel olarak girdap yapılarının büyümesine engel olmaktadır. Üfleme bölümlerinde akış kopmaları olsa da kopan akışların oluşturduğu girdap yapıları küçük boyutludur. Daha önce incelenen 0,5-1,0-1,5 boyutsuz jet frekansındaki sentetik jet salınımlarının sıra gelen etkisi incelendiğinde, frekans artışının girdap oluşumunu doğrudan etkilediği görülmektedir.



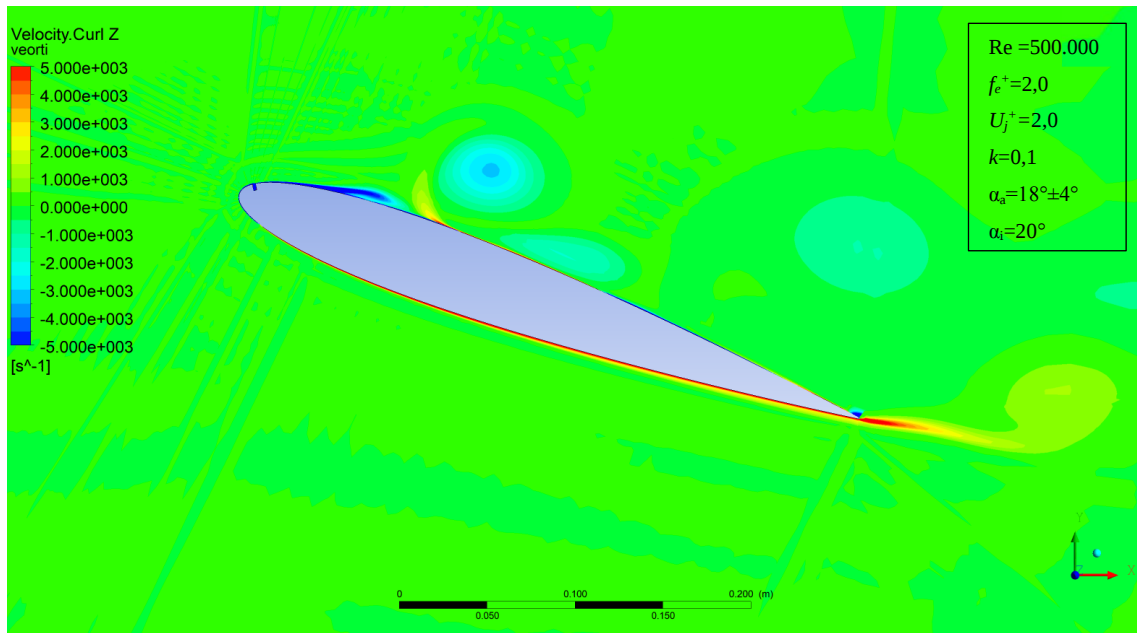
Şekil 6.108. Hücüm açısı  $\alpha = 14^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



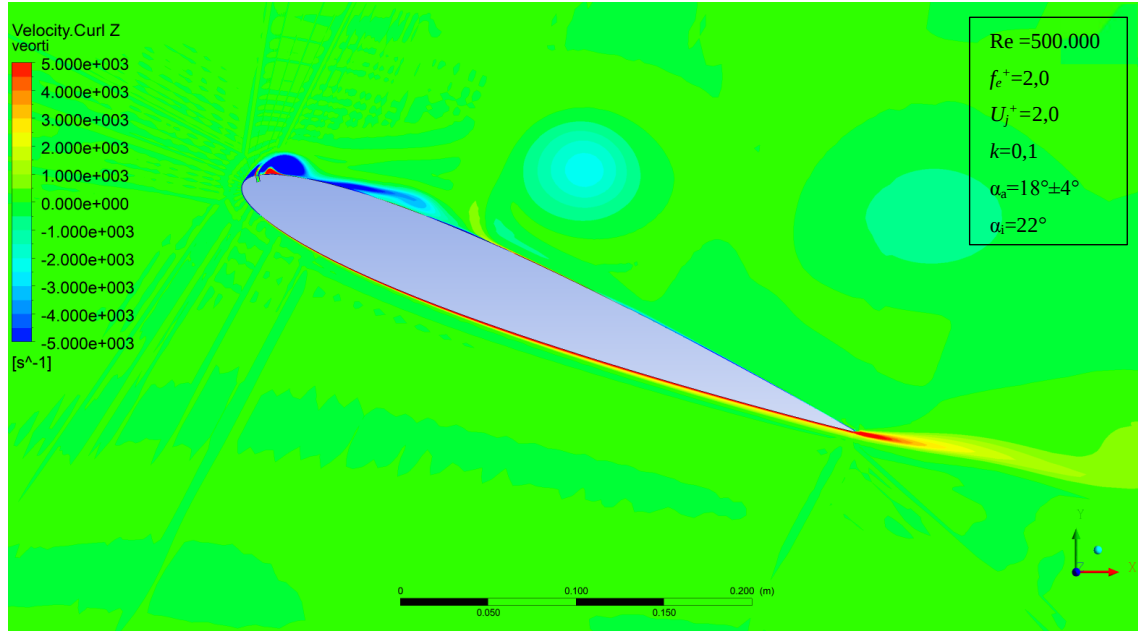
Şekil 6.109. Hücüm açısı  $\alpha = 16^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



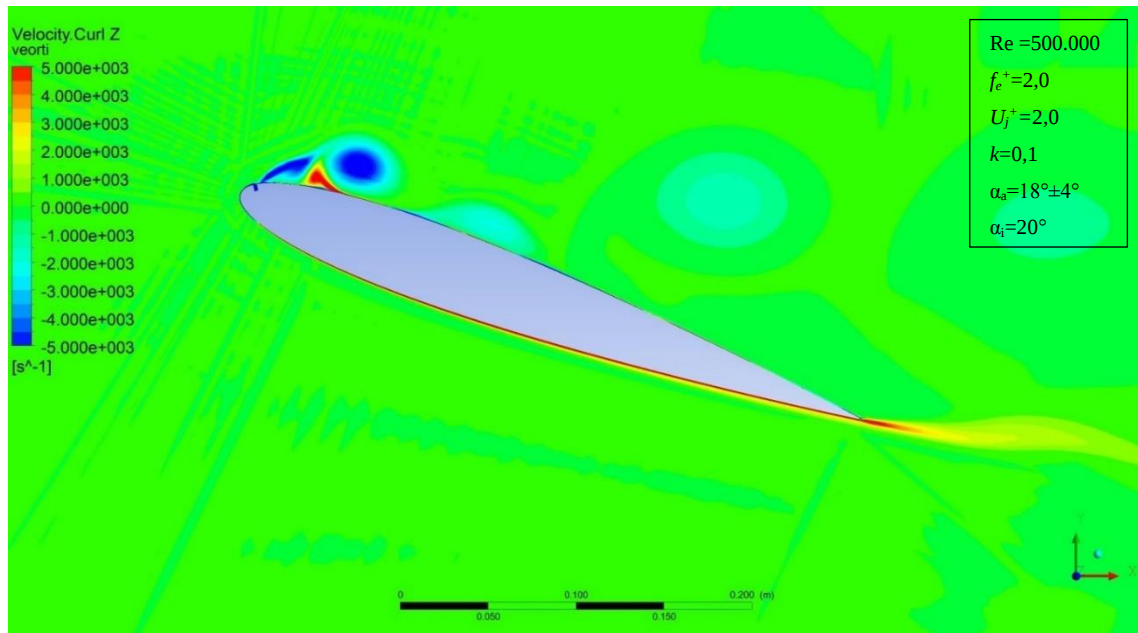
Şekil 6.110. Hücüm açısı  $\alpha = 18^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



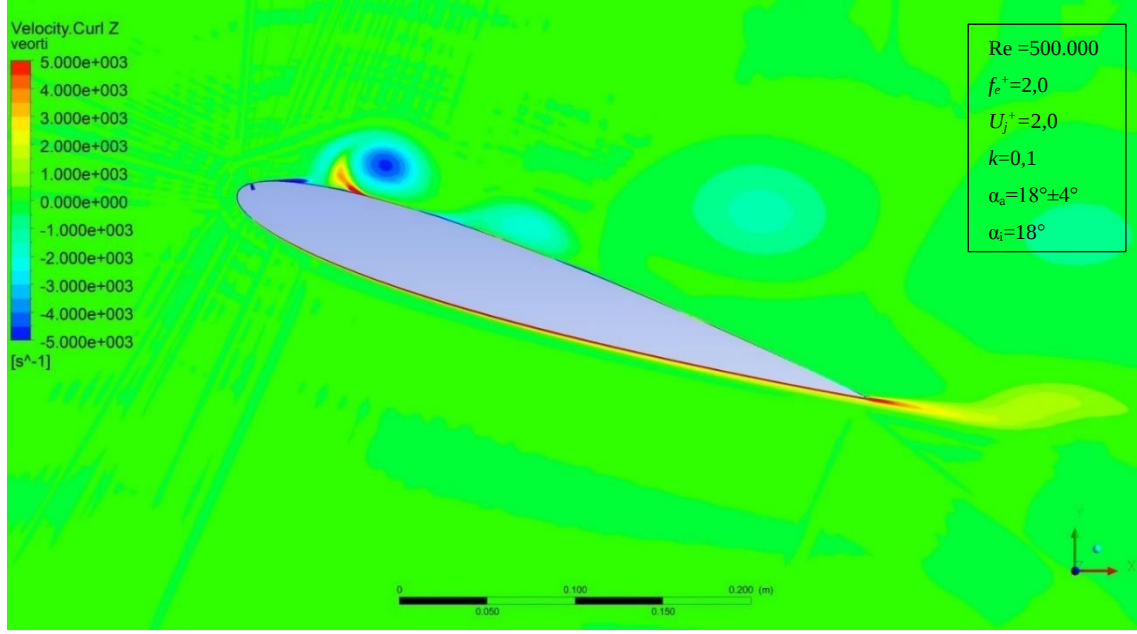
Şekil 6.111. Hücüm açısı  $\alpha = 20^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



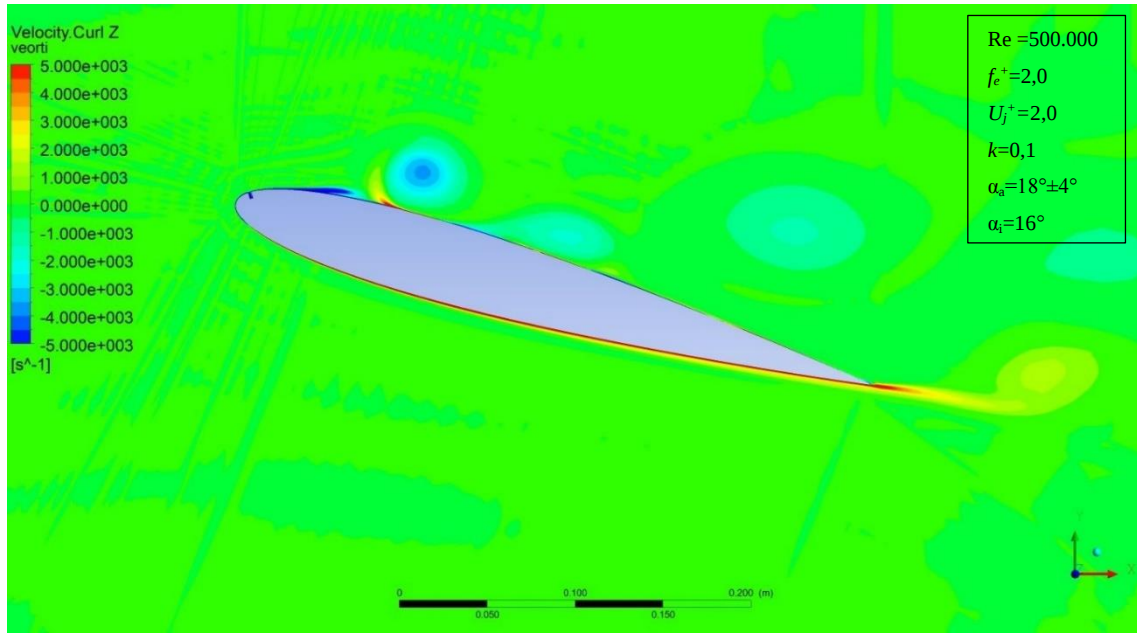
Şekil 6.112. Hücüm açısı  $\alpha=22^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları



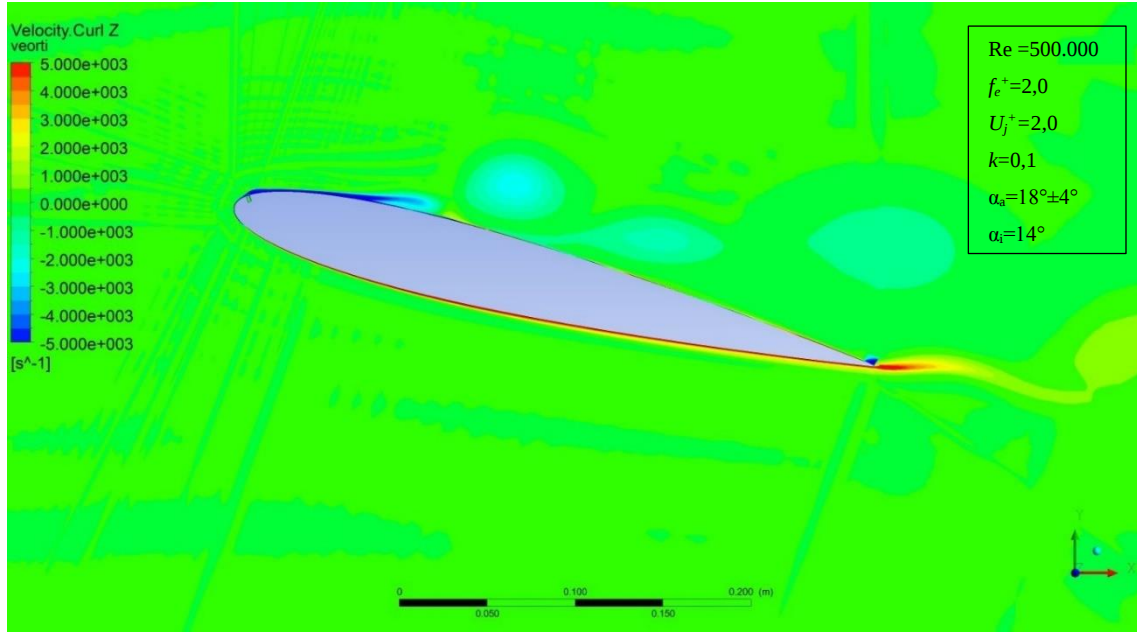
Şekil 6.113. Hücüm açısı  $\alpha=20^\circ$  için aşağı harekette girdap dağılımları



Şekil 6.114. Hücüm açısı  $\alpha = 18^\circ$  için aşağı harekette girdap dağılımları

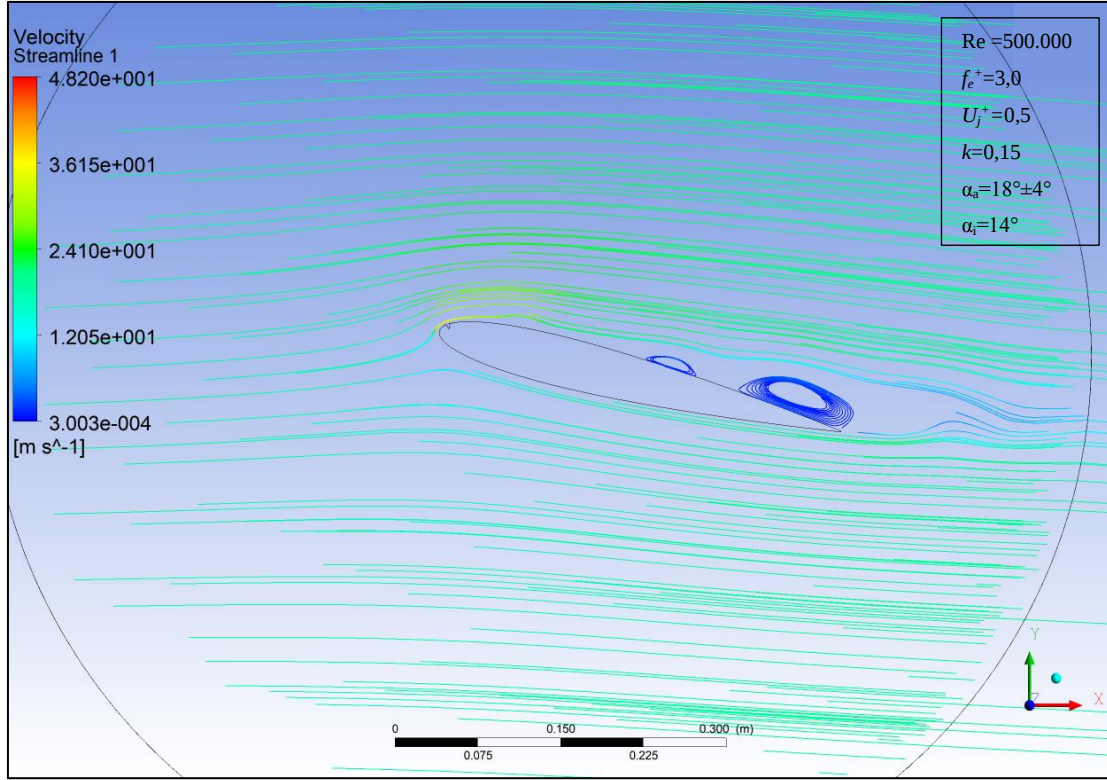


Şekil 6.115. Hücüm açısı  $\alpha = 16^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları

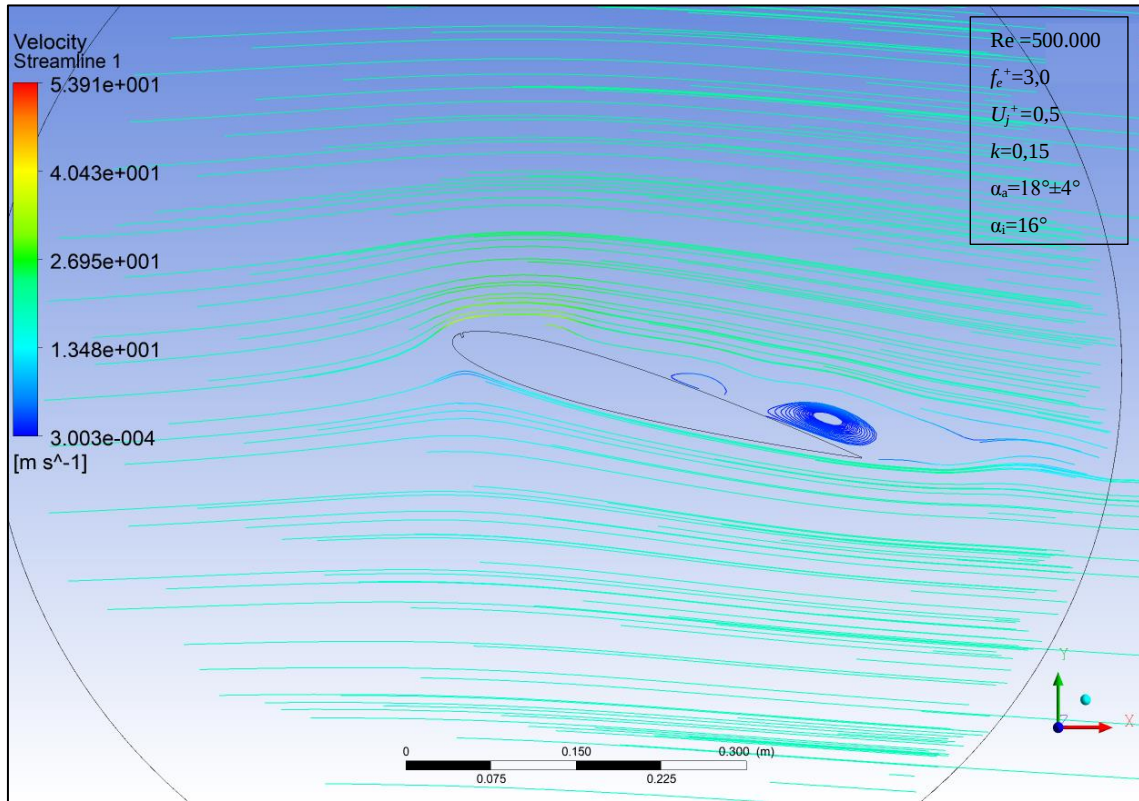


Şekil 6.116. Hücum açısı  $\alpha=14^\circ$  için yukarı harekette girdap dağılımları

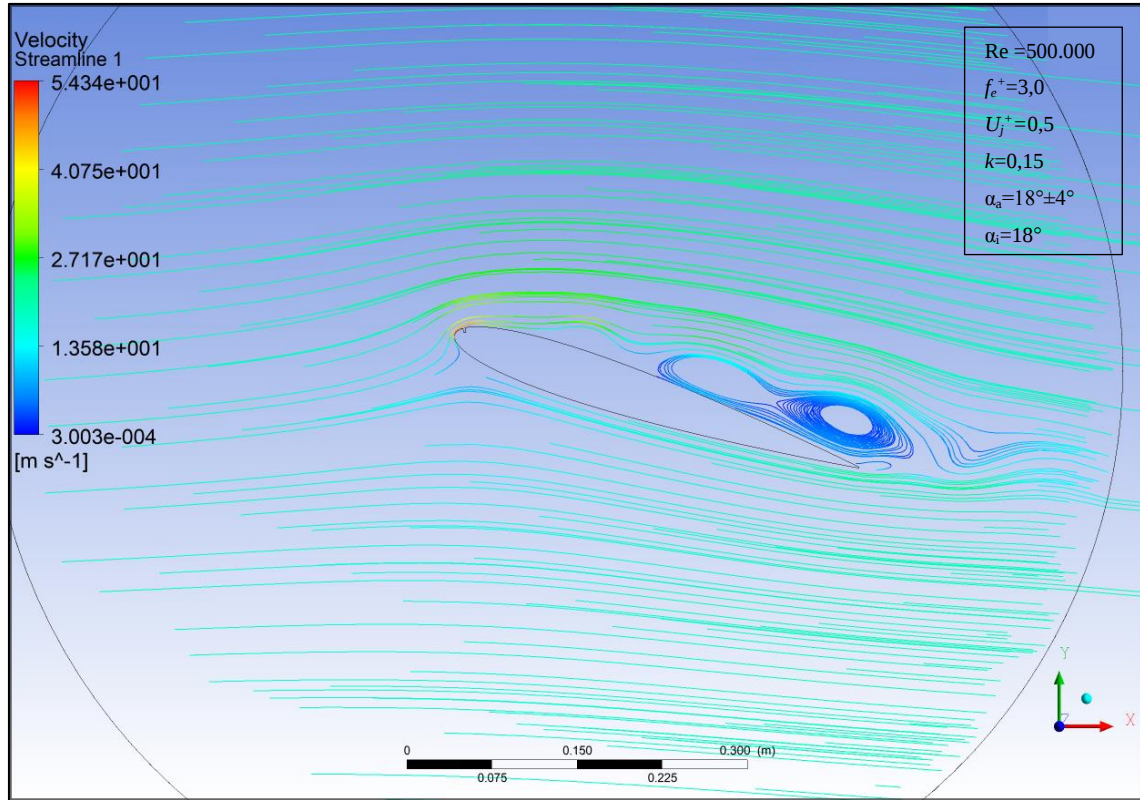
Şekil 6.117-6.124 arasında Analiz-21 parametrelerindeki serbest akış çizgileri gösterilmektedir. Bu çalışmada 3,0 jet frekansında, 0,5 jet hızında gerçekleşen analizin salınım frekansı 0,15'tir. Jet frekansının yüksek olmasına rağmen, jet hızının düşük olması ile akış kopmaları, hücum açısının artışı ile birlikte hücum kenarına ilerlemektedir. Oluşan girdap alanları daha geniş olarak görülmekte ve ayrılan akış kuyruk ucuna doğru ancak bağlanmakta veya kopmaktadır. Tek girdap oluşumu ile akışın bağlanamaması sebebiyle verim düşmektedir. En yüksek konum olan  $22^\circ$  de oluşumunu tamamlamayan girdaplar geri dönüş hareketinde de, düşük salınım frekansından dolayı yüksek jet hızlı analizlere göre daha verimsiz bir akış oluşturmaktadır.



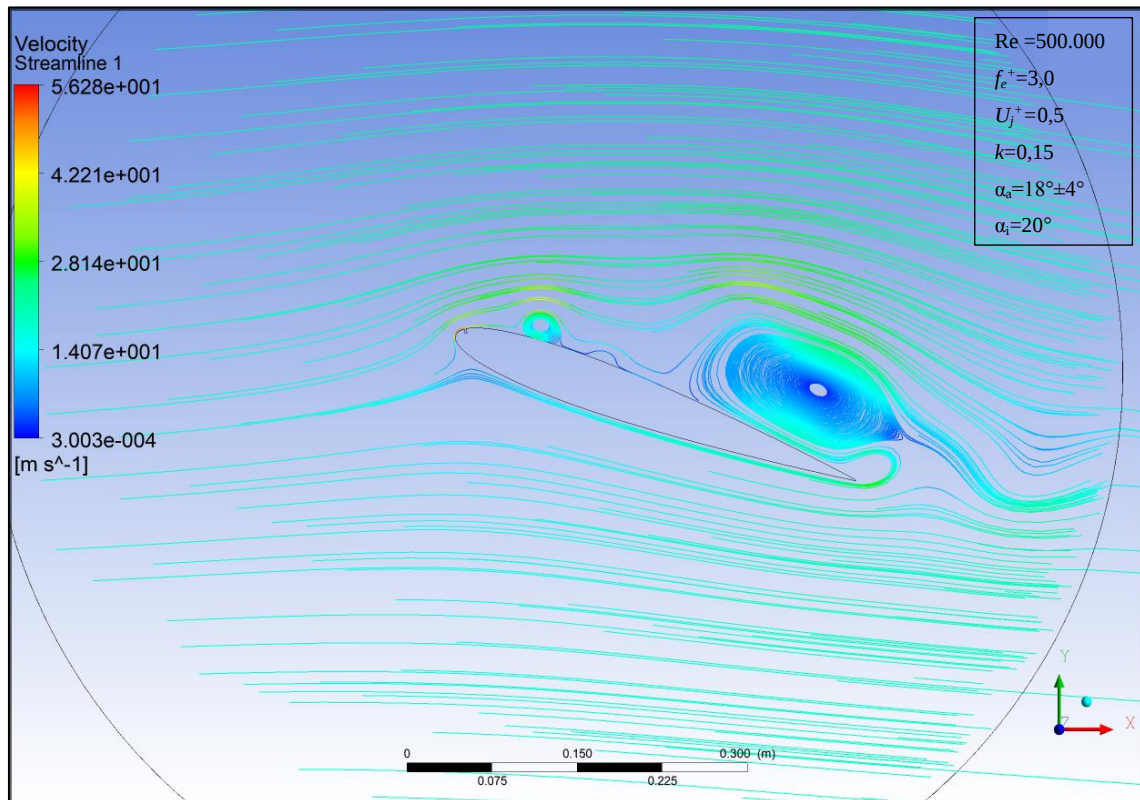
Şekil 6.117. Hücüm açısı  $\alpha=14^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



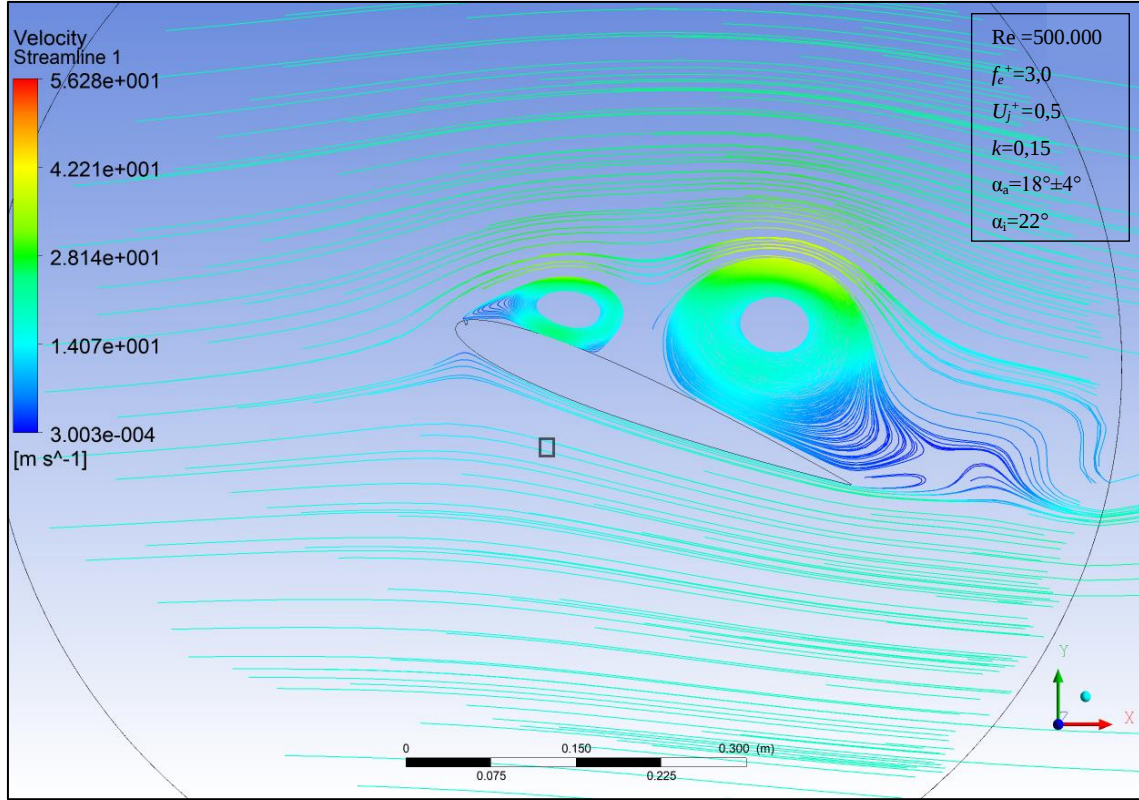
Şekil 6.118. Hücüm açısı  $\alpha=16^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



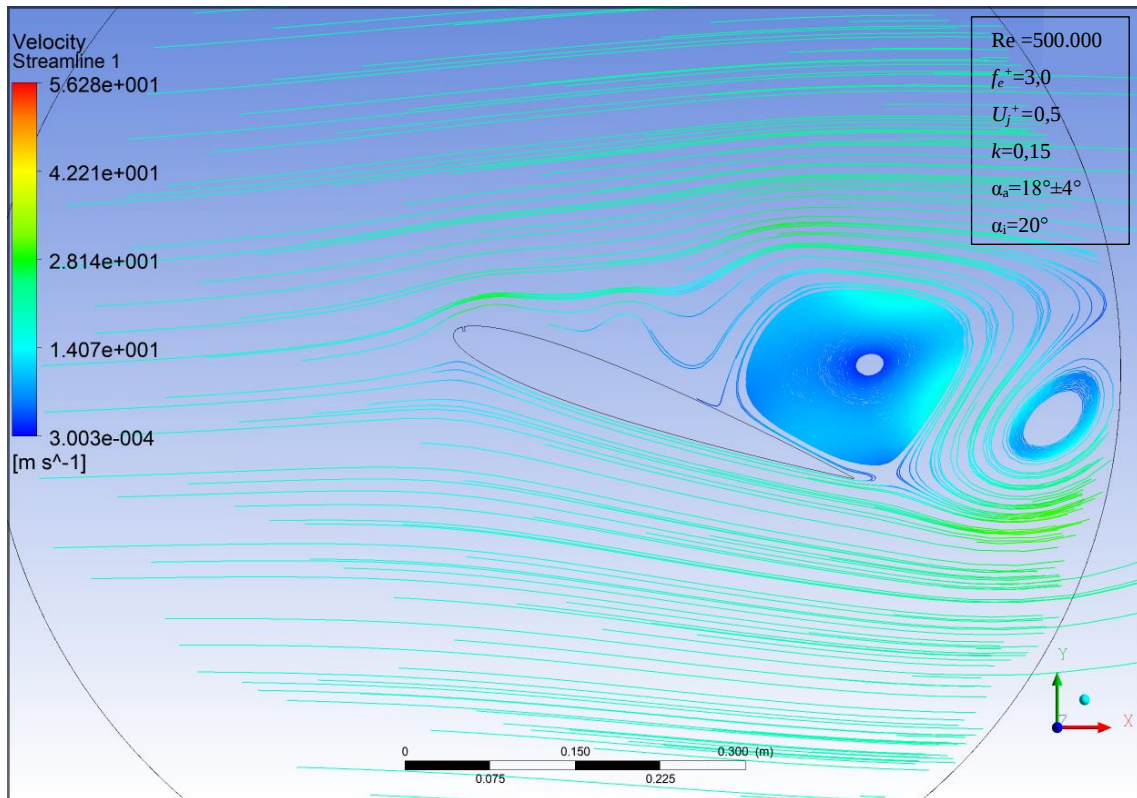
Şekil 6.119. Hücüm açısı  $\alpha = 18^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



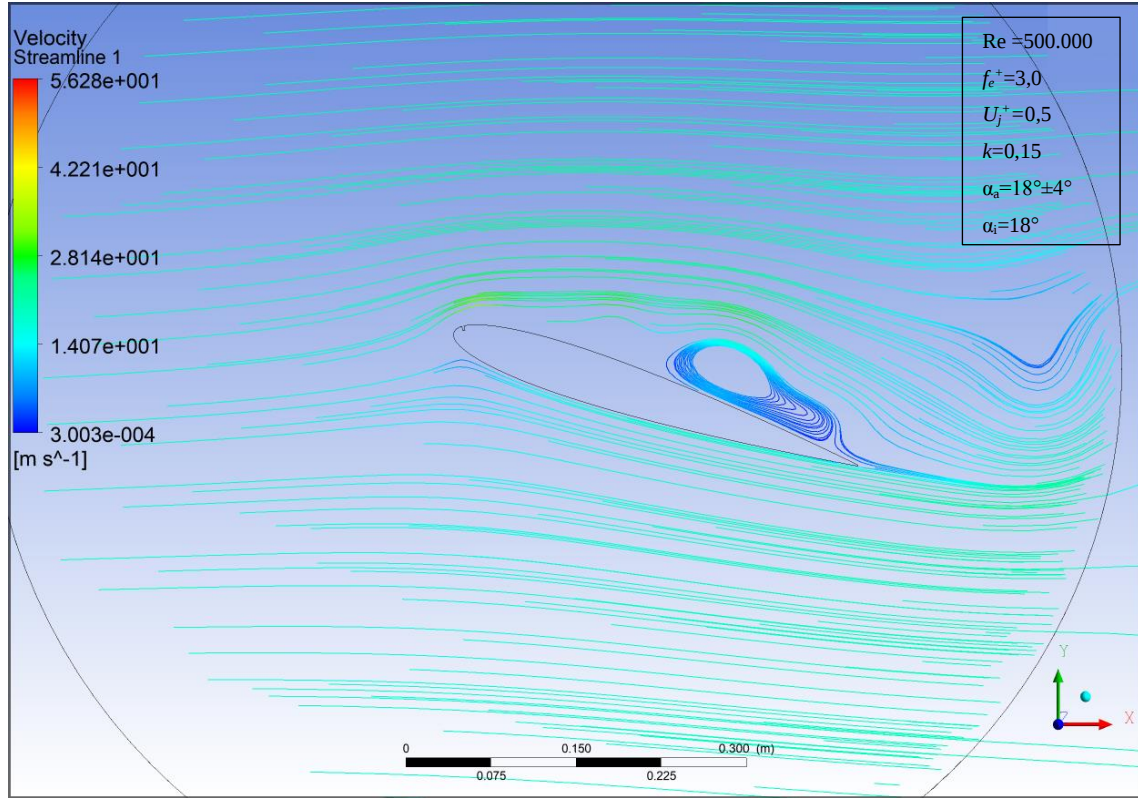
Şekil 6.120. Hücüm açısı  $\alpha = 20^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



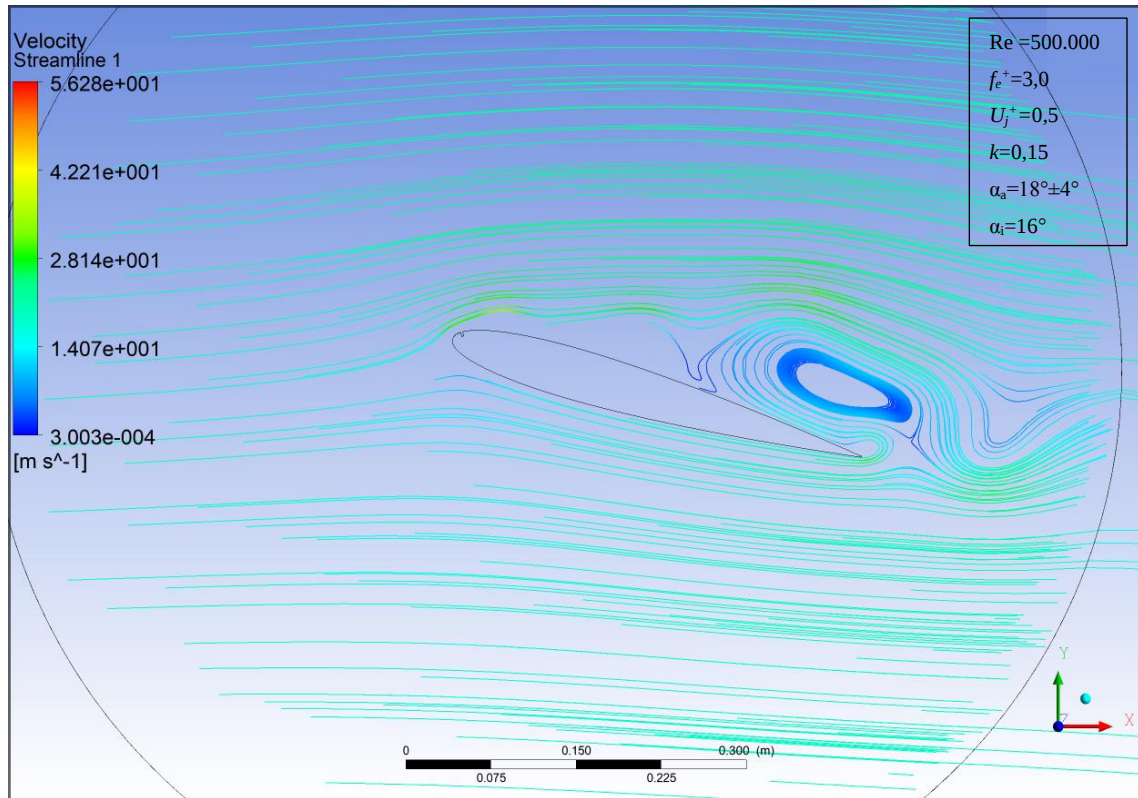
Şekil 6.121. Hücüm açısı  $\alpha = 22^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



Şekil 6.122. Hücüm açısı  $\alpha = 20^\circ$  için aşağı harekette serbest akış çizgileri



Şekil 6.123. Hücüm açısı  $\alpha = 18^\circ$  için aşağı harekette serbest akış çizgileri

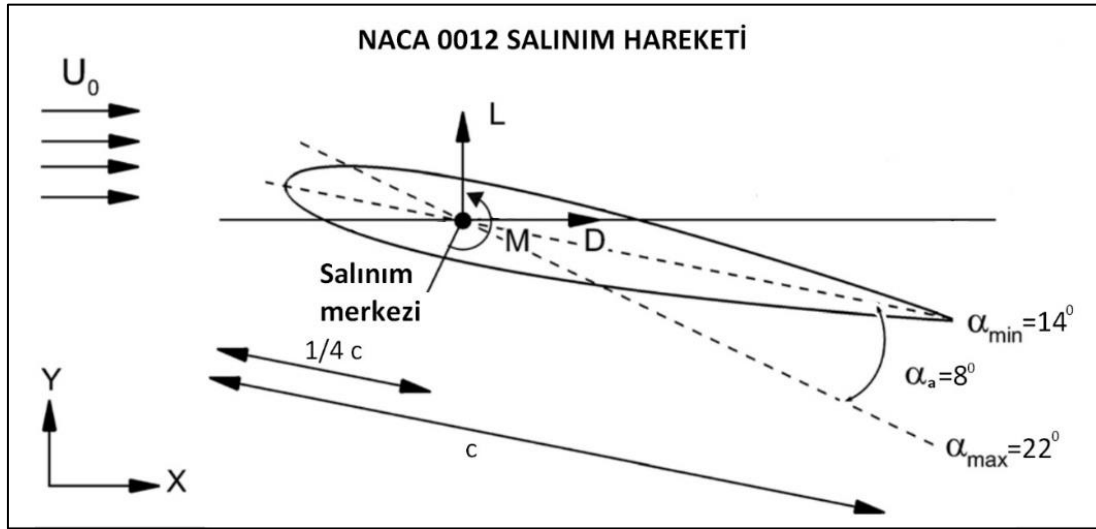


Şekil 6.124. Hücüm açısı  $\alpha = 16^\circ$  için aşağı harekette serbest akış çizgileri

#### 6.4. Kanat Salınımının Etkisi

İndirgenmiş frekans, kanat salınım (yunuslama) hareketinde kanatın belirli bir nokta etrafında çevresel olarak dönüşünü ifade eden önemli bir boyutsuz parametredir;  $k$  ile gösterilir. Boyutsuz olarak dönüşümü aşağıdaki formülle yapılır.

$$k = \frac{\omega c}{2U_\infty} \quad (6.5)$$



Şekil 6.125. Kanat profili yunuslama salınım hareketi

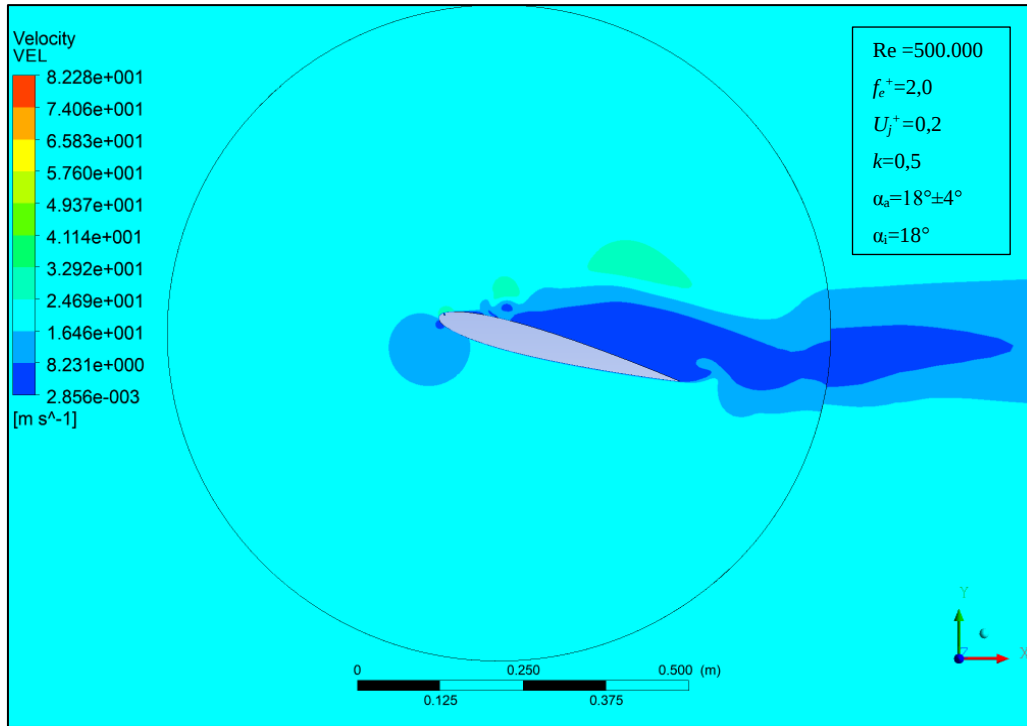
Kararsız aerodinamik alanında, kanatların ve kanatların dinamik hareket etüdü uzun yıllardır araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Çeşitli hareket türleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir ve ilgili çeşitli parametrelerin ve olayların etkisi araştırılmıştır; bunların salınım hareketi ve Dinamik Tutunma Kaybı olarak bilinen ilgili fenomen ve bunun çeşitli etkileri geniş çapta araştırılmıştır. Aynı bağlamda, bu parametreyi kontrol etmeye yönelik birçok araştırma yapılmıştır. Salınım hareketi ve dinamik tutunma kaybı ile ilgili birçok uygulama vardır. Bazı uçak bileşenlerinin kanatları sıklıkla, kanatları belirli bölgelerinde çalışırken hızlı periyodik hücum açısı değişikliklerine maruz kalır. Benzer şekilde, çok yüksek irtifalarda uçan uçaklar üzerindeki pervaneler ve devirme rotorları veya pervaneleri bulunan uçaklar, dinamik tutunma kaybının etkilerine maruz kalır [40]. Ayrıca, İHA'ların salınımlı kanat çırpma kanatları ve füze aerodinamiği alanında çalışan araştırmacılar için ilgi çekici bir alandır. Diğer uygulamalar arasında rüzgâr türbini rotorları ve turbo makineleri bulunmaktadır.

Salınım yapan kanat profili alanındaki araştırmalar, 0,05-3,5 gibi geniş aralıklarda indirgenmiş frekansların kullanıldığı çalışmalarda helikopterlerin pervane salınımlarını incelemek için ilgi çeken bir alandır. Helikopter rotor kanatları ağır yüklerde ve yüksek ileri hızlarda dinamik efektlerle çalışırlar. Hücüm açılarındaki değişimler doğada periyodik ve sinüzoidaldir. Bir helikopterin performansı temel olarak ilerleyen bıçak üzerindeki sıkıştırılabilirlik etkileri ve dinamik tutunma kaybının tekrar kapanan bıçak üzerindeki etkisi ile sınırlıdır. Dinamik tutunma kaybı, bir kanat veya kanat hızlı bir şekilde statik tutunma kaybı açısından daha fazla bir hücum açısına geçirildiğinde meydana gelir. Üretilen geçici kaldırma, aslında ayrılmayı geciktiren ‘Dinamik Tutunma Kaybı Girdabı’ oluşumu nedeniyle statik değerinden çok daha fazladır. Bu vorteks tutuşundan sonra bu kaldırma kuvveti daha sonra doğrusal olmayan bir şekilde kaybedilir.

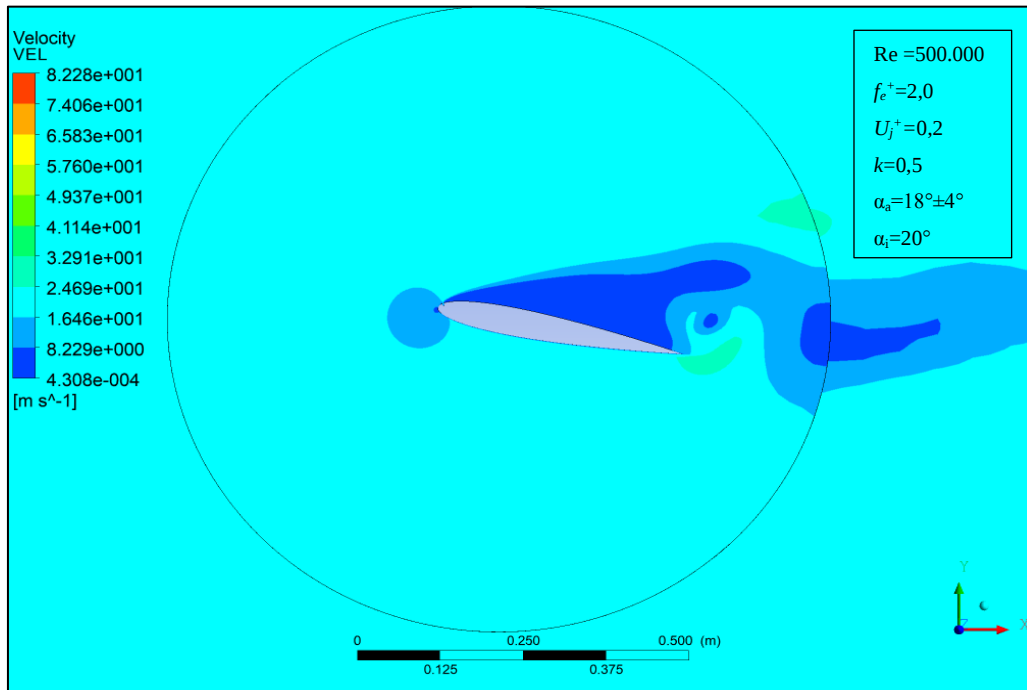
Yukarıda belirtilen helikopter rotor kanatları, turbomakinalar, uçak manevra kabiliyeti ve mikro-hava taşıtları vb. uygulamalarda, dinamik tutunma kaybı işleminin istenen özelliklerine sahip performans artışları mümkün görünmektedir. Dinamik tutunma kaybı, durma olmaya, duraklama başlangıcı, hafif duraklama ve derin duraklama gibi çeşitli aşamalarda kategorize edilebilir. Dinamik tutunma kaybına karşı salınımlı hareketin analizini karmaşık hale getiren pek çok faktör vardır. Kanat şekli, Reynolds sayısı, Mach sayısı, indirgenmiş frekans, ortalama hareket ve genlik ve hareket türü, önemli bir etkiye sahip kanat uçlarının yanında üç boyutlu efektlerin yanı sıra ana faktörlerdir. Kanat planform şekli ve geriye eğilme açısı gibi faktörler de önemli bir rol oynar [40].

Salınım frekansının etkilerini görebilmek için, aynı jet genliği ve yakın jet frekanslarındaki, farklı frekanslarda salınım yapan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalarda,  $18^{\circ}$ - $20^{\circ}$ - $22^{\circ}$  lerdeki kanat etrafı akış hızı dağılımları karşılaştırılmıştır. Dağılımlar göstermektedir ki, yüksek salınım frekanslarının yukarı doğru hareketlerde fayda sağladığı görülmektedir. Akış kopmasına fırsat vermeden daha hızlı bir açısal hız ile hareket eden kanat profili daha yüksek oranda kaldırma sağlamaktadır. Ancak, yine aynı şekilde yüksek bir sürüklenme kuvveti de oluşturduğu görülmektedir. Toplam kazanım olarak değerlendirildiğinde,  $21,4^{\circ}$  hücum açısına kadar olan bölümde yüksek frekansta salınım yapan profilin daha avantajlı olduğu görülmektedir.

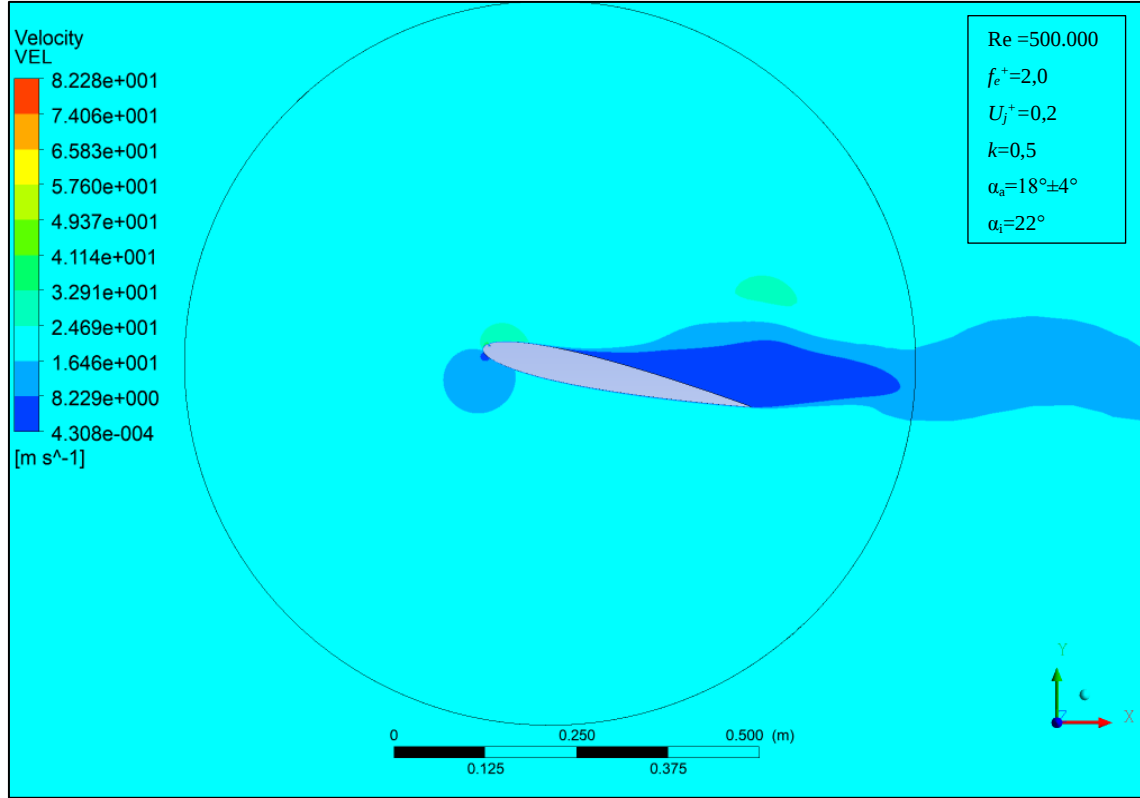
Şekil 6.126-6.128 arasında Analiz-20 için hız dağılımları, Şekil 6.129-6.131 arasında Analiz-25 için hız dağılımları gösterilmektedir.



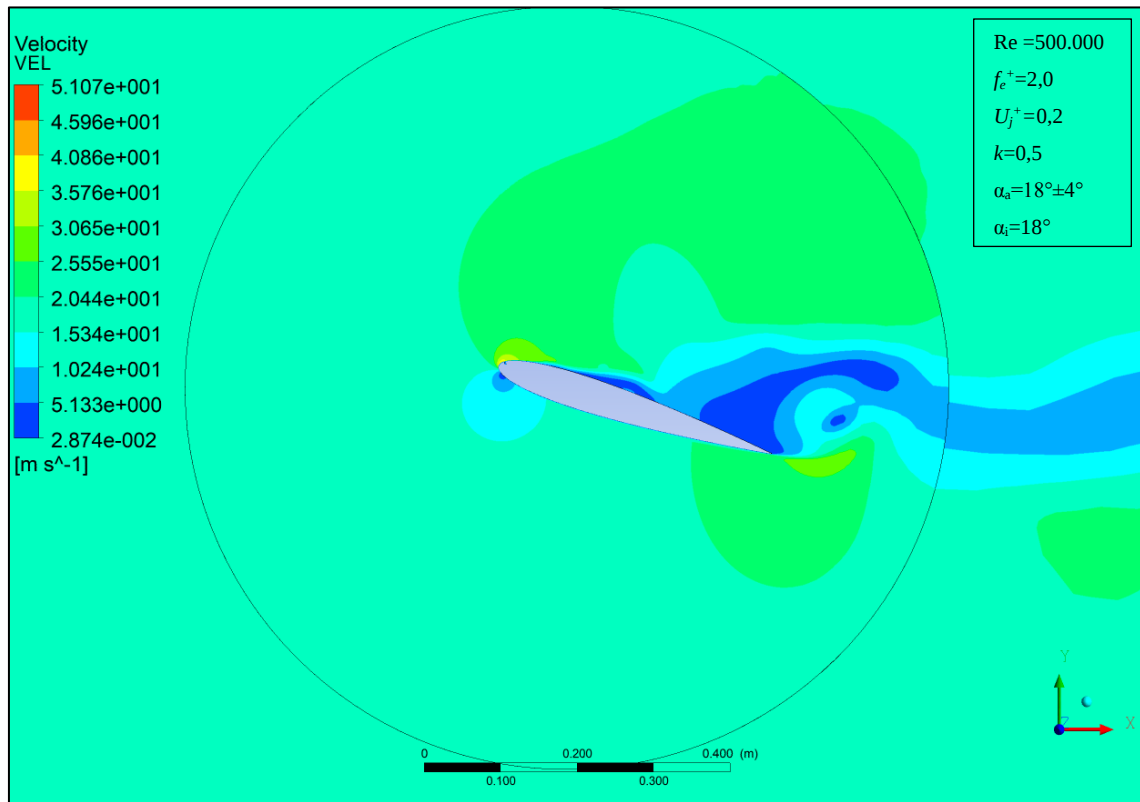
Şekil 6.126. Hücum açısı  $\alpha = 20^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



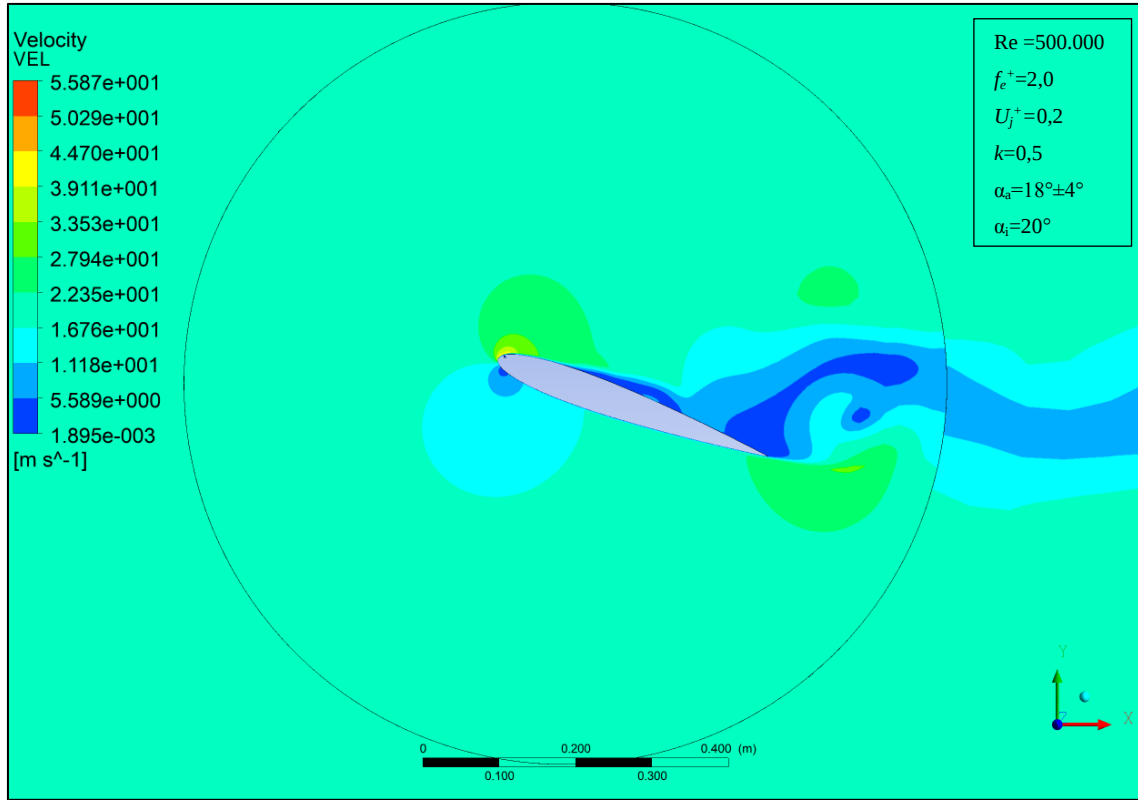
Şekil 6.127. Hücum açısı  $\alpha = 20^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



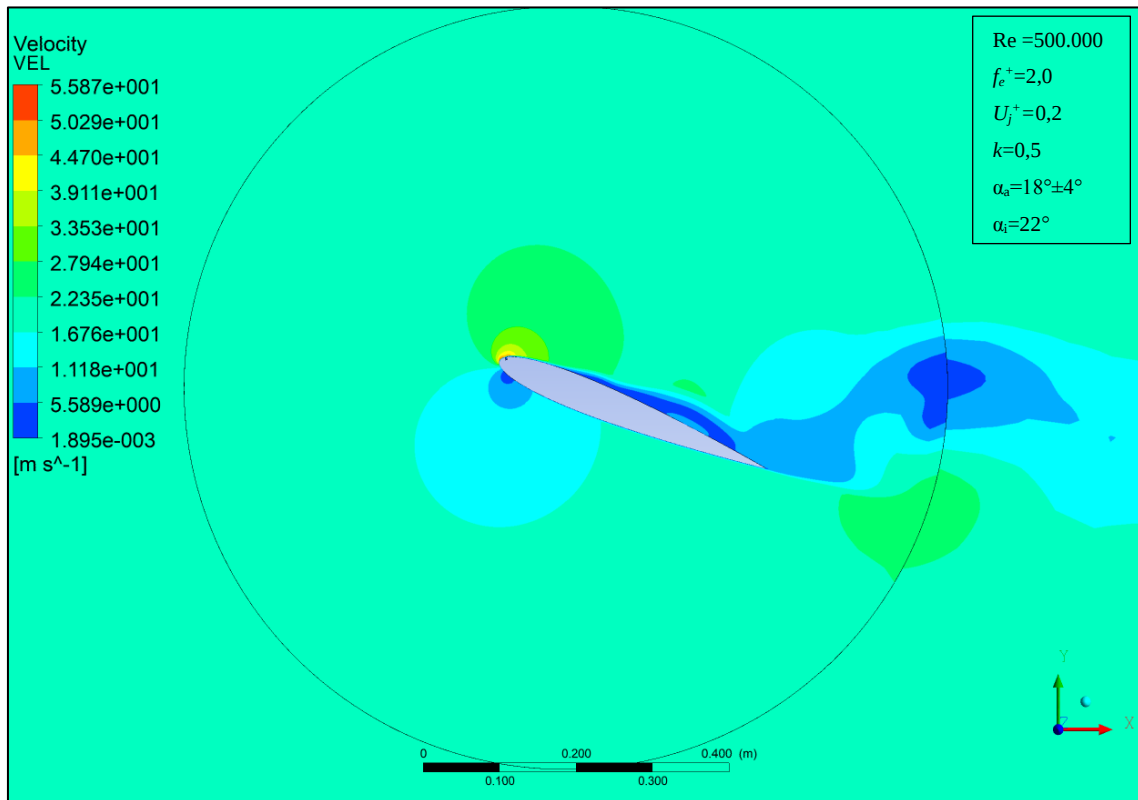
Şekil 6.128. Hücum açısı  $\alpha = 22^\circ$  için yukarı harekette serbest akış çizgileri



Şekil 6.129. Hücum açısı  $\alpha = 18^\circ$  için yukarı harekette hız dağılımları

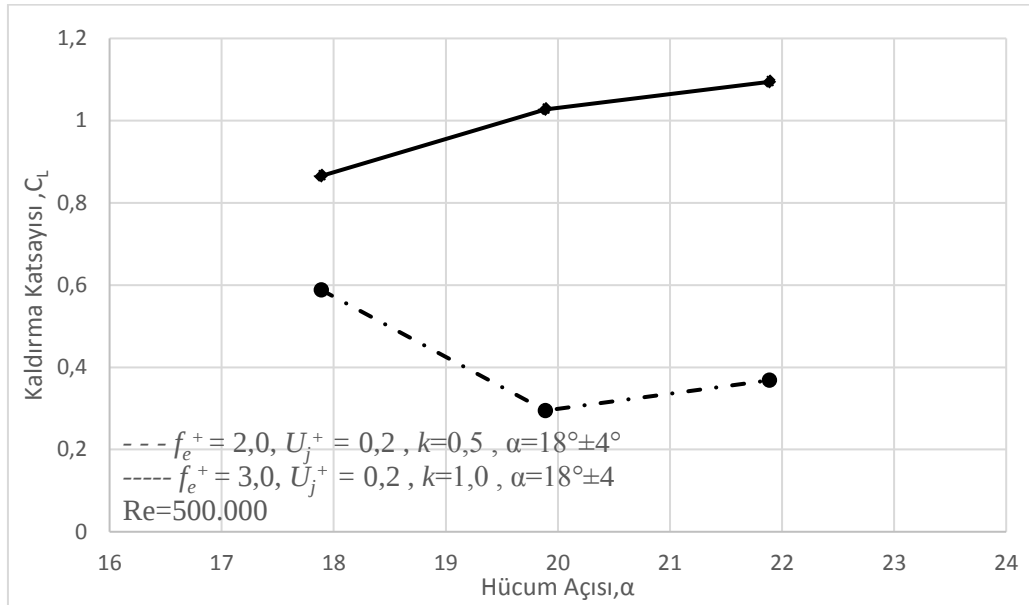


Şekil 6.130. Hücum açısı  $\alpha = 20^\circ$  için yukarı harekette hız dağılımları

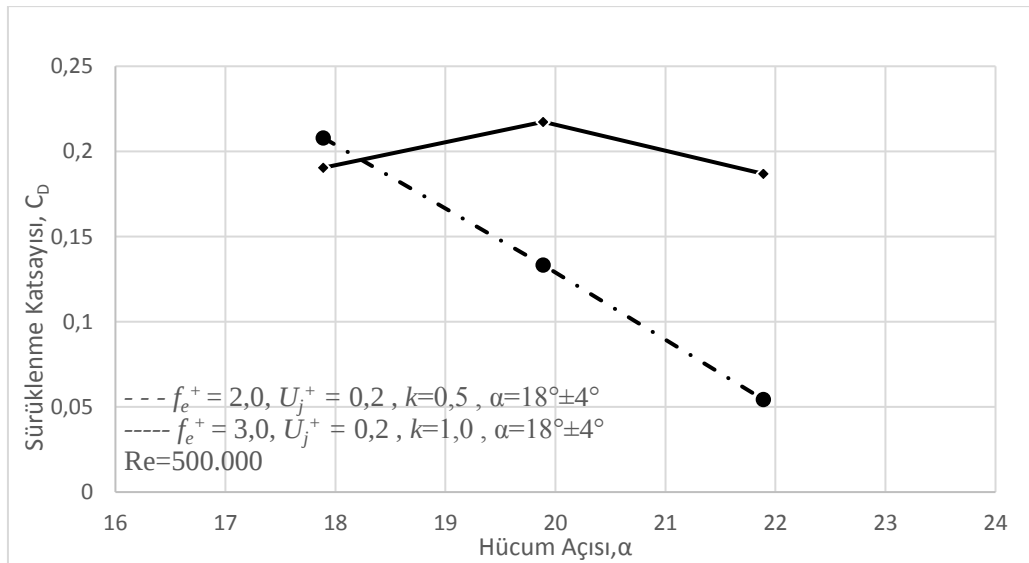


Şekil 6.131. Hücum açısı  $\alpha = 22^\circ$  için yukarı harekette hız dağılımları

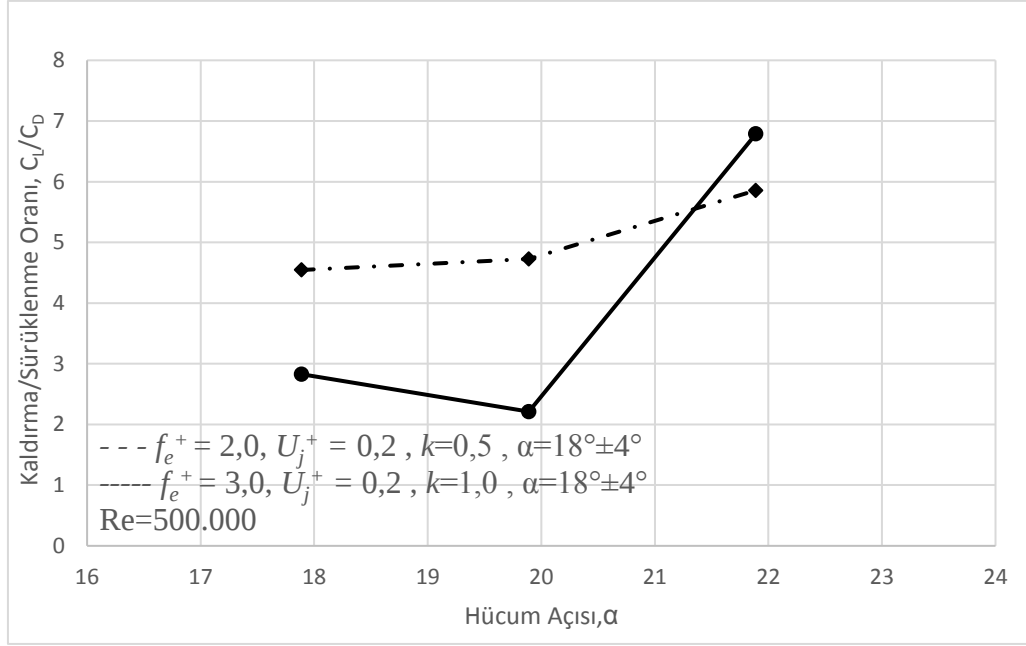
Eğer, yüksek frekanstaki akış ayrılmalarını incelersek, hücum açısı arttıkça  $18^\circ$  de 0,40c civarında kopan akış, 0,60c bölümüne yakın bir bölümde geri bağlanmaktadır. Yüksek kaldırma kuvvetinin elde edilmesindeki başlıca nedenlerden biri de akışın kanat üzerine tekrar bağlanması olarak görülebilir.  $20^\circ$ - $22^\circ$  deki kopan akışların geri bağlanma bölümleri kuyruk kısmına doğru uzamaktadır. Hücum açısından dolayı artış gösteren kaldırma kuvvetinin, kopan akış sebebi ile azalan bir artış ile kaldırma kuvvetine katkı sağladığı görülmektedir.



Şekil 6.132. Farklı hücum açıları için  $C_L$  karşılaştırma grafiği



Şekil 6.133. Farklı hücum açıları için  $C_D$  karşılaştırma grafiği



Şekil 6.134. Farklı hücum açıları için  $C_L/ C_D$  karşılaştırma grafiği

Şekil 6.41. de  $C_L$  değerlerinin zamana göre değişimi grafiksel olarak gösterilmiştir. Salınım oranının artması, maksimum  $C_L$  değerinin artmasına ve tutunma kaybı hücum açısının artmasına neden olur. Bu artış sırasında bazı noktalar sonrası  $C_L$  artışlarında değişik trendler oluşmuştur. Bu noktaların olduğu hücum açıları, kritik hücum açıları olarak ifade edilebilir.

İlk bölgede kaldırma katsayısı lineer olarak artış göstermektedir. Kritik hücum açısına çabuk ulaşır. İkinci bölümde, maksimum kaldırma kuvvetine ve kritik açığa daha geç ulaşır.

Grafikten görüldüğü üzere, salınım frekansının yüksek olduğu durumlarda, maksimum ve minimum  $C_L$  değerleri arasındaki mesafenin arttığı görülmektedir. Bu sebeple toplam kaldırma katsayısında kazanım elde edilir.

#### Kanat salınımı ve sentetik jet frekansının titreşim çözümlemesi

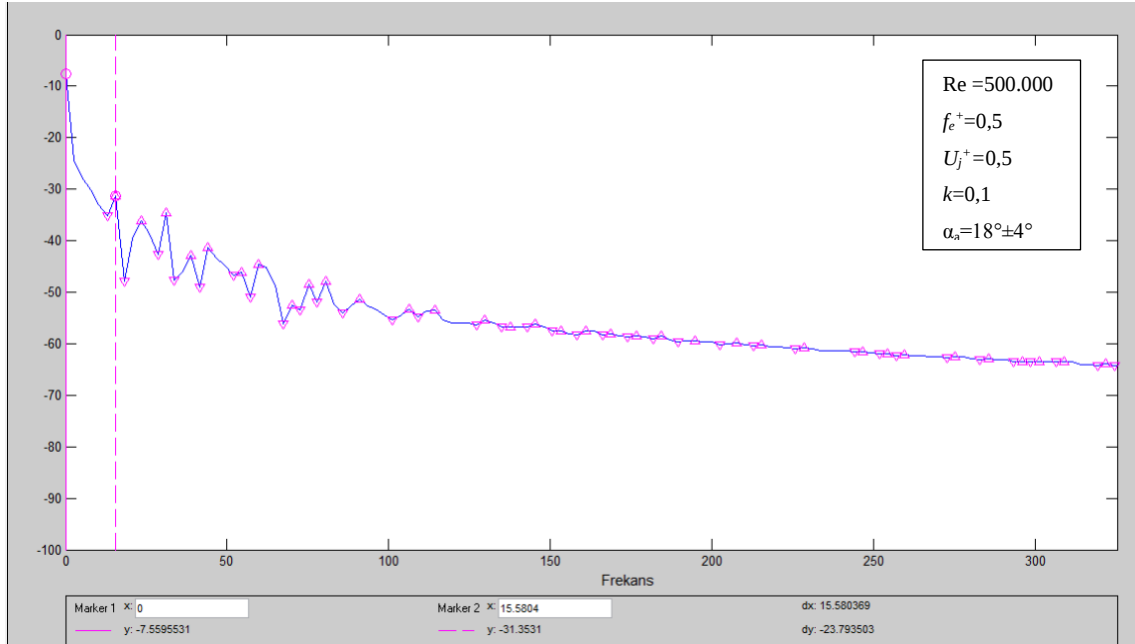
Kanat üzerinde titreşim yaratan, sentetik jet, kanat salınımı ve girdap dökülme etkilerinin görülmesi için, frekans çözümlemesi ‘Hızlı Fourier Dönüşümü’ (FFT) metodu kullanılarak yapılmıştır. Analizlerde elde edilen sonuçlar ile, parametrelerin titreşime etkilerine

ulaşmıştır. İncelemeleri yapılan FFT verilerinde kullanılan Analiz parametreleri Çizelge 6.19. da gösterilmektedir.

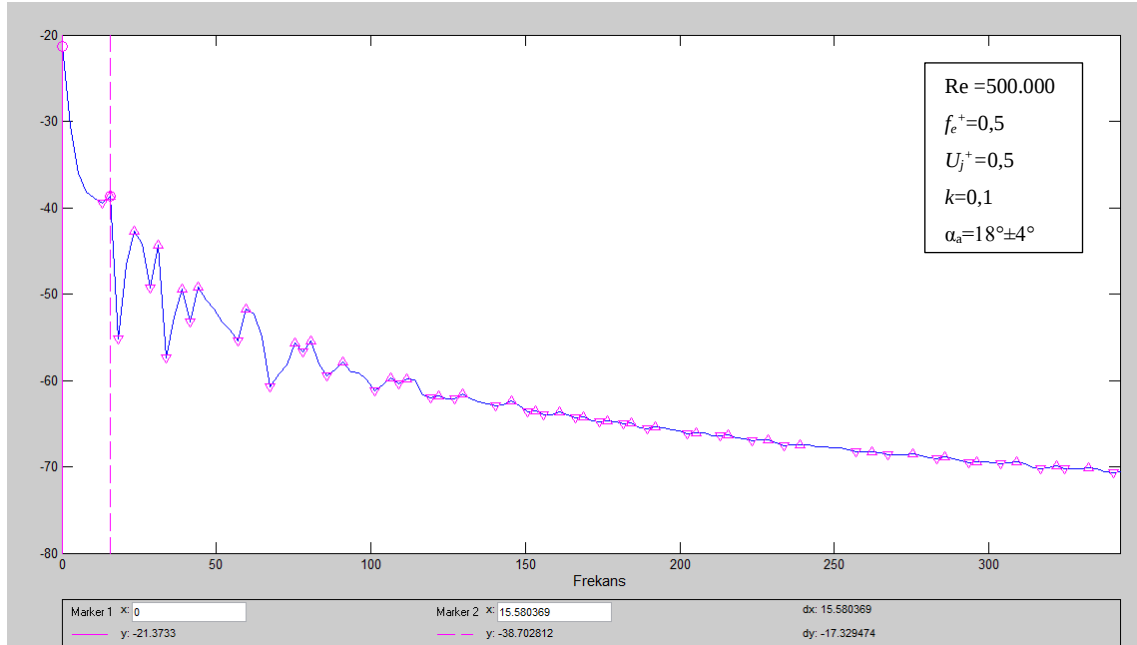
Çizelge 6.19 Fourier dönüşümü yapılan analizlerin parametreleri

| No. | P1 | P2 | P3 | $f_e^+$ | $f_e$ (Hz) | $U_j^+$ | $U_j$ (m/s) | $k$  | $f_a$ (Hz) |
|-----|----|----|----|---------|------------|---------|-------------|------|------------|
| 1   | 1  | 1  | 1  | 0,5     | 15,58      | 0,5     | 9,74        | 0,1  | 10,39      |
| 9   | 2  | 4  | 5  | 1       | 31,16      | 4       | 77,90       | 0,15 | 15,58      |
| 14  | 3  | 4  | 1  | 1,5     | 46,74      | 4       | 77,90       | 0,1  | 10,39      |
| 18  | 4  | 3  | 1  | 2       | 62,32      | 2       | 38,95       | 0,1  | 10,39      |
| 21  | 5  | 1  | 5  | 3       | 93,48      | 0,5     | 9,74        | 0,15 | 15,58      |

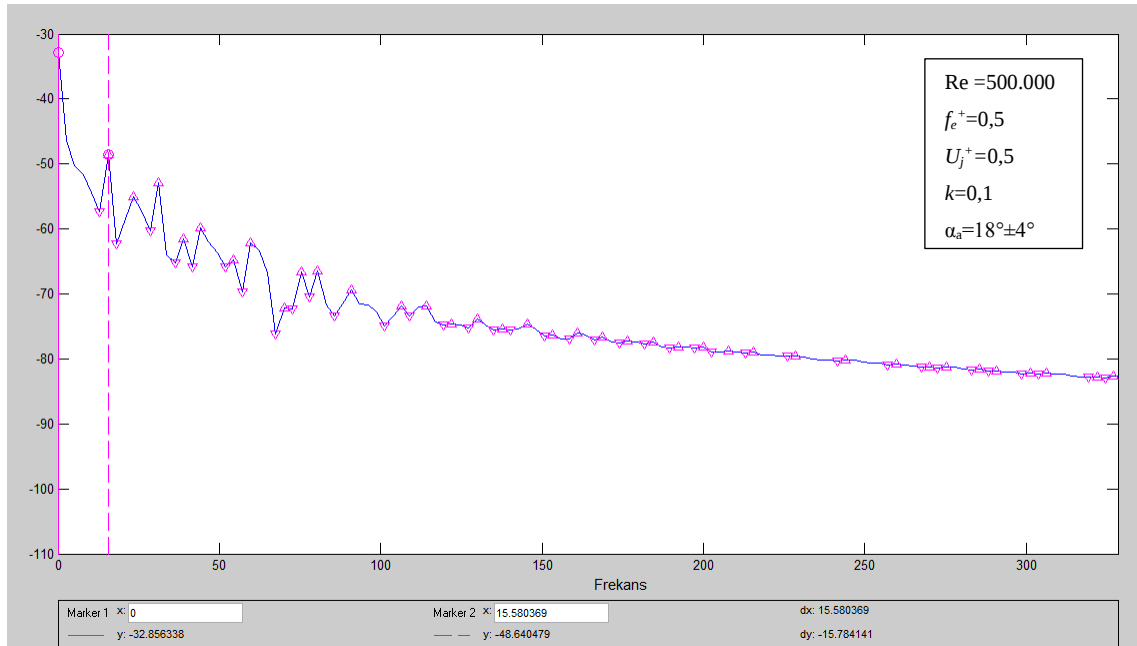
Analiz-1 de, jet hızı zayıf olduğu için, jet frekansı ve kanat salınımının ortak olduğu katlarda güçlü salınımlar görülmektedir. Bu değerler 30,60,90 ve 120 Hz. de gözlemlenmiştir. Analiz-1 de giriş yapılan parametreler ile kaldırma katsayısındaki titreşim tepkileri, Şekil 6.135. de gösterilmiştir. Bu duruma göre, jet ve salınım frekansının üst üste geldiği bölümlerde, titreşimlerde tepe noktaları oluşmuştur.



Şekil 6.135. Salınım hareketinde kaldırma katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği



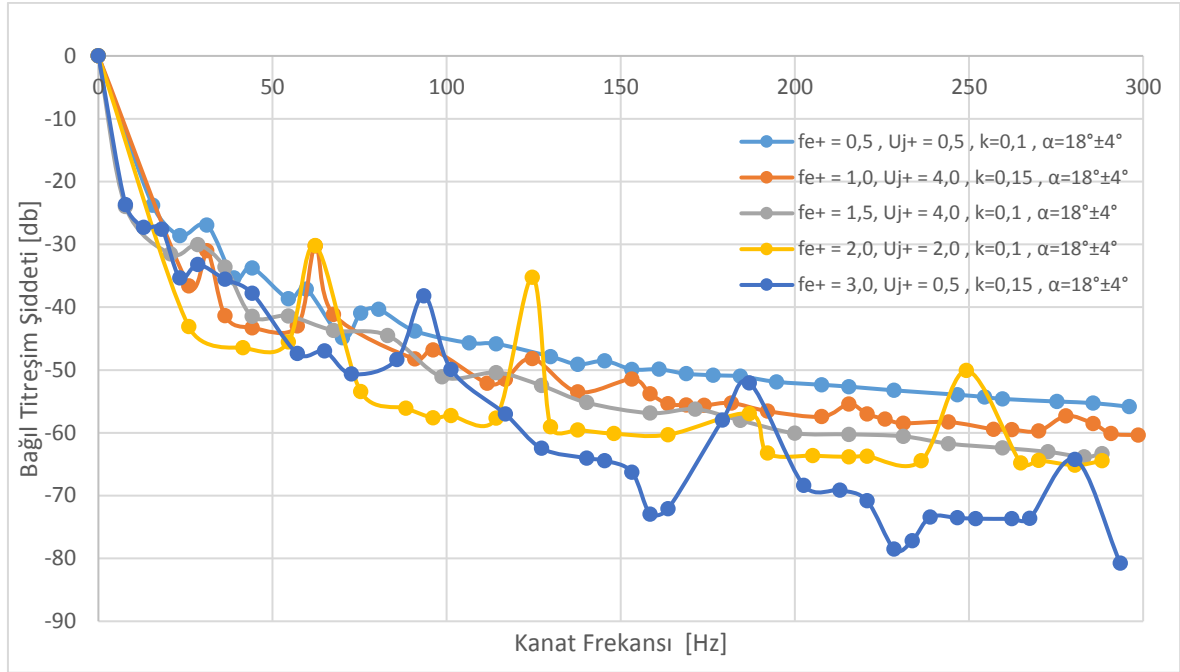
Şekil 6.136. Salınım hareketinde sürüklenme katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği



Şekil 6.137. Salınım hareketinde momentum katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği

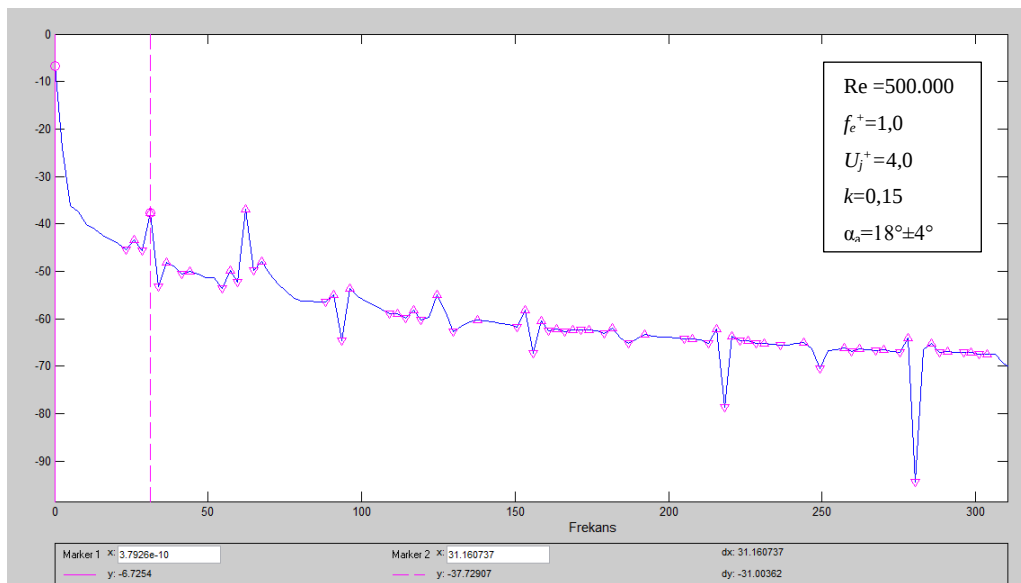
Analiz-14 de jet hızının yüksek olduğu ve jet frekansının kanat salınımının kat olmadığı durumda, titreşim zayıflamaktadır. Bu yüzden kuvvetli salınım görülmemektedir.

Analiz 9-18-21 de jet frekansı ve kanat salınım frekansları birbirinin katı olduğu durumda, jet hızı düşük olsa bile kanat üzerinde kuvvetli titreşimler görülür.

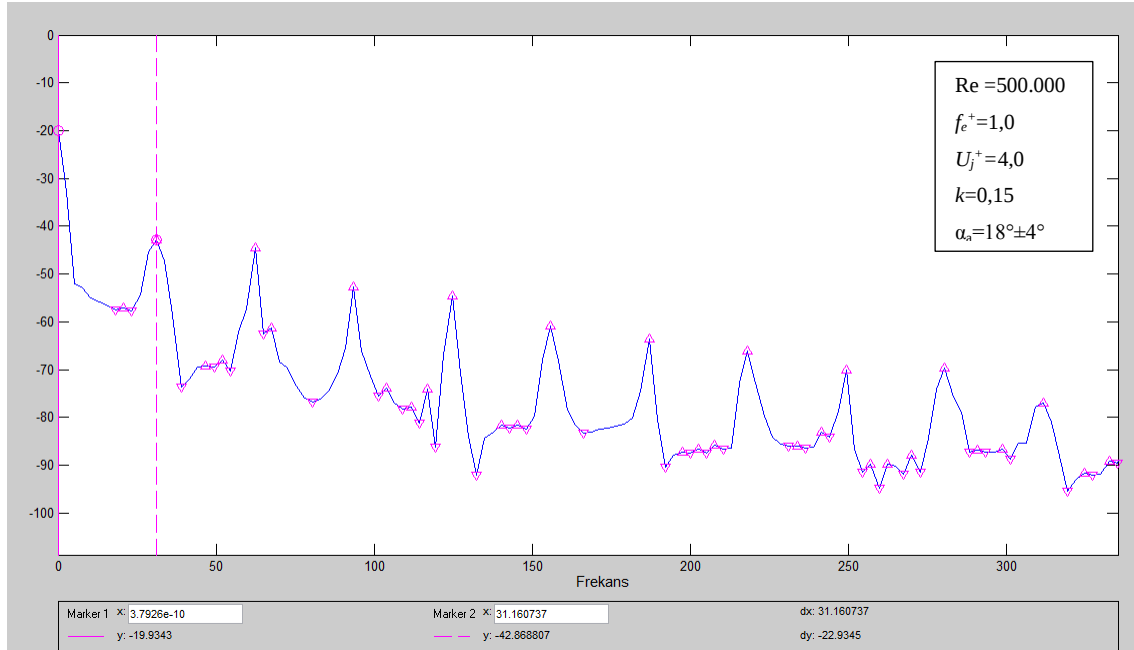


Şekil 6.138. Bağlı titreşim şiddeti karşılaştırma grafiği

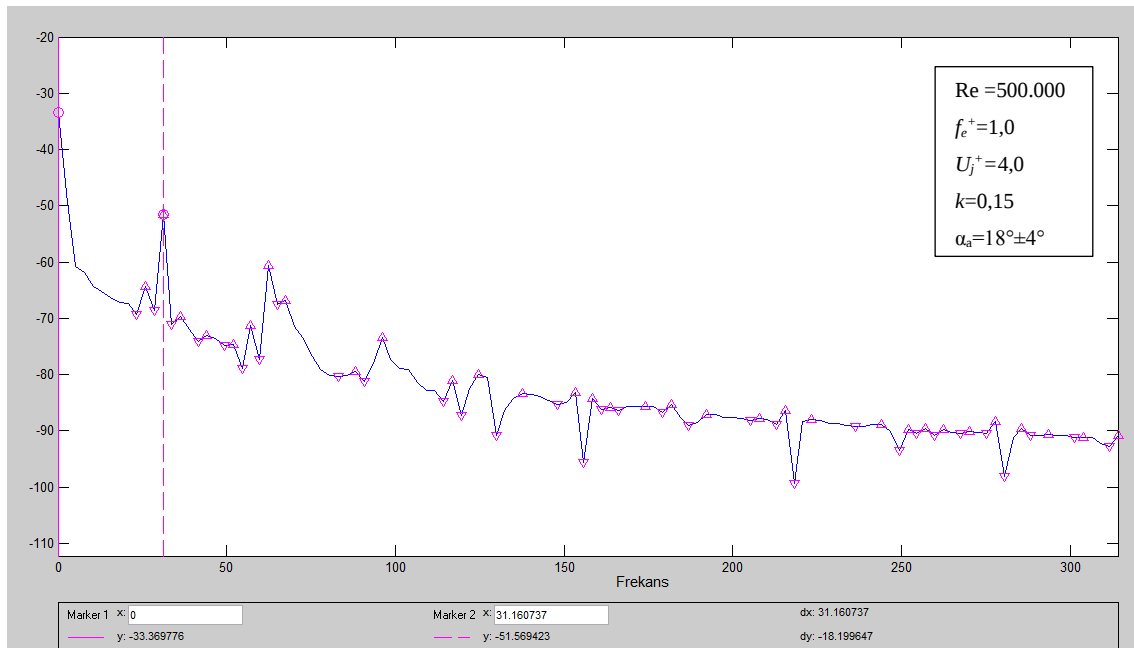
Jet frekansının kanat salınım frekansının katı olduğu durumda kuvvetli titreşimler görülmektedir. Jet frekansı ve kanat salınım frekansının birbirinin katı olmadığı durumlarda, titreşim şiddetleri zayıflamaktadır. Bu durumda, jet hızını yükseltmek titreşimleri sönümleyici etki göstermektedir. Tasarlanan jetlerde, titreşimin azaltmak için sentetik jet frekansının, kanat salınım frekansının katı olmamasına dikkat edilmelidir.



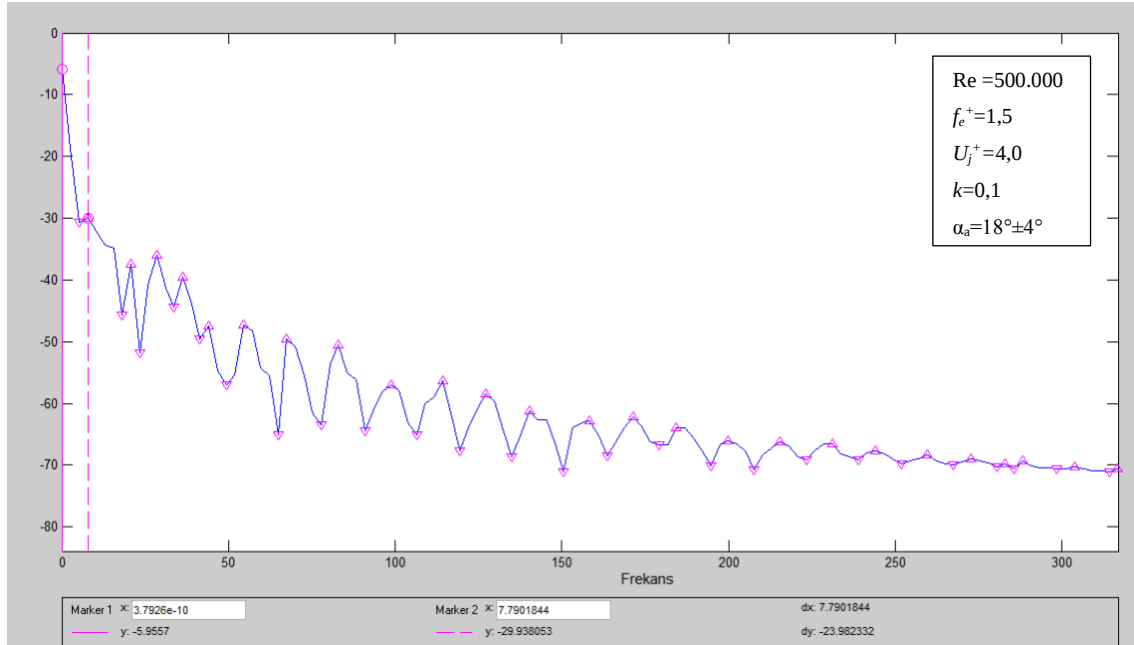
Şekil 6.139. Salınım hareketinde kaldırma katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği



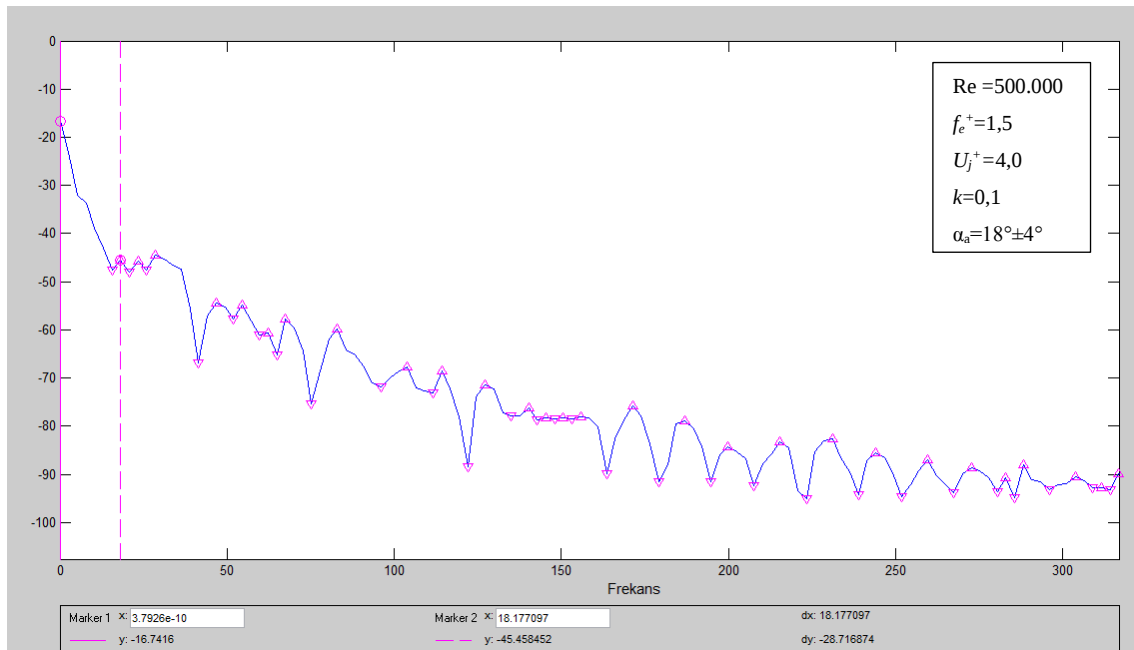
Şekil 6.140. Salınım hareketinde sürüklenme katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği



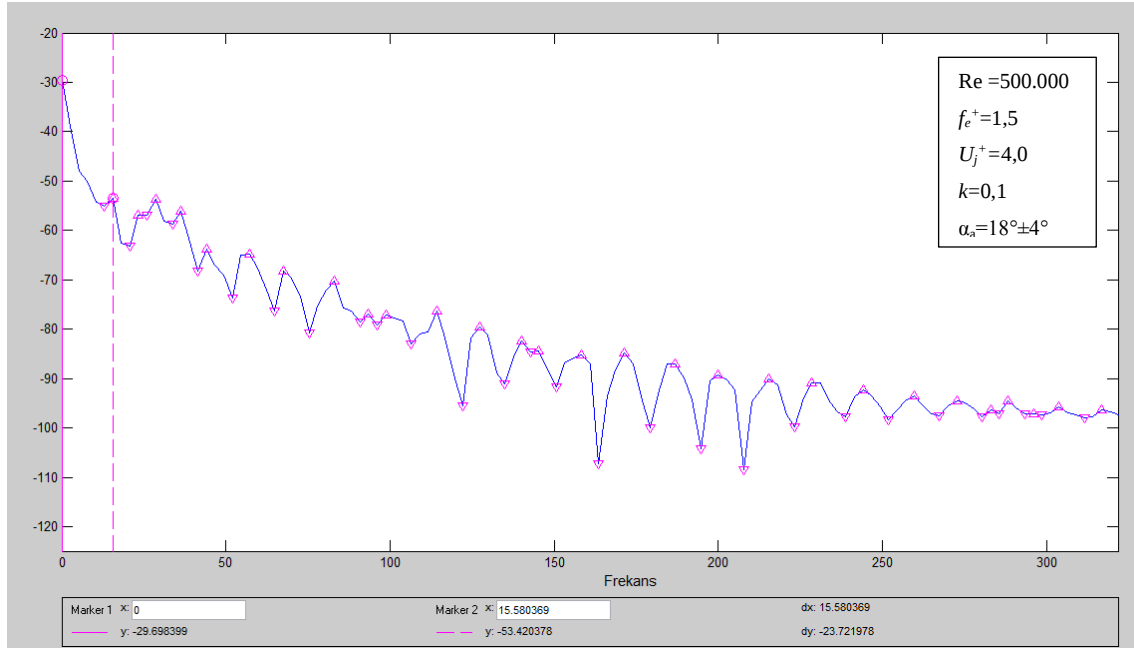
Şekil 6.141. Salınım hareketinde momentum katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği



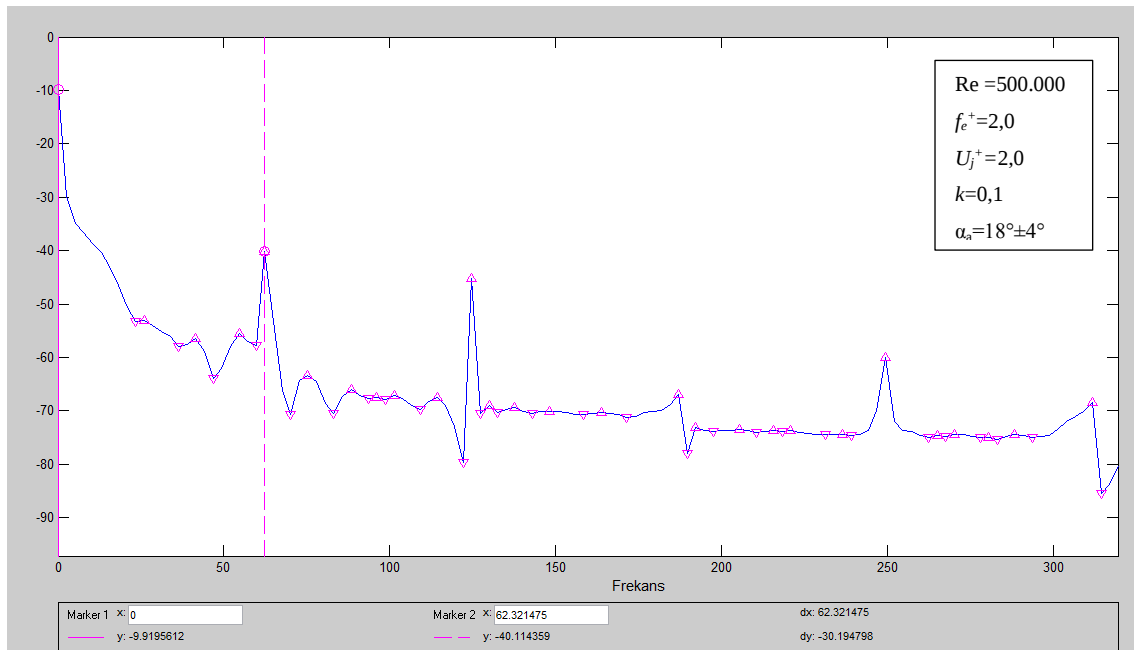
Şekil 6.142. Salınım hareketinde kaldırma katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği



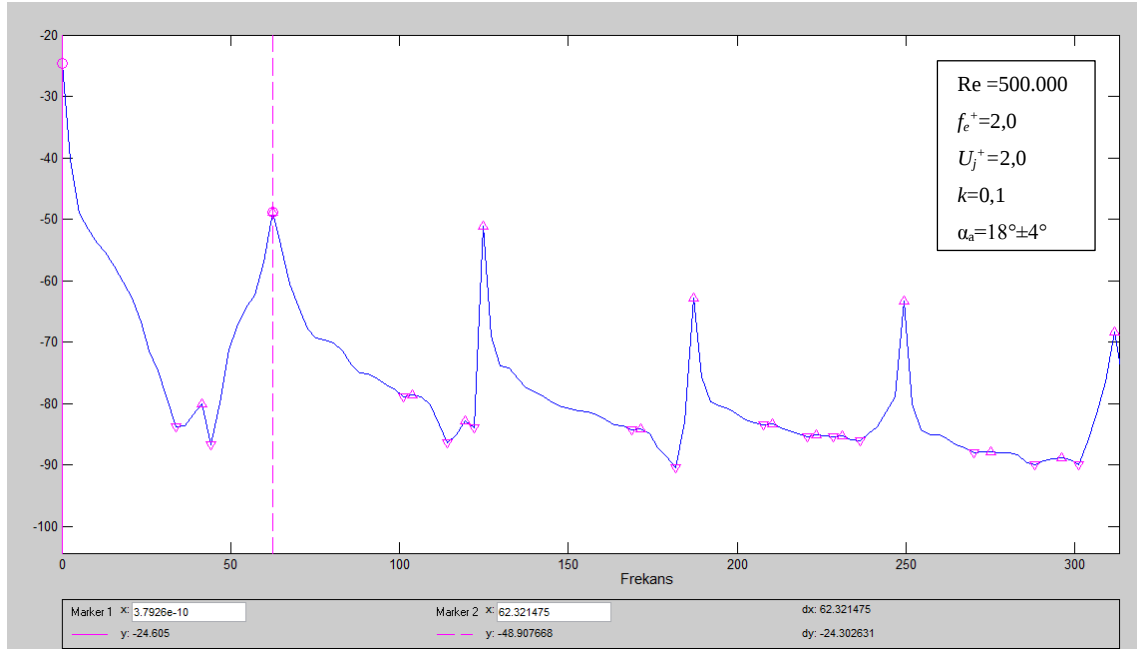
Şekil 6.143. Salınım hareketinde sürüklenme katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği



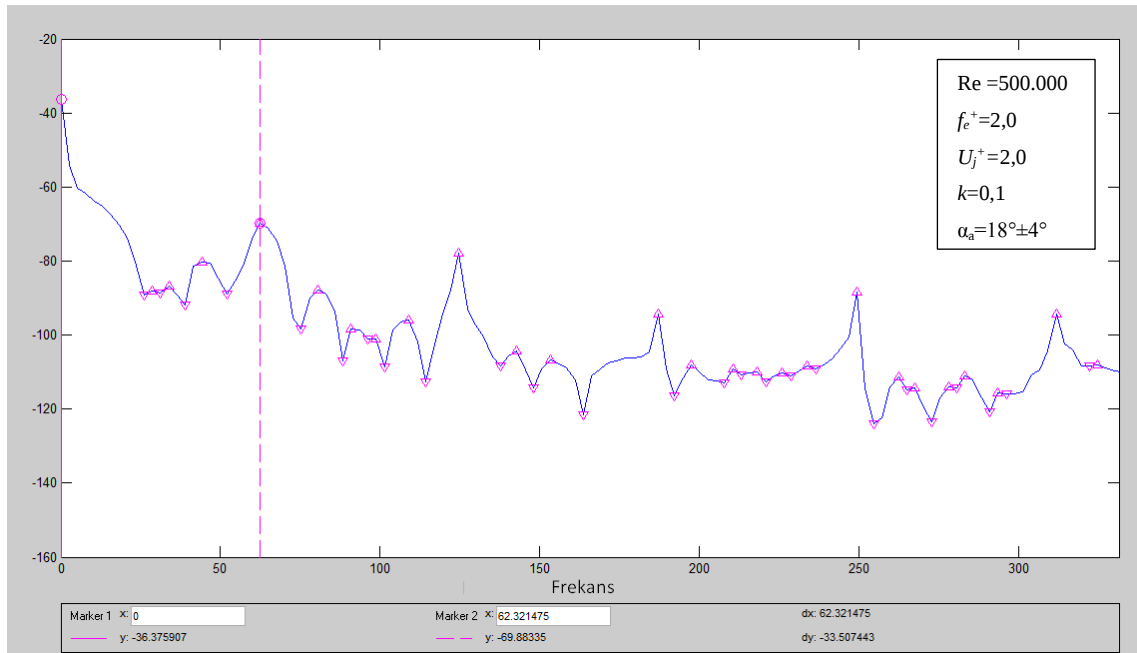
Şekil 6.144. Salınım hareketinde sürüklenme katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği



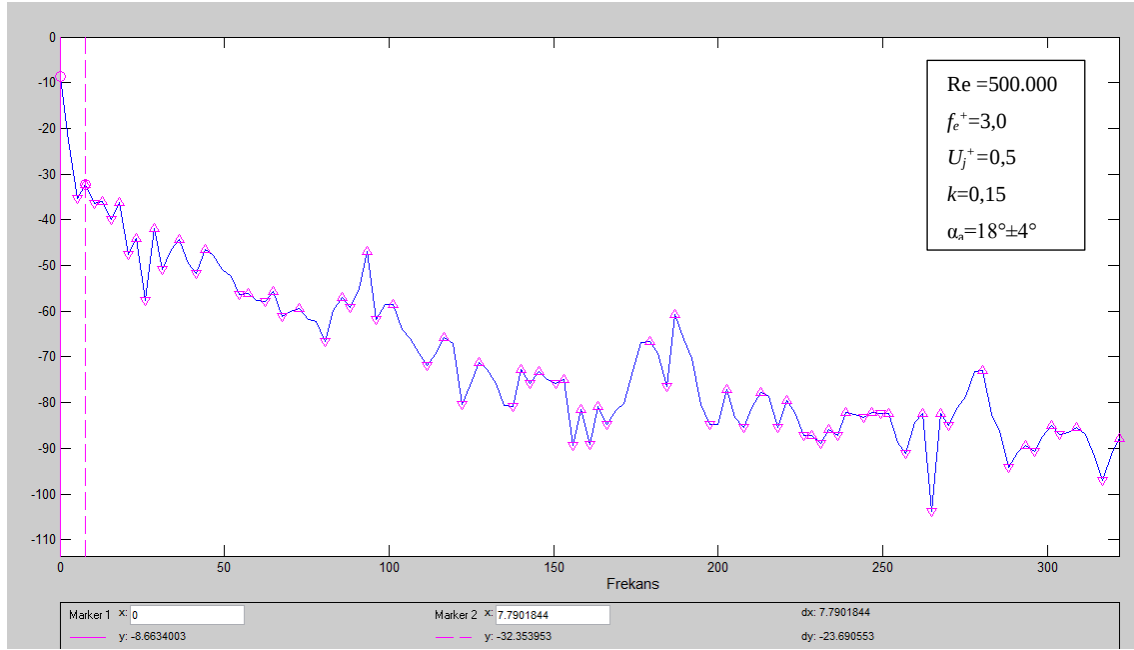
Şekil 6.145. Salınım hareketinde kaldırma katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği



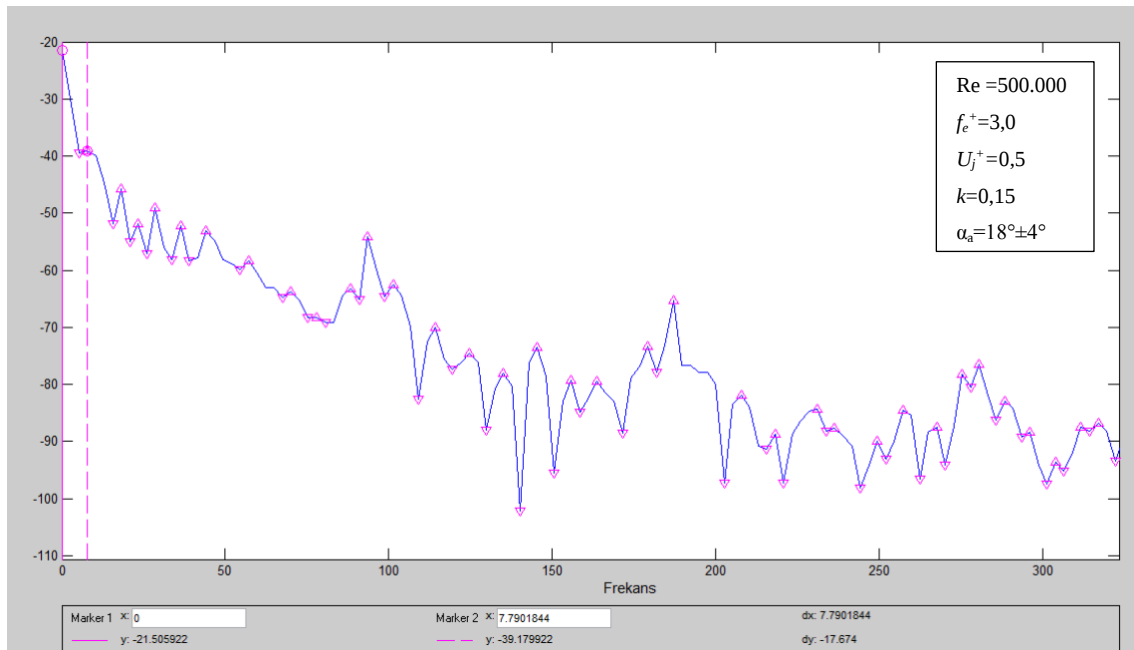
Şekil 6.146. Salınım hareketinde sürüklenme katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği



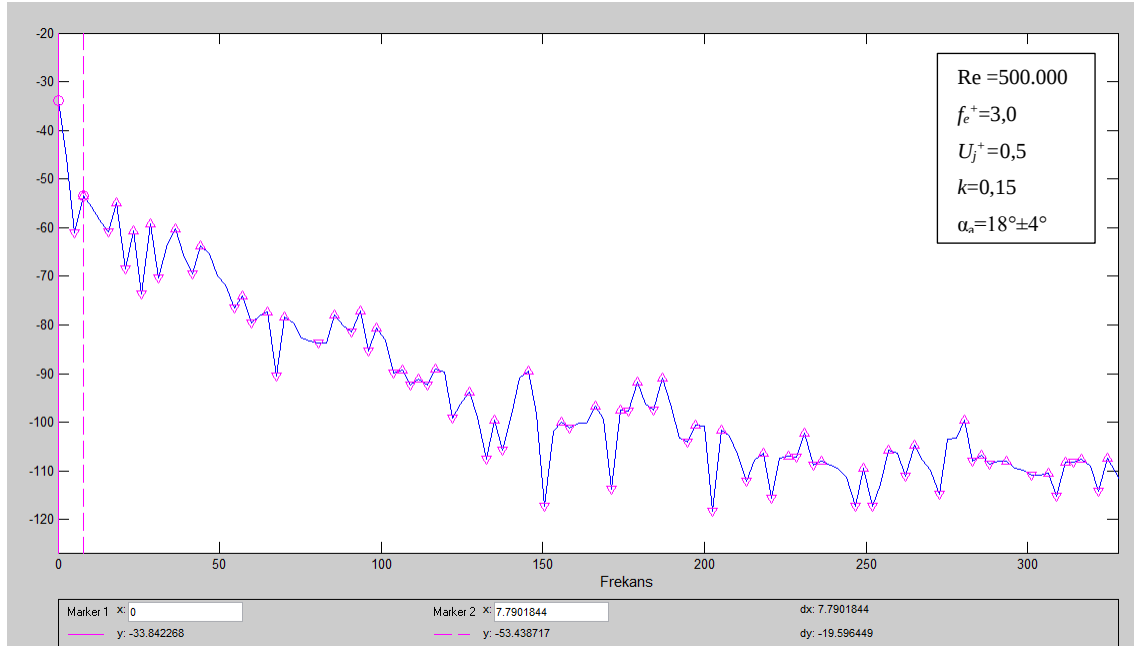
Şekil 6.147 Salınım hareketinde momentum katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği



Şekil 6.148. Salınım hareketinde kaldırma katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği



Şekil 6.149. Salınım hareketinde sürüklenme katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği



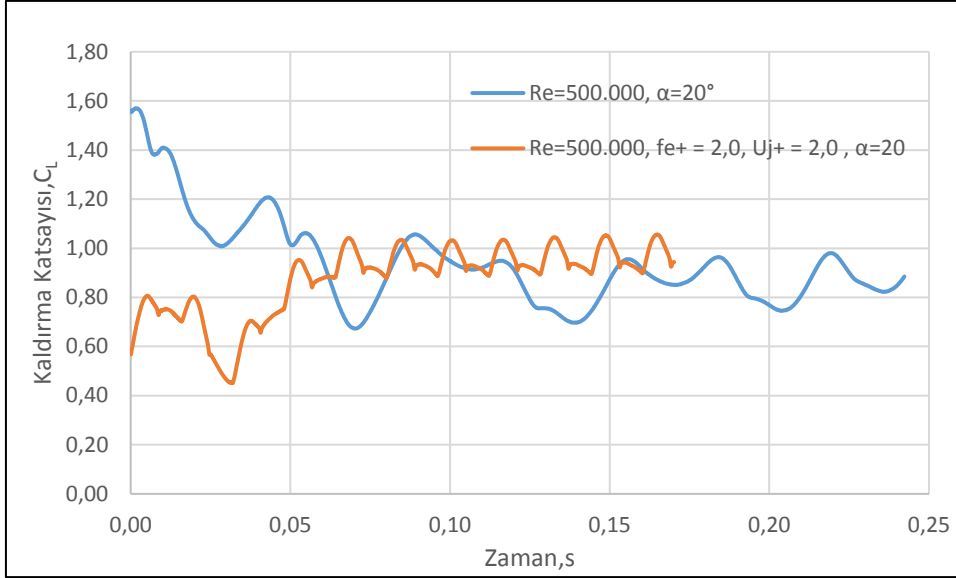
Şekil 6.150. Salınım hareketinde momentum katsayısı FFT spektrum tahmin grafiği

## 6.5. Diğer İncelenen Durumlar

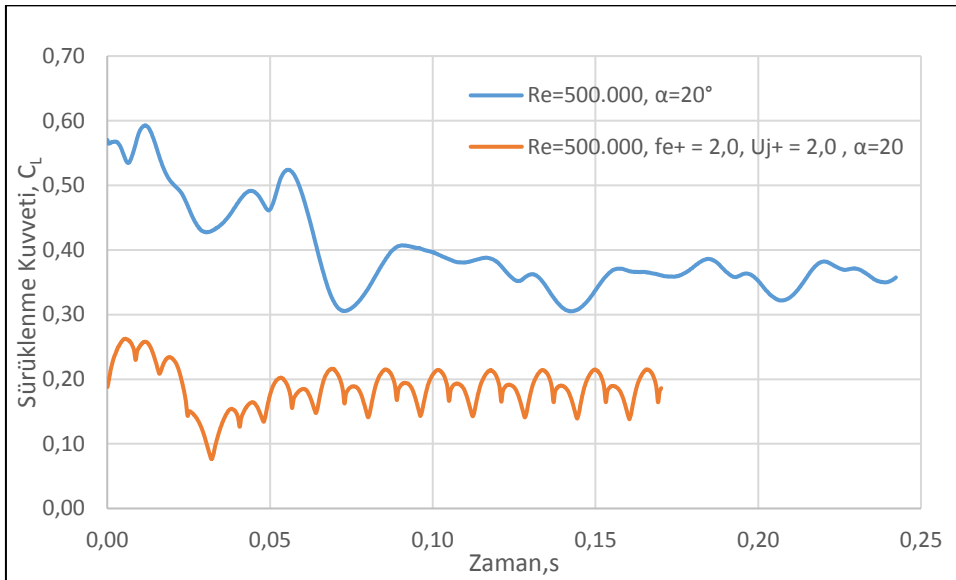
### 6.5.1. Sabit hücum açısında sentetik jet uygulaması

Sentetik jet eksinin kanat üzerindeki aerodinamik kuvvetlerde etkilerinin görülmesi amacıyla  $20^\circ$  hücum açısında sentetik jetli ve jetsiz olarak analizler gerçekleştirilmiştir. Sentetik jet kaldırma katsayısının dalgalanmalarının genliğini düşürmüş, dalgalanma frekansını artırmıştır. Aynı etki sürtünme katsayısında da görülmektedir. Ortalama kaldırma katsayısı yaklaşık 0,85 değerlerinden 0,95 değerlerine artış sağlanmıştır. Ortalama sürüklenme katsayısında, yaklaşık 0,35 değerlerinden 0,18 değerlerine düşüş sağlanarak sentetik jet kullanımı ile performans artışı görülmüştür.

Sentetik jet oluşan girdapları kırmakta ve akışın yüzeyden kopmasını engellemektedir. Daha kararlı bir kaldırma ve sürüklenme kuvveti ile istenilen aerodinamik verim daha stabil bir değerde sağlanmaktadır.



Şekil 6.151. Hücüm açısı 20° için kaldırma katsayısı karşılaştırmaları

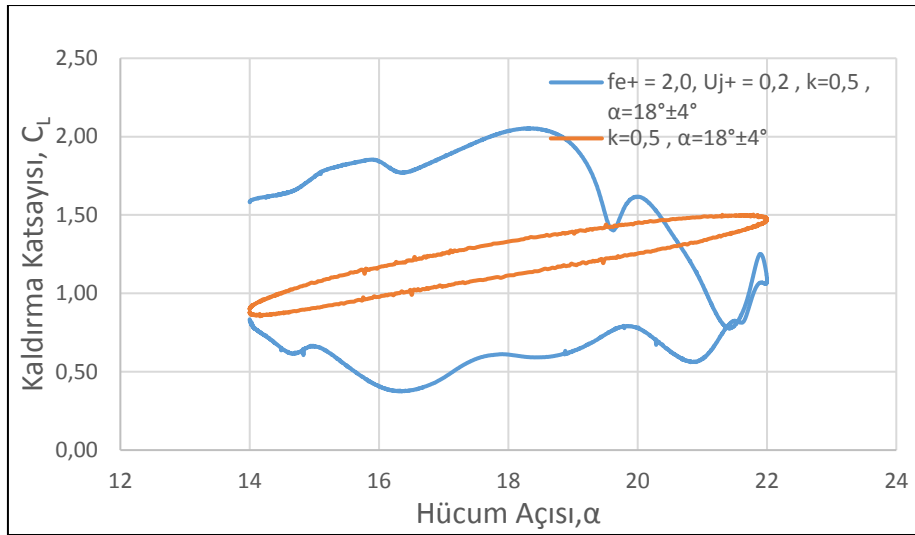


Şekil 6.152. Hücüm açısı 20° için sürüklenme katsayısı karşılaştırmaları

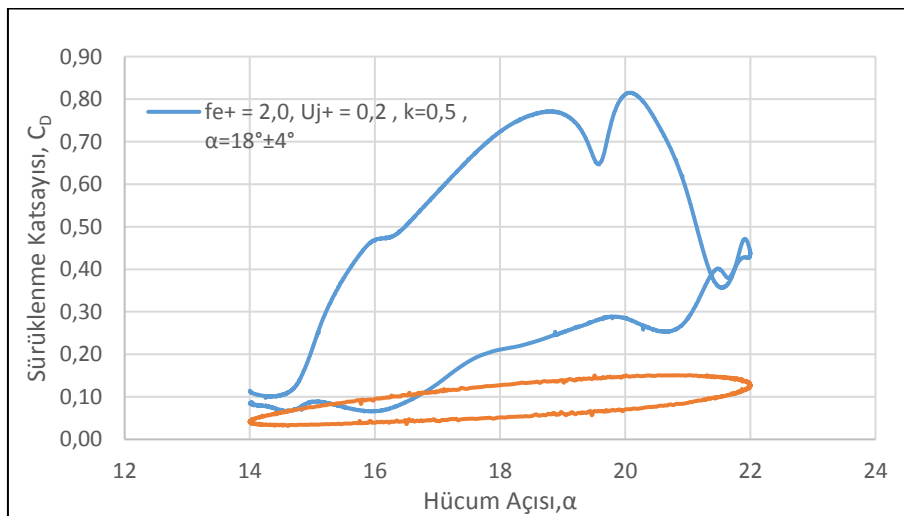
### 6.5.2. Salınlı kanatta sentetik jet etkileri

Farklı salınım frekanslarında yapılan analizlerde, kanat salınımının artması ile kaldırma katsayılarında artışlar görülmektedir. Düşük kanat salınım frekanslarında, kanat üzerindeki kaldırma kuvvetindeki dalgalanmalar zayıflamaktadır. Ancak kanat performansında düşüş görülmektedir.

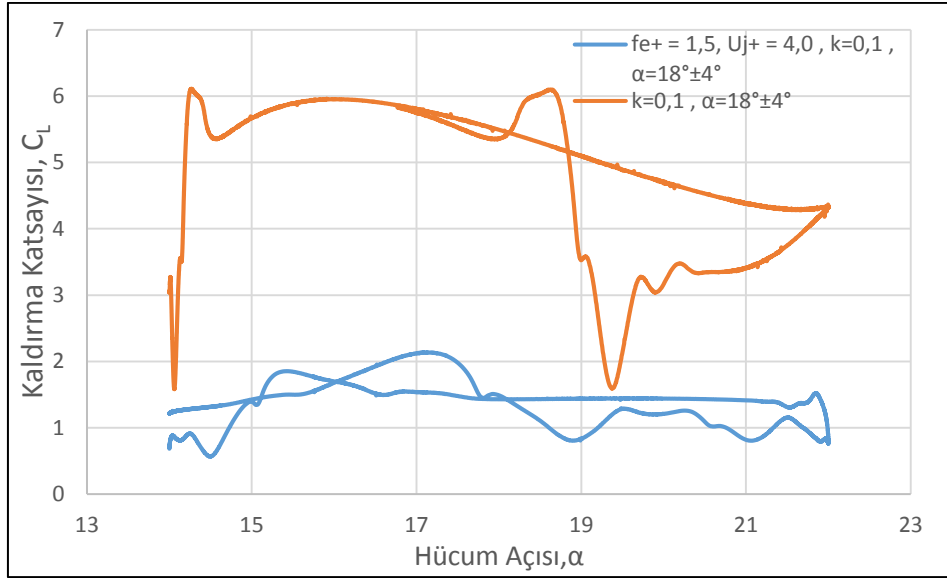
Yüksek frekanslarda sentetik jet, kanat üzerindeki akışı bozucu etki yaratmaktadır. Daha yüksek, kaldırma katsayıları elde edilir fakat sürüklenme kuvvetinde görülen artışlar sebebiyle, kanat performansında düşüşler görülür.  $20^\circ$  sabit hücum açısında yapılan sentetik jetli ve jetsiz durumlar karşılaştırıldığında, jetli kanat yapısının kaldırma katsayısının arttığı ve sürüklenme katsayısının düştüğü görülmektedir. Akış ayrılmasının, kanat salınımı tarafından engellenmediği durumlarda, sentetik jet kanat üzerindeki akışı etkileyerek performansı düşürmektedir. Bu durumda, kopmaların olduğu daha yüksek hücum açılarında, salınım etkisi ile kopan akışın toparlanmasındaki sentetik jet etkisi görülmesi için üç boyutlu analizlerin incelenmesi gerekmektedir.



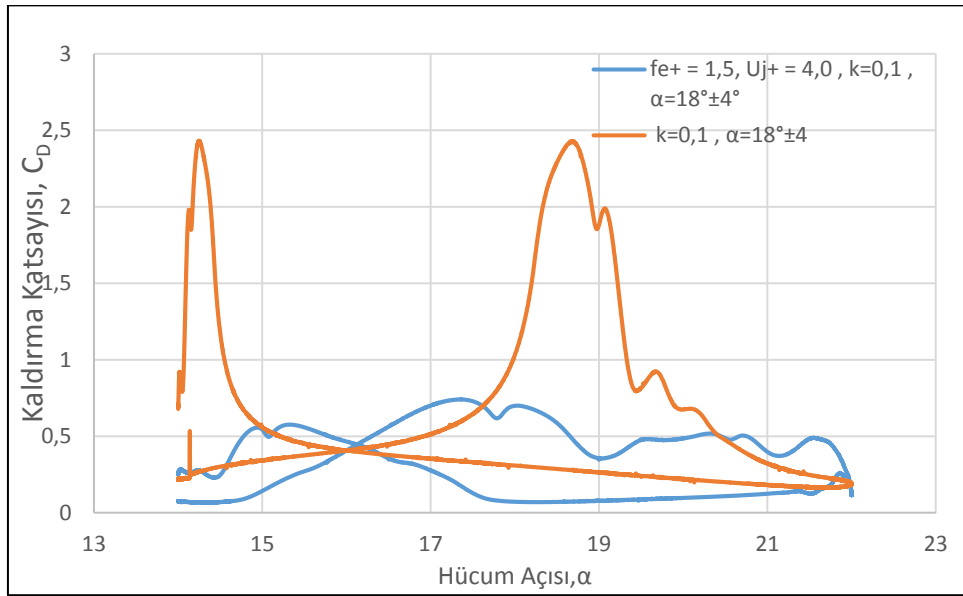
Şekil 6.153. Salınlı kanatta kaldırma katsayıları karşılaştırması



Şekil 6.154. Salınlı kanatta sürüklenme katsayıları karşılaştırması



Şekil 6.155. Salınlı kanatta kaldırma katsayıları karşılaştırması



Şekil 6.156. Salınlı kanatta sürüklenme katsayıları karşılaştırması

### 6.5.3. Reynolds sayısının sentetik jetli kanat aerodinamik katsayıları üzerine etkisi

Aynı sentetik jet ve kanat salınımı parametrelerinde gerçekleştirilen analizlerde Reynolds sayısının etkisinin incelenmesi için, 500.000 ve 1.000.000 Reynolds sayılarında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, boyutsuz jet frekansı, boyutsuz jet hızı değerleri sabitlenmiştir. Ancak, serbest akış hızına bağlı olan boyutsuz jet frekansı için gerçek değer

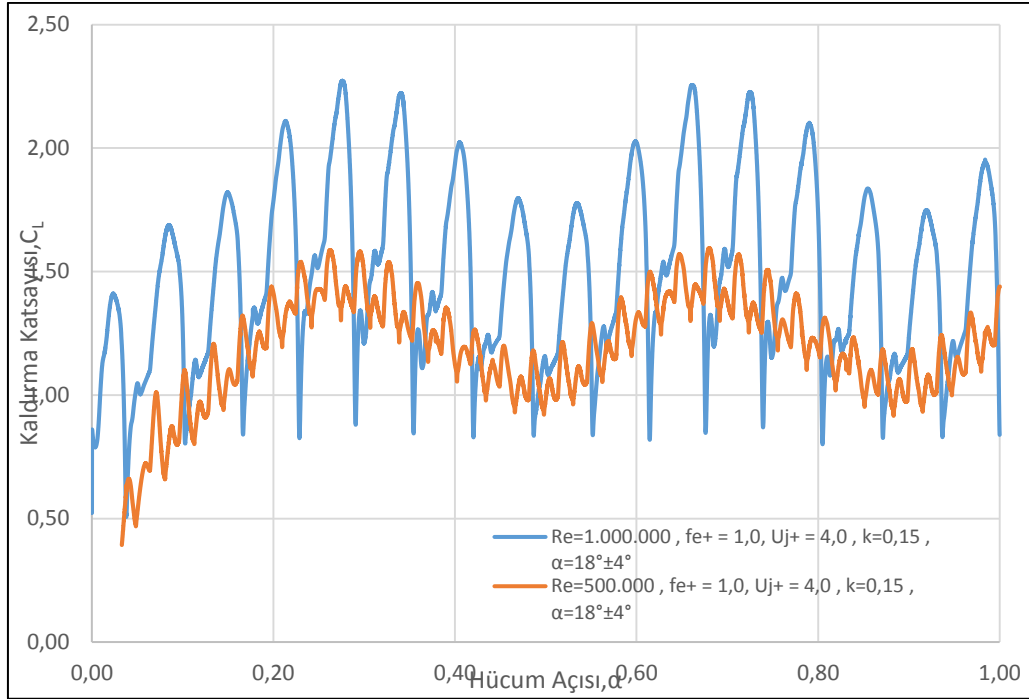
için iki katı oranına yükseltilmiştir. Strouhal sayısına bağlı olan jet frekansı ise yarısına indirilerek, aynı boyutsuz değerlerde analizler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.20. de Analizlerde kullanılan parametre değerleri ve sonuçlarda alınan kaldırma katsayısı, sürüklenme katsayısı ve momentum katsayısı değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 6.20. Reynolds sayısı karşılaştırma analizleri katsayı sonuçları

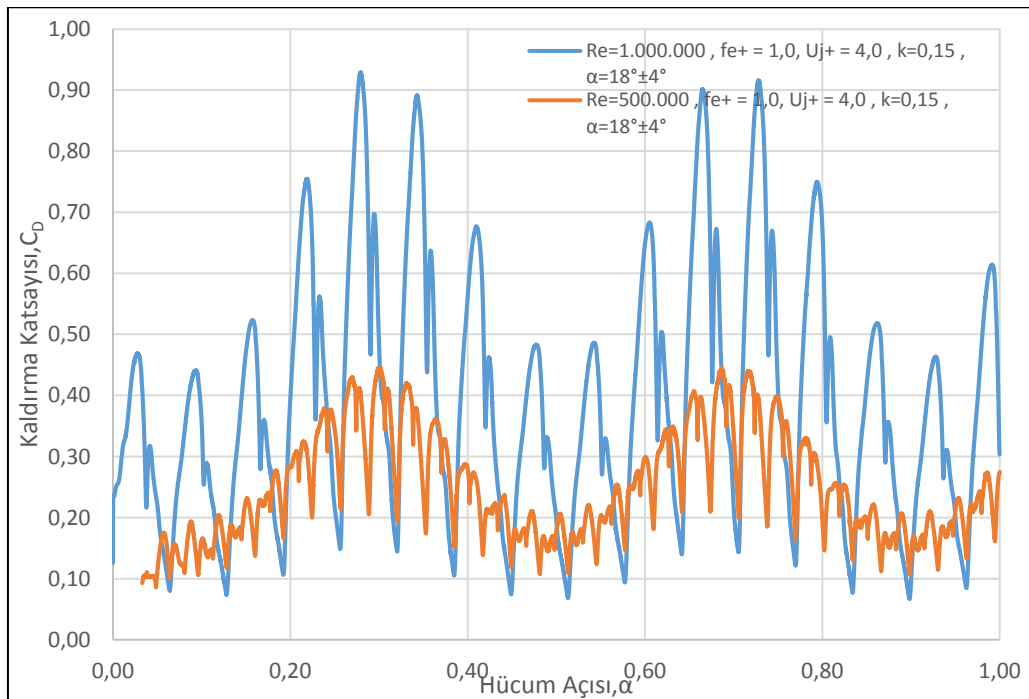
| Parametreler |         |         |      | Salınım hareket katsayıları |       |           |       |
|--------------|---------|---------|------|-----------------------------|-------|-----------|-------|
| Re           | $f_e^+$ | $U_j^+$ | $k$  | $C_L$                       | $C_D$ | $C_L/C_D$ | $C_M$ |
| 500.000      | 1,0     | 4,0     | 0,15 | 1,20                        | 0,25  | 4,83      | 0,056 |
| 1.000.000    | 1,0     | 4,0     | 0,15 | 1,49                        | 0,39  | 3,78      | 0,372 |

Şekil 6.157. de farklı Reynolds sayılarında gerçekleştirilen analizlerin kaldırma katsayı grafikleri görülmektedir. Bu analizlerde serbest akış hızının 1.000.000 Reynolds sayısı değerine çıkması ile birlikte kaldırma katsayısında artış görülmektedir. Sadece serbest akış hızı değil jetin de gerçek hızının artması kaldırma katsayısının minimum ve maksimum değerleri arasındaki farklı artırmıştır. Analiz sonuçlarında 1,20 değerinden 1,49 değerine artış sağlanmıştır. Analizlerdeki kanat salınım sabit kalmasının etkisi, değerlerin aynı frekans salınımı takip ettiği görülmektedir.



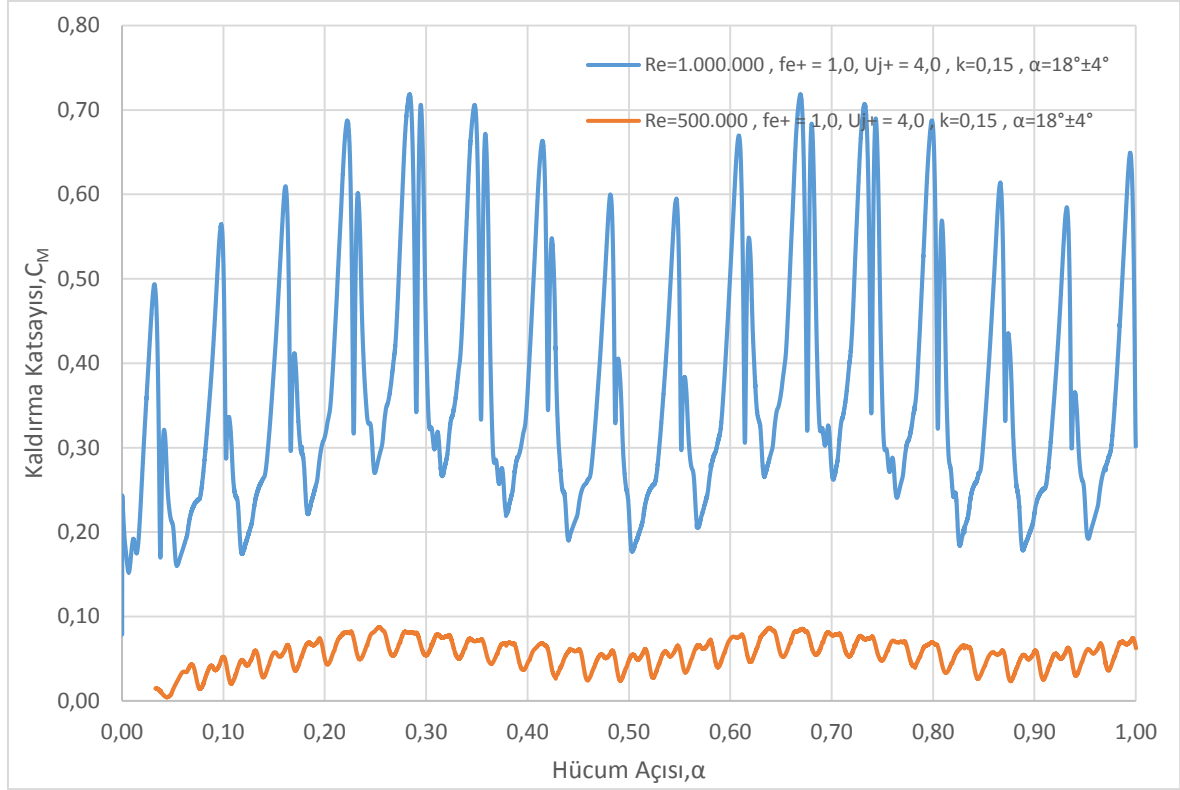
Şekil 6.157. Farklı Reynolds sayılarında kaldırma katsayılarının karşılaştırılması

Şekil 6.158. de sürüklenme katsayılarının karşılaştırma grafikleri görülmektedir. Kaldırma katsayısında elde edilen artıştan daha fazla oranda sürüklenme katsayısı oluşmuştur. Bu durumda, kaldırma-sürüklenme katsayısında düşüş görülmüştür.



Şekil 6.158. Farklı Reynolds sayılarında sürüklenme katsayılarının karşılaştırılması

Şekil 6.159. da Reynolds sayısının artırılması ile momentum katsayısında oluşan değişim grafikte gösterilmiştir. Serbest akış hızının artması ile birlikte kanat üzerinde oluşan momentum katsayısının arttığı görülmektedir. Kanat dengesinin sağlanması daha fazla bir kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 6.159. Farklı Reynolds sayılarında momentum katsayılarının karşılaştırılması

## 7. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, insansız hava araçlarının uçuş hız aralıkları dikkate alınarak,  $5 \times 10^5$  Reynolds sayısında 0,1-1,0 salınım uygulanan sentetik jet NACA 0012 kanat profilinin aerodinamik katsayıları incelenmiştir. Akış çözümleri zamana bağlı olarak elde edilmiş olup analizlerde türbülans modeli olarak k- $\omega$  SST kullanılmıştır. Analiz sonuçları kullanılarak kaldırma ve sürüklenme katsayıları ile momentum katsayısı, salınlı ve salınımsız kanat ile sentetik jetin kullanıldığı salınlı ve salınımsız kanatlar için elde edilmiş ve karşılaştırmalı olarak sunulmuşlardır. Sentetik jet frekansı ile kanat salınım frekansı etkisi altında oluşan aerodinamik akış, FFT çözümlemesi yapılarak titreşim analizi gerçekleştirilmiştir.

Jet etkilerinin doğrulanması için analiz sonuçları literatürde mevcut bulunan veriler ile karşılaştırılmıştır. Serbest akış alanında, serbest akış hızı ve sentetik jet hızı sınır şartları olarak tanımlanmıştır. Analizler, 2-Boyutlu olarak basınç tabanlı Navier-Stokes denklemleri kullanılarak O-tipi çözüm alanında zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Jet salınım genliği ve frekansı, modele UDF aracılığı ile tanıtılmıştır. Sonuçların yakınsamasına yönelik olarak zaman adımı ve ağ yapısı üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır.

İlk olarak kararlı durumda başlatılan analiz şartları, akışın çözüm alanında gelişmesinden sonra, zaman tipi ‘zamana bağlı’ seçilmiş ve k- $\omega$  SST tipi türbülans modeli ile çözümlemeler yapılmıştır. Model sonuçlarının doğrulanması amacıyla, salınımsız, salınlı ve salınımsız jetli 3 farklı durum için elde edilen analiz sonuçları literatürde mevcut olan deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Salınımsız kanat üzerindeki akış modelinin doğrulanmasına yönelik olarak literatürde mevcut bulunan deneysel çalışma sonuçları ile yapılan karşılaştırma sonucunda,  $0^\circ$  hücum açısı için elde edilen sürüklenme katsayısının 200.000 ila 500.000 Reynolds aralığında deneysel sonuçlardan % 4 ile % 14 arasında farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu aralık dışında deneysel sonuçlardan sapmanın % 1’den daha az olduğu belirlenmiştir.

Salınlı kanat üzerindeki akış modelinin doğrulanmasına yönelik olarak literatürde mevcut bulunan sayısal çalışma sonuçları ile yapılan karşılaştırma sonucunda, sürüklenme

katsayısının literatürdeki sayısal sonuçlardan minimum % 1 ve maksimum %8 farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Salınımsız jetli kanat üzerindeki akış modelinin doğrulanmasına yönelik olarak literatürde mevcut bulunan sayısal çalışma sonuçları ile yapılan karşılaştırma sonucunda, kaldırma katsayısının literatürdeki sayısal sonuçlardan minimum % 2 ile maksimum % 8, sürüklenme katsayısının ise literatürdeki sayısal sonuçlardan minimum % 2 ile maksimum % 14 farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında salınımsız jetli kanat üzerindeki akış modelinin doğrulanması yapılmıştır.

Salınım yapan kanatların özet olarak ortaya çıkardığı durumlar şöyledir: Kanat salınımı, ön uç vorteksin başlangıç hücum açısını geciktirir, vortisiteyi güçlendirir, girdap yıkımının oluşumunu erteler, kitlesel olarak ayrılmış akışları zayıflatır ve kanadın aerodinamik performansını artırır. İndirgenmiş salınım frekansının akış üzerin etkisi, iki kritik indirgenmiş frekansla üç aşamaya ayrılabilir. İlk aşamada, histerezis hızla artar ve  $C_{Lmax}$  doğrusal olarak artar. Son aşamada, histerezis önemli ölçüde değişmez, yunuslama hareketi ve reaksiyon akışları arasındaki faz gecikmesi sabit kalır ve hem  $C_{Lmax}$  hem de birinci dereceden faz gecikmesi sabit bir değere doğru yakınsar.

Sentetik jet mekanizması kararlılığın korunması açısından moment katsayılarını etkilemektedir. Jet parametrelerinin etkisi değerlendirildiğinde, yüksek boyutsuz jet hızları kanat profili stabilitesini daha yüksek hücum açılara genişletmektedir. Daha yüksek boyutsuz jet frekansları moment katsayısındaki dalgalanmayı engellese de hücum açısını artırmamaktadır.

Kanat salınım frekansı arttıkça kritik maksimum aerodinamik katsayılarda artış görülür. Ancak, orantısız değişen sürüklenme katsayısı 0,5-1,0 aralığında artarak toplam verime olumsuz olarak etki etmektedir.

Jet mekanizması parametrelerinden jet hızının (genlik) aerodinamik verim artışında önemli bir etkisi vardır. Yapılan analizlerde, boyutsuz jet hızının 2,0 değerine kadar kanat verimi üzerine olumlu etkisi olmakta ve kanat verimini artırmaktadır. Boyutsuz jet hızının 2,0-4,0 aralığında, kanat verimine olan etkisi azalmakta ve salınım frekansının baskısı altında kalarak kanat verimine daha az bir etki yaratmaktadır. Jet frekansının düşük olduğu

değerlerde (0,5-1,0), jet hızı da etkisiz kalabilmektedir. Bu durumda, salınlı kanat için kanat verimini artırmaya yönelik olarak jet frekansının 1 değerinden büyük seçilmesi ve boyutsuz jet hızının ise 2 değeri civarında alınması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Salınlı jetli kanat üzerindeki akış durumu için jet genliği arttıkça jet frekansının kanat verimine etkisi artmaktadır. Jet hızı, jet frekansı ve kanat salınım frekansının kanat verimine olan etkisi karşılaştırıldığında, jet frekansının diğer parametrelere göre daha az etkili olduğu söylenebilir. Ancak çok düşük frekans değerleri için, diğer parametrelerin de etkisinin azaldığı görülmektedir. 2,0 değerlerine ulaşan jet genliği için, jet frekansı 1 değerinden büyük olduğu durumda olumlu etki yaparak verimi artırır. Jet frekansının 1 değerinden büyük olduğu durumlarda, salınlı kanat uygulamasında özellikle yukarı hareket halinde verime katkı sağladığı, aşağı salınım durumunda ise olumsuz etki gösterdiği görülmektedir. Dolayısıyla, yukarı salınım durumunda, jet frekansının 1 değerinden büyük, aşağı salınım durumunda ise 1 değerinden küçük seçilmesi tavsiye edilir.

Gelecek çalışmalarda, farklı jet konumlarının etkileri, üç boyutlu kanat üzerinde jet yerleşimlerinin etkileri, daha yüksek Reynolds sayıları için analizler yapılması faydalı olacağı kanaatindeyim. Yüksek hücum açılarında sentetik jetli kanat üzerindeki akışın verime olan etkisi incelenmesi gereken konu başlıkları arasındadır. Uçağın iniş ve kalkış durumlarında, sentetik jetli kanat üzerindeki akış ile yer etkilerinin incelenmesi gelecekte yapılması planlanan analizler arasına alınmalıdır. Flapsiz jetli kanat tasarımlarının kanat üzerindeki akışa etkisi incelenebilir.



## KAYNAKLAR

1. Kitsios, V. (2006). *Numerical simulation of lift enhancement on a NACA 0015 airfoil using ZNMF jets*. Center for Turbulence Research Proceedings of the Summer Program.
2. Gad-el-Hak, M. (1996). Modern Developments In Flow Control. *Applied Mechanics Review*. 49(7), 365-379.
3. Boukenkoul, M.A. (2017). An 2D Simulation of the Flow Separation Control over a NACA0015 Airfoil Using a Synthetic Jet Actuator. IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering*. 187, 76-87.
4. Internet: VAWT için Sandia SAND80-2114 raporlamaları. URL: [www.airfoiltools.com](http://www.airfoiltools.com). Son Erişim Tarihi: 16.06.2019
5. Medina, A., Thiago, P. S. (2014). *A Study of the Flow Over an Oscillating Naca0012 Airfoil*. VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica Conference.
6. Tamurello, David A. (2008). Active control of a free jet using a synthetic jet. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 29, 967–984.
7. LiQun, MA. (2013). Experimental investigation on control of vortex shedding mode of a circular cylinder using synthetic jets placed at stagnation points. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*. 56(1), 158–170.
8. Akçayöz, Eray. (2009) *Numerical Investigation of Flow Control Over an Airfoil with Synthetic Jets and Its Optimization*, Msc by Research. Middle East Technical University, 75-86.
9. Haider, B. A. (2010). Aerodynamic Stall Control of a Generic Airfoil using Synthetic Jet Actuator. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*. 4(9), 788-793.
10. McVeigh, M. A. (2011). Full-Scale Flight Tests of Active Flow Control to Reduce Tiltrotor Aircraft Download. *Journal of Aircraft*. 48(3), 786-796.
11. Guoqing, Z. (2014). Parametric analyses for synthetic jet control on separation and stall over rotor airfoil. *Chinese Journal of Aeronautics*. 27(5), 1051–1061.
12. Luo, D. H. (2011). Flow control effectiveness of synthetic jet on a stalled airfoil. *Journal of the Mechanical Engineering Science*. 225(9), 2106-2114.
13. Türkoğlu S. (2019). *Wing Design and Structural Analysis of a Solar Unmanned Air Vehicle*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi. 4-5.
14. Xiaoping X. (2016). Analytical study on the synthetic jet control of asymmetric flow field of flying wing unmanned aerial vehicle. *Aerospace Science and Technology*. 56, 90–99.

15. Ziane, F. (2018). Numerical Analysis of the Wall Effect on Flow Around Airfoil Subjected to a Pitching Movement. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 43(3), 1061-1069.
16. Duvigneau, R. (2006). Optimization of a synthetic jet actuator for aerodynamic stall control. *Computers & Fluids*. 35(2006), 624–638.
17. Koopaee, M. K. (2014). Effect of flow regime change from subsonic to transonic on the air loads of an oscillating airfoil. *Journal of Fluids and Structures*. 50(2014), 312–328.
18. Gilarranz J. (2005). A New Class of Synthetic Jet Actuators—Part II: Application to Flow Separation Control. *Journal of Fluids Engineering*. 127(2), 377-387.
19. Parthasarathy, T. (2017). Effect of Synthetic Jet Parameters on Controlled Flow Over an Airfoil. *International Journal of Fluid Mechanics Research*. 44(5), 387–408.
20. Monir, H. E. (2014). Tangential Synthetic jets for separation control. *Journal of Fluids and Structures*. 45(1), 50–65.
21. Kim, S. H. (2009). Separation control on NACA23012 using synthetic jet. *Aerospace Science and Technology*. 13 (2009), 172–182.
22. Kang, Wei. (2015). Effects of local oscillation of airfoil surface on lift enhancement at low Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*. 57 (2015), 49–65.
23. Amitay, M. (2001). Aerodynamic Flow Control over an Unconventional Airfoil Using Synthetic Jet Actuators. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 39(3), 361-370.
24. Akçayöz, E. (2009). *Numerical Investigation of Flow Control Over an Airfoil Using Synthetic Jets and Its Optimization*. 5. Ankara International Aerospace Conference AiAc. 043. 17-19 August, 2009. METU, Ankara – Turkey.
25. Çiftçi, M. (2014). *Synthetic Jet Application on A Flapping Airfoil*, Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University. 19-20.
26. Cebeci, T. (2013). Boundary Layer Equations. *Analysis of turbulent flows with computer programs*. Oxford: Butterworth-Heinemann. 53-87.
27. Nemati, H. (2014). Numerical Study of Flow Over Annular-Finned Tube Heat Exchangers by Different Turbulent Models. *Nemati & Moghimi CFD Letters*. 6(3).
28. Menter, F. R. (1993). *Zonal Two Equation K- $\Omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows*. AIAA-93-2906. 24th AIAA Fluid Dynamics Conference.
29. Matsubara, Charlie. (2013). Comparison of the Effects of k- $\epsilon$ , k- $\omega$ , and Zero Equation Models on Characterization of Turbulent Permeability of Porous Media. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering*. 2(2), 43-50.

30. Erbaş, M. (2013). *Düşük Sıcaklık Organik Rankine Çevrim Uygulamalarında Kullanılan Radyal Türbinin Aero termodinamik Tasarımı ve Simülasyonu*. ASME 2013 Uluslararası Makine Mühendisliği Konferansı ve Sergisi. San Diego, USA.
31. Internet: NACA 4-digit airfoil generator (NACA 2412 AIRFOIL). URL: [www.airfoiltools.com](http://www.airfoiltools.com). Son Erişim Tarihi: 12.07.2019
32. Internet: ANSYS FLUENT UDF Manual Release 14.0 URL: <http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/martoran/NotasModelosGrad/> Son Erişim Tarihi: 20.06.2019.
33. Internet: ANSYS Fluent Tutorial Guide Release 18.0. URL: <http://users.abo.fi/rzevenho/>. Son Erişim Tarihi: 16.07.2019.
34. Yousefi1 K., Razeghi A. (2018). *Determination of the Critical Reynolds Number for Flow over Symmetric NACA Airfoils*, 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting 8–12.
35. Claudio Marongiu, Renato Tognaccini. (2010) *Simulation of the Dynamic Stall at Low Reynolds Number* ,48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition.
36. Aşıcı V. Erbaş M. Bıyıkoglu A. (2019). *Aerodynamic Analysis of Flow over a Pitching Airfoil*. 3. Mühendislik ve Doğa Bilimlerinde Yenilikçi Yaklaşımlar Sempozyumu Uluslararası, Ankara, Türkiye.
37. Canıyılmaz, E. (2003) Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım. Gazi Üniversitesi. *Mühendislik. Mimarlık Fakültesi. Dergisi* 18(3), 51-63.
38. Raju, Reni. (2008). Dynamics of Airfoil Separation Control Using Zero-Net Mass-Flux Forcing. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 46(12), 3103-3115.
39. Sheldahl, R.E., Klimas, P. C. (1981). Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines. SANDS-80-2114.
40. Umar, F. (2009). CFD analysis of an oscillating wing at various reduced frequencies. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 59(1), 173–194.



**EKLER**

## EK-1. Kullanıcı tanımlı fonksiyon

Analiz-1 değerleri için girilen parametreler, kullanıcı tanımlı fonksiyon ile çözücüde tanımlanmıştır. Parametre değerleri her bir analiz için değiştirilerek girilmiştir. Bu fonksiyonda 'vel' sentetik jet hızını, 'freq' sentetik jet frekansını, 'real freq' kanat salınım frekansını, 'dalfa' değerleri ise kanat salınım açısı girilmiştir. Kullanıcı tanımlı fonksiyon aşağıdaki gibidir:

```
#include "udf.h"
#include "unsteady.h"
DEFINE_PROFILE(syntetic_jet_vel,t,i)
{
face_t f;
real vel = 0.0, vel_max=9.738231293;
real freq=15.58031111;
vel = vel_max*sin(2*3.141593*freq*CURRENT_TIME);
begin_f_loop(f,t)
{
F_PROFILE(f,t,i)=vel;
}
end_f_loop(f,t)
}
DEFINE_TRANSIENT_PROFILE(rotation_rate_ramp,time)
{
real rotation_rate = 0.0;
real freq=10.38744533;
real dalfa=0.06981317;
rotation_rate = dalfa*freq*cos(freq*time);
return rotation_rate;
}
```

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AŞICI, Veli  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 02.11.1987, Ankara  
 Medeni hali : Bekâr  
 Telefon : 0 (312) 339 14 48  
 e-mail : v\_asici@hotmail.com



### Eğitim

| Derece        | Eğitim Birimi                           | Mezuniyet    |
|---------------|-----------------------------------------|--------------|
| Yüksek lisans | Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği | Devam ediyor |
| Lisans        | Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği | 2013         |
| Lise          | Mamak Anadolu Lisesi                    | 2005         |

### İş Deneyimi

| Yıl        | Yer         | Görev           |
|------------|-------------|-----------------|
| 2015-Halen | TİS A.Ş.    | Proje Mühendisi |
| 2014-2015  | Okur Makina | Proje Mühendisi |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

1. Aşıcı, V., Erbaş, M., Bıyıkıoğlu, A. (2019) *Aerodynamic Analysis of Flow over a Pitching Airfoil*, ISAS 2019, 3. Mühendislik ve Doğa Bilimlerinde Yenilikçi Yaklaşımlar Sempozyumu Uluslararası, Ankara, Türkiye.

### Hobiler

Spor, Müzik, Film



*GAZİ GELECEKTİR..*