KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜZGAR TÜRBİN KANAT PROFİL OPTİMİZASYONU

Mehmet BAKIRCI

HAZİRAN 2014

Makine Anabilim Dalında Mehmet Bakırcı tarafından hazırlanan RÜZGAR TÜRBİN KANAT PROFİL OPTİMİZASYONU adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Anabilim Dalı Başkanı V.

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Ali Erişen
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. İbrahim Uzun
Üye (Danışman) : Prof. Dr. Ali Erişen
Üye : Doç. Dr. Ertuğrul Çam

30/06/2014

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Doç Dr. Erdem Kamil Yıldırım
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

RÜZGAR TÜRBİN KANAT PROFİL OPTİMİZASYONU

BAKIRCI, Mehmet
Kırıkkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Prof. Dr. Ali Erişen
Haziran 2014, 213 sayfa

Bu çalışmada, Türkiye'nin ortalama 5 m/s rüzgar hızına sahip bölgeleri için uygun olacağı düşünülen küçük bir rüzgar türbin kanat tasarımı yapılmıştır. Kanatların dönmesini sağlayan aerodinamik kuvvetlerin meydana geldiği özel tasarlanmış standart kanat kesitleri (airfoil) akademik kaynaklardan hazır alınmıştır. Bu kanat kesitlerinin aerodinamik katsayı değerleri, kanat tasarım ve performans hesaplarında kullanmak amacıyla matematiksel bir fonksiyon biçiminde ifade edilmiştir. Ayrıca üç yeni kanat kesit geometrisi oluşturulmuş ve elde edilen bu kanat kesitlerin aerodinamik özellikleri; Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği-HAD (CFD-Computational Fluids Dynamics) ile analiz edilmiştir.

Kanat kesitlerinin kanat boyunca bağlanma açılarının ve kiriş uzunluklarının optimum (maksimum güç oluşturan) değerleri, lineer momentum, açısal momentum ve kanat eleman teoremlerine göre belirlenmiştir. Bu teoremlerin birleşimi olan Kanat Eleman Momentum (BEM, Blade Element Momentum Theory) teoremi kullanılarak, kanatlarda üretilebilecek güç hesaplanmıştır. Kullanılan farklı standart kanat kesitleri ile elde edilen optimum kanat geometrileri ve güç verimleri karşılaştırılmıştır. Farklı uç hız oranlarına göre tasarlanan kanat geometrileri için güç verimleri hesaplanarak optimum uç hız oran değeri araştırılmıştır. Kanat geometrisinde yapılabilecek basitleştirmelerin güç verimine etkileri hesaplanmıştır. Bu çalışmalar neticesinde şu sonuçlara varılmıştır:

1.Maksimum güç, tasarım uç hız oranında değil bir veya iki değer fazlasında elde edilmektedir.

2.Bu çalışmada kullanılan standart kanat kesitleriyle elde edilen güç çarpan değerleri arasındaki fark %10'a kadar olabilmektedir. Bu kesitlerin aerodinamik karakterleri, hem optimum kanat geometrisini hem de elde edilecek güç verimini etkilemektedir. Kaldırma katsayısı yüksek olan kanat kesitlerinin kullanıldığı kanatlarda daha yüksek performans elde edilmektedir. Ancak tasarım uç hız oranı ve çalışma hızı bu etkinin yüzdesini değiştirmektedir.

3.Basitleştirme maksadıyla optimum kanat geometrisinden uzaklaşıldıkça güç veriminde % 30 a kadar kayıp olabileceği hesaplanmıştır.

4.HAD çalışmalarında standart kanat kesit geometrilerinde yapılan değişikliklerle daha iyi aerodinamik performansa sahip kanat kesitlerinin elde edilebileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Rüzgar Türbin Kanadı,Kanat kesiti, Aerodinamik, HAD

ABSTRACT

OPTIMIZATİON OF WIND TURBINE BLADE PROFILE

BAKIRCI, Mehmet
Kırıkkale University
Institute of Science
Departmen of Mechanics, Ph. D. Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Ali Erişen
June 2014, 213 pages

In this study, a small wind turbine blade has been designed expected to be suitable for the region of Turkey with 5 m/s average wind speed. Aerodynamic coefficient values of airfoils used for the wind turbine blade were taken from the literature. These values were transformed into a mathematical function to design optimumblade and calculate its performance. Also, three new airfoil geometries were developed and the aerodynamic characteristics of the resulting airfoils were analyzed using CFD (Computational Fluid Dynamics).

The optimum pitch angles and chord lengths of the airfoils along the blade are determined based on linear momentum theory, angular momentum theory and blade element theory. The power that could be produced by the wind turbine rotor was calculated using the Blade Element Momentum Theory (BEM) which is a combination of three theorems above. The amount of power produced by the optimized blades with different airfoils were compared. The power efficiency values of blade geometry designed according to different optimum tip speed ratios were investigated. The effects of simplifications in blade geometry on power efficiency were calculated. As a result of this study, the following conclusions have been reached:

1.Maximum power was not been obtained at the design tip speed ratio but achieved at one or two higher values.

2.Higher lift coefficient of the airfoil improves blade performance.

3.Excessive simplification of optimum blade geometry may cause power losses as high as % 30.

4.CFD work revealed that airfoils with better aerodynamic performance could be obtained by modifying the geometry of the standard airfoils.

Key Words: Wind Turbine Blade, Airfoil, Aerodynamics, CFD

TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanmasında emeğini ve bilgisini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Ali Erişen'e çok teşekkür ederim. Ayrıca tez savunmama katılan Prof. Dr. İbrahim Uzun, Doç Dr. Ertuğrul Çam ve Yrd. Doç Dr. Battal Doğan hocalarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT iii
ÇİZELGELER DİZİNİ ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
KISALTMALAR DİZİNİ xviii
SİMGELER DİZİNİ xix
1. GİRİŞ 1
1.1. Amaç ve Kapsam 1
1.2. Kaynak Özetleri 2
1.3. Enerji ve Rüzgar Enerjisi 9
1.3.1. Rüzgar Oluşumu 11
1.3.2. Dünyada ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi 12
1.4. Rüzgar Türbinleri 14
2. MATERYAL VE YÖNTEM 18
2.1. Rotor Geometrisi 18
2.2. Kanat Kesitleri (Airfoil) Ve Aerodinamik Özellikleri 26
2.2.1. Rüzgar Türbin Kanat Kesit Özellikleri 34
2.2.2. Standart Kanat Kesitleri 36
2.2.3. Standart Kanat Kesitinden Yeni Kesitlerin Oluşturulması 43
2.2.4. HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) 47
2.2.5. HAD İle Kanat Kesitinin Aerodinamik Analizi 50
2.3. Kanat Kesitlerinin Kanat Boyunca Yerleştirilmesi 53
2.4. Uç Hız Oranı 56
2.5. Kanat Geometri Ölçüleri 58
2.6. Teoremler 59
2.6.1. Betz İdeal Disk Teoremi 59
2.6.2. Güç Çarpanı ve Betz Limiti 63
2.6.3. Kaldırma ve Sürükleme Tipi Rüzgar Türbinleri 66

2.6.4. Kanat Eleman Teoremi 70
2.6.5. Açısal Momentum Teoremi 75
2.7. Optimum Geometri 79
2.7.1. Momentum Teoremine (Betz Teoremi) göre Optimum Geometri.....80
2.7.2. Açısal Momentum Teoremine (Schmitz) göre Optimum Geometri 83
2.8. Kanat Eleman Momentum Teoremi.....88
2.8.1. Uç Kayıpları.....91
2.8.2. Glauert Düzeltmesi 93
2.9. Güç Hesabı Ve Algoritması 94
2.10. Küçük Boyut Rüzgar Türbin Kanat Tasarımı 98
2.10.1. Amaç 98
2.10.2. Tasarım Rüzgar Hızı Ve Türbin Büyüklüğü.....98
2.10.3. Tasarım Aşamaları 101
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....103
3.1. Kanat Boyunca Değişen Değerler.....104
3.2. Betz ve Schmitz Karşılaştırması 107
3.3. Uç Hız Oranının Performans Etkisi 109
3.4. Standart Kanat Kesitinin Geometriye ve Performansa Etkisi.....112
3.5. Optimum Kanat Geometrisinde Basitleştirmeler.....116
3.6. HAD (CFD) Sonuçları 118
3. SONUÇLAR 125
KAYNAKLAR 128
EKLER.....138
EK-1. Standart Kanat Kesitlerinin Şekilleri.....138
EK-2. Standart Kanat Kesitlerinin Aerodinamik Özellikleri 141
EK-2.1 NACA 23012.....141
EK-2.2. NACA 4412.....146
EK-2.3 NACA 63-215 150
EK-2.4 DU 93-W-210.....154
EK-2.5 FFA-W3-211 157
EK-2.6 NREL S 809 161
EK-2.7 RISO-A1-21 166
EK-2.8 NACA 0012.....170

EK-3: HAD Sonuçları 174
EK-4: NACA 0012, MB 01, MB 02, NACA 4412, MB 03 Koord. 203

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE Sayfa

2.1. Kanadın farklı bölgeleri için gerek duyulan kesit özellikleri.....36
2.2. NACA 23012 aerodinamik katsayılar.....41
2.3. Uç hız oranının düşük ve yüksek değerlerinin etkileri.....57
3.1. Betz - Schmitz performans karşılaştırması 109
3.2. X=7, NACA 4412; farklı uç hız oranlarındakiperformans sonuçları.....110
3.3. Dokuz farklı kanat geometrinin güç çarpan değerleri.....111
3.4. Üç kanat kesitinin performans sonuçları.....114
3.5. Sekiz farklı standart kanat kesitlerinin aerodinamik özellikleri
vegüç çarpandeğerleri 115
3.6. Dört farklı geometrinin karşılaştırması 118
3.7. Basınç katsayı grafiklerinin karşılaştırılması 119
3.8. Statik basınç konturları 120
3.9. MB 01, MB 02, MB 03, NACA 0012, NACA 4412kanat kesitlerinin
kaldırma vesürükleme katsayıları 121
Ek-2.1. NACA 23012 kaldırma ve sürükleme katsayı değerleri 143
Ek-2.2. NACA 23012 polinom fonksiyonu katsayıları.....143
Ek-2.3. NACA 23012 stall sonrası için değerler.....144
Ek-2.4. NACA 4412 (C_L, C_D) polinom fonks. katsayıları 148
Ek-2.5. NACA 4412 kaldırma ve sürükleme katsayıları 148
Ek-2.6. NACA 4412 stall sonrası için değerler.....149
Ek-2.7. NACA 63-215 kanat kesitinin aerodinamik katsayıları 151
Ek-2.8. NACA 63-215 kanat kesitinin polinom fonk. katsayıları.. 152
Ek-2.9. DU 93-W-210 aerodinamik katsayıları 155
Ek-2.10. DU 93-W-210 polinom fonksiyon katsayıları.....155
Ek-2.11. FFA-W3-211 için kaldırma ve sürükleme katsayıları.....158
Ek-2.12. FFA-W3-211 için C_L ve $C_D$polinom fonks.katsayıları.....159

ÇİZELGE Sayfa

Ek-2.13. NREL S 809 için kaldırma ve sürükleme katsayıları 161
Ek-2.14. NREL S 809 için C_L ve C_D polinom fonks. katsayıları.... 162
Ek-2.15. NREL S 809 stall sonrası için değerler 162
Ek-2.16. NREL S 809 aerodinamik katsayılar.....164
Ek-2.17. RISO-A1-21 aerodinamik katsayılar.....168
Ek-2.18. RISO-A1-21 için C_L ve C_D polinom fonks.katsayıları.....168

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL Sayfa

1.1. Sürekli rüzgarlar....12
1.2. Dünyada toplam kurulu rüzgar enerjisinin son üç yılda değişimi....13
1.3. Rüzgar enerjisinde lider ülkelerin kapasiteleri....13
1.4. Savinous ve Darrieus rüzgar türbinleri....15
1.5. Çok kanatlı rüzgar türbini....15
1.6. Üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbini....16
1.7. Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü....17
1.8. Rüzgar türbin iç yapısı....17
2.1. Rüzgar türbin kanat sistemi (rotor)....19
2.2. Kanat kesit kiriş uzunluğu (c)....21
2.3. Kanat uç geometrisi....22
2.4. Kanat kesit kiriş uzunluğuna göre farklı kanat geometrileri.....23
2.5. Kanat kesiti....23
2.6.Rüzgar hızı ile kanatta oluşan kaldırma ve sürüklemekuvvetleri.....24
2.7. Kanat boyunca kullanılan farklı kanat kesitleri....25
2.8. Katılık oranı ve kanat elemanı....26
2.9. Kanat kesit geometrisi....27
2.10. Kaldırma ve sürükleme kuvvetleri....27
2.11.Polar grafikler....29
2.12. Tasarım hücum açısı....29
2.13. Kanat kesitinin üç farklı akış bölgesindeki davranışı....30
2.14. Stall olayı....31
2.15. Kanat kesitinin stall karakteri....35
2.16. Kanat kesit geometrisinde tanımlar....36
2.17. NACA 23012 kaldırma katsayısı....42
2.18. NACA 23012 sürükleme katsayısı....42
2.19. NACA 0012 kanat kesit geometrisi....45
2.20. MB 01 kanat kesit geometrisi....45

ŞEKİL Sayfa

2.21. MB 02 kanat kesit geometrisi 46
2.22. NACA 4412 ve MB 03 kanat kesit geometrileri.....46
2.23. Kanat kesit geometrisi etrafındaki akış alanı 51
2.24. Dörtgen mesh 52
2.25. Üçgen mesh.....52
2.26.Kanat teğet hızının kanat boyunca değişimi ve
burulma açısı 54
2.27. Kanat kesiti için tanımlanan açılar.....55
2.28. Kanat kesit uzunluğunun (c) ve bağlanma açısının (β)
kanat boyunca değişimi.....55
2.29. Kanat kesitlerinin kanat boyunca değişimi 56
2.30. Uç hız oranının ve kanat sayısının kanat geometrisine etkileri.....58
2.31. İdeal disk 59
2.32. Hız ve basıncın rotor eksen boyunca değişimi.....61
2.33. C_p'nin a' ya göre değişimi.....65
2.34. Eksenel itme kuvvet katsayısı (C_x) nin a' ya göre değişimi.....66
2.35. Kaldırma tipi rüzgar türbinlerinde bağıl rüzgar hızı 67
2.36. Sürükleme tipi rüzgar türbini (Savonius).....68
2.37. Kanat ve kanat elemanı 70
2.38. Kanat elemanına etkiyen eksenel ve teğetsel kuvvetler.....71
2.39(a). Kaldırma ve Sürükleme kuvvetleri.....72
2.39(b). Teğetsel kuvvetin oluşması 72
2.39(c). Eksenel kuvvetin oluşması 73
2.40. Rüzgar hızının değişimi 75
2.41. Bağıl rüzgar hızının değişimi 75
2.42. Rüzgar teğetsel hızının değişimi 76
2.43. Eksenel, teğetsel, bağıl hız ve hız değişim diyagramları 78
2.44. Kanat elemanı üzerinde rüzgar hızları 80
2.45. Üst akımda ve kanat elemanı üzerinde hız diyagramı 84
2.46. Üst akımda hız diyagramı 86
2.47. Kanat ucunda dikey hava akışı.....91

ŞEKİL Sayfa

2.48. F uç kayıp faktörünün kanat boyunca değişimi 92
2.49. Momentum teoreminin geçerliliği ve iki farklı akış durumu 93
2.50. Glauert düzeltmesi 94
2.51. Türkiye rüzgar enerji potansiyeldağılımı 99
2.52. Tasarım rüzgar hızı ve rüzgar türbin göbek yüksekliği 100
2.53. Tasarlanan rüzgar türbini 101
2.54. Tasarımı yapılan kanat geometrisinin üç boyutlu görünümü.....102
2.55. Tasarımı yapılan RT'nin kanat kesit görünümü 102
3.1. Eksenel indüksiyon katsayısının kanat boyunca değişimi 104
3.2. Teğetsel indüksiyon katsayısının kanat boyunca değişimi 105
3.3. Eksenel kuvvetin kanat boyunca değişimi 106
3.4. Teğetsel kuvvetin kanat boyunca değişimi 106
3.5. Güç değerinin kanat boyunca değişimi 107
3.6. Betz ve Schmitz'e göre bağlanma açısının kanat boyunca değişimi 108
3.7. Betz ve Schmitz'e göre kanat kesit kiriş uzunlukları.....108
3.8. Farklı kanat geometrilerin güç çarpan değerlerinin karşılaştırması 112
3.9. Kanat kesit kiriş uzunluklarının karşılaştırılması.....113
3.10. Bağlanma açılarının karşılaştırılması 114
3.11. Üç farklı geometrinin kanat kiriş uzunluk değişimleri 117
3.12. Üç farklı geometrinin bağlanma açıları.....117
3.13. NACA0012, MB01, MB02, MB03 kaldırma katsayıları 122
3.14. NACA0012, MB01, MB02, MB03 sürükleme katsayıları 122
3.15. NACA 4412 ve MB03 kaldırma katsayı grafikleri 123
3.16. NACA 4412 ve MB03 sürükleme katsayı grafikleri 124
Ek-1.1. NACA 4412 kanat kesit şekli 138
Ek-1.2. NACA 23012 kanat kesit şekli 138
Ek-1.3. NACA 63-215 kanat kesit şekli.....139
Ek 1.4. DU 93 -W-210 kanat kesit şekli 139
Ek-1.5. FFA-W3-211 kanat kesit şekli 139

ŞEKİL Sayfa

Ek-1.6. NREL S 809 kanat kesit şekli 140
Ek-1.7. RISO-A1-21 kanat kesit şekli.....140
Ek-1.8. NACA 0012 kanat kesit şekli.....140
Ek-2.1. NACA 23012 kaldırma ve moment katsayı grafikleri 141
Ek-2.2. NACA 23012 sürükleme ve moment-kaldırma katsayı grafikleri.....142
Ek-2.3. NACA 23012 kaldırma ve sürükleme katsayı grafikleri.....144
Ek-2.4. NACA 23012 0-90 derece aralığında C_L grafiği.....145
Ek-2.5. NACA 23012 0-90 derece aralığında C_D grafiği.....145
Ek-2.6. NACA 4412 kaldırma ve moment katsayılar grafikleri 146
Ek-2.7. NACA 4412 sürükleme-kaldırma katsayı grafikleri 147
Ek-2.8. NACA 4412 kaldırma katsayısının-hücum açısı grafiği 149
Ek-2.9. NACA 63-215 kaldırma katsayısı- hücum açısı grafikleri.....150
Ek-2.10. NACA 63-215 sürükleme katsayısı-hücum açısı grafikleri.. 150
Ek-2.11. NACA 63-215 kaldırma katsayısı 152
Ek-2.12. NACA 63-215 sürükleme katsayısı.....153
Ek-2.13. NACA 63-215 kaldırma/sürükleme oranı 153
Ek-2.14. DU 93-W-210 kaldırma katsayısı-hücum açısıgrafikleri 154
Ek-2.15. DU 93-W-210 sürükleme katsayısı-hücum açısı grafikleri.....154
Ek-2.16. DU 93-W-210 kaldırma katsayısı.....156
Ek-2.17. DU 93-W-210 sürükleme katsayısı 156
Ek-2.18. DU 93-W-210 kaldırma/sürükleme oranı 157
Ek-2.19. FFA-W3-211 kaldırma katsayısı-hücum açısı grafikleri.....157
Ek-2.20. FFA-W3-211 sürükleme katsayısı-hücum açısı grafikleri 158
Ek-2.21. FFA-W3-212 kaldırma katsayısı 159
Ek-2.22. FFA-W3-211 sürükleme katsayısı 160
Ek-2.23. FFA-W3-211 kaldırma/sürükleme oranı 160
Ek-2.24. NREL S 809 C_L ve C_D grafikleri (Delft rüzgar tünel).....163
Ek-2.25. NREL S 809 kaldırma katsayısı-hücum açısı grafikleri.....163
Ek-2.26. NREL S 809 sürükleme katsayısı-hücum açısı grafikleri 164
Ek-2.27. NREL S809 kaldırma katsayısı 165

ŞEKİL Sayfa

Ek-2.28. NREL S 809 sürükleme katsayısı.....165
Ek-2.29. NREL S 809 kaldırma/sürükleme oranı.....166
Ek-2.30. RISO-A1-21 kaldırma katsayısı-hücum açısı grafikleri.....166
Ek-2.31. RISO-A1-21 sürükleme katsayısı-hücum açısı grafikleri.....167
Ek-2.32. RISO-A1-21 kaldırma katsayısı.....169
Ek-2.33. RISO-A1-21 sürükleme katsayısı.....169
Ek-2.34. RISO-A1-21 kaldırma/sürükleme oranı.....170
Ek-2.35. NACA 0012 kaldırma ve sürükleme katsayı grafikleri.....170
Ek-2.36. NACA 0012 kaldırma katsayı grafikleri(Re=179 bin).....171
Ek-2.37. NACA 0012 sürükleme katsayı grafikleri(Re=179 bin).....171
Ek-2.38. NACA 0012 kaldırma katsayı grafikleri (Re=3 milyon).....172
Ek-2.39. NACA 0012 sürükleme katsayı grafikleri (Re=3 milyon).....172
Ek-2.40. NACA 0012 kaldırma ve sürükleme katsayı grafikleri.....173
Ek-3.1. NACA 0012 basınç katsayı değerleri(hücum açısı:4 derece).....174
Ek-3.2. NACA 0012 hız değerleri (hücum açısı: 4 derece).....174
Ek-3.3. NACA 0012 basınç katsayı grafiği (hücum açısı: 4 derece).....175
Ek-3.4. NACA 0012 basınç katsayı değerleri
(hücum açısı: 8 derece).....175
Ek-3.5. NACA 0012 hız değerleri (hücum açısı: 8 derece).....176
Ek-3.6. NACA 0012 basınç katsayı grafiği(hücum açısı: 8 derece).....176
Ek-3.7. NACA 0012 basınç katsayı değerleri
(hücum açısı:12 derece).....177
Ek-3.8. NACA 0012 hız değerleri (hücum açısı: 12 derece).....177
Ek-3.9. NACA 0012 basınç katsayı grafiği (hücum açısı: 12 derece).....178
Ek-3.10.MB 01 basınç katsayı değerleri(hücum açısı:4 derece).....178
Ek-3.11. MB 01 hız değerleri (hücum açısı: 4 derece).....179
Ek-3.12. MB 01 basınç katsayı grafiği (hücum açısı: 4 derece).....179
Ek-3.13. MB 01 basınç katsayı değerleri (hücum açısı: 8 derece).....180
Ek-3.14. MB 01 hız değerleri (hücum açısı: 8 derece).....180
Ek-3.15. MB 01 basınç katsayı grafiği(hücum açısı: 8 derece).....181
Ek-3.16. MB 01 basınç katsayı değerleri (hücum açısı:12 derece).....181

ŞEKİL Sayfa

Ek-3.17. MB 01 hız değerleri (hücum açısı: 12 derece) 182
Ek-3.18. MB 01 basınç katsayı grafiği (hücum açısı: 12 derece) 182
Ek-3.19. MB 02 basınç katsayı değerleri(hücum açısı:4 derece) 183
Ek-3.20. MB 02 hız değerleri (hücum açısı: 4 derece) 183
Ek-3.21. MB 02 basınç katsayı grafiği (hücum açısı: 4 derece) 184
Ek-3.22. MB 02 basınç katsayı değerleri (hücum açısı: 8 derece) 184
Ek-3.23. MB 02 hız değerleri (hücum açısı: 8 derece) 185
Ek-3.24. MB 02 basınç katsayı grafiği(hücum açısı: 8 derece) 185
Ek-3.25. MB 02 basınç katsayı değerleri (hücum açısı:12 derece) 186
Ek-3.26. MB 02 hız değerleri (hücum açısı: 12 derece) 186
Ek-3.27. MB 02 basınç katsayı grafiği (hücum açısı: 12 derece) 187
Ek-3.28. MB 03 basınç katsayı değerleri (hücum açısı:0 derece) 187
Ek-3.29. MB 03 hız değerleri (hücum açısı: 0 derece) 188
Ek-3.30. MB 03 basınç katsayı grafiği (hücum açısı: 0 derece) 188
Ek-3.31. MB 03 basınç katsayı değerleri (hücum açısı: 4 derece) 189
Ek-3.32. MB 03 hız değerleri (hücum açısı: 4 derece) 189
Ek-3.33. MB 03 basınç katsayı grafiği(hücum açısı: 4 derece) 190
Ek-3.34. MB 03 basınç katsayı değerleri (hücum açısı:6 derece) 190
Ek-3.35. MB 03 hız değerleri (hücum açısı: 6 derece) 191
Ek-3.36. MB 03 basınç katsayı grafiği (hücum açısı: 6 derece) 191
Ek-3.37. MB 03 basınç katsayı değerleri(hücum açısı:8 derece) 192
Ek-3.38. MB 03 hız değerleri (hücum açısı: 8 derece) 192
Ek-3.39. MB 03 basınç katsayı grafiği (hücum açısı: 8 derece) 193
Ek-3.40. MB 03 basınç katsayı değerleri (hücum açısı: 12 derece) 193
Ek-3.41. MB 03 hız değerleri (hücum açısı: 12 derece) 194
Ek-3.42. MB 03 basınç katsayı grafiği(hücum açısı: 12 derece) 194
Ek-3.43. MB 03 basınç katsayı değerleri (hücum açısı:15 derece) 195
Ek-3.44. MB 03 hız değerleri (hücum açısı: 15 derece) 195
Ek-3.45. MB 03 basınç katsayı grafiği (hücum açısı: 15 derece) 196
Ek-3.46. MB 03 basınç katsayı değerleri (hücum açısı:20 derece) 196
Ek-3.47. MB 03 hız değerleri (hücum açısı: 20 derece) 197

ŞEKİL Sayfa

Ek-3.48. MB 03 basınç katsayı grafiği (hücum açısı: 20 derece) 197
Ek-3.49. NACA 4412 basınç katsayı değerleri (hüc. açı: 4 derece) 198
Ek-3.50. NACA 4412 hız değerleri (hücum açısı: 4 derece) 198
Ek-3.51. NACA 4412 basınç katsayı grafiği
(hücum açısı: 4 derece) 199
Ek-3.52. NACA 4412 basınç katsayı değerleri
(hücum açısı: 8 derece) 199
Ek-3.53. NACA 4412 basınç katsayı grafiği
(hücum açısı: 8 derece) 200
Ek-3.54. NACA 4412 hız değerleri (hücum açısı: 8 derece) 200
Ek-3.55. NACA 4412 basınç katsayı değerleri
(hücum açısı:12 derece) 201
Ek-3.56. NACA 4412 hız değerleri (hücum açısı: 12 derece) 201
Ek-3.57. NACA 4412 basınç katsayı grafiği
(hücum açısı: 12 derece).....202

KISALTMALAR DİZİNİ

PEM	Pala (Kanat) Eleman Momentum Teoremi
YERT	Yatay Eksenli Rüzgar Türbini
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics (Ulusal Havacılık Araştırma Birliği)
NREL	National Renewable Energy Laboratory (Ulusal Yenilebilir Enerji Laboratuarı)
DERT	Düşey Eksenli Rüzgar Türbini
DU	Delft Üniversitesi
EWEA	European Wind Energy Association (Avrupa Rüzgar Enerji Birliği)
FFA	Kanat kesit ismi (İsveç Havacılık AraştırmalarıEnstitüsü)
WWEA	World Wind Energy Assocition (Dünya Rüzgar Enerji Birliği)
CFD	Computational Fluid Dynamics
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
MW	Megawatt
RT	Rüzgar Türbini
REPA	Türkiye Rüzgar Atlası
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
RISO	Riso Ulusal Laboratuarı (Danimarka)

SİMGELER DİZİNİ

a	-	Eksenel indüksiyon katsayısı
a'	-	Teğetsel indüksiyon katsayısı
A	m^2	Türbin kanat süpürme alanı
B	-	Kanat sayısı
C_D	-	Sürükleme kuvvet katsayısı
C_L	-	Kaldırma kuvvet katsayısı
C_P	-	Güç çarpanı
C_x	-	Eksenel kuvvet katsayısı
C_y	-	Teğetsel kuvvet katsayısı
c	m	Kanat kesitkiriş uzunluğu
P	W	Güç
r	m	Kanat elemanın rotor merkezine uzaklığı
T	Nm	Tork
U	m/s	Rotor düzlemindeki teğetsel hız
V	m/s	Rotor üzerindeki rüzgar hızı
V_1	m/s	Serbest rüzgar hızı
V_3	m/s	Rotor sonrasındaki rüzgar hızı
W	m/s	Bağıl rüzgar hızı
X	-	Uç hız oranı
x	-	Kanat elemanına ait uç hız oranı
α	derece	Hücum açısı
β	deece	Kanat eleman bağlanma açısı
φ	derece	Bağıl rüzgar hızıile rotor düzlemi arasındaki açı
ω	1/s	Kanadın açısal dönme hızı
ρ	kg/m^3	Hava yoğunluğu
σ	-	Katılık oranı
C_p	-	Basınç katsayısı
C_f	-	Sürtünme katsayısı
Re	-	Reynold sayısı

1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Rüzgardan elde edilen enerjinin çok büyük bölümü geniş arazilerde kurulan ve şebekeye bağlı olan büyü k ticari rüzgar türbinlerinden elde edilmektedir. Büyük rüzgar türbin çiftlikleri, yapılan uzun araştırmalar sonucu, rüzgar hızının ve yoğunluğunun yüksek olduğu yerlere kurulmaktadır. Oysa kendi elektriğini kendi arazisinde veya binasının üstünde üretmek isteyenler için verimi yüksek küçük rüzgar türbinlerine ihtiyaç vardır. Verimli küçük yatay eksenli bir rüzgar türbin kanadının tasarımı için bu çalışmada yapılanlar altı madde ile özetlenebilir:

1. Bu çalışmada kullanılan sekiz farklı standart kanat kesitinin (airfoil) aerodinamik özellikleri 4. dereceden bir polinom fonksiyon şeklinde yeniden tanımlanmış ve rüzgar türbin kanat güç verimine etkileri karşılaştırılmıştır.

2. Seçilen kanat kesitlerinin maksimum güç eldesi için, kanat boyunca hangi açıyla yerleştirileceği ve kanat kesit kiriş uzunluklarının kanat boyunca nasıl değişmesi gerektiği, lineer ve açısal momentum ile kanat eleman teoremlerine göre belirlenmiştir.

3. Bir rüzgar türbin kanadının belli bir rüzgar hızında üretebileceği maksimum gücün hesaplandığı bir program, Excel'de oluşturulmuştur.

4. Standart kanat kesit geometrisinde yapılan değişikliklerle yeni kesit geometrileri elde edilmiş ve bu yeni kesitlerin aerodinamik performansları HAD ile iki boyutlu olarak analiz edilip orijinallerinin performansları ile karşılaştırılmıştır.

5. Optimum kanat geometrisini oluştururken alınan uç hız oranının, güç verimine etkisi hesaplanmıştır.

6. Optimum kanat geometrisinde yapılan basitleştirmelerin güç veriminde sebep olduğu kayıplar hesaplanmıştır.

1.2. Kaynak Özetleri

Modern rüzgar türbinlerinin tasarımı ile ilgili olarak yapılan bir çok ulusal ve uluslararası çalışmalar mevcuttur. Bu bölümde bunların bazılarından kısaca bahsedilmiştir.

Glauert (1958;1959); havayı döndürerek sıkıştırmayla çalışan pervanelerin ve rüzgar türbin makinelerinin aerodinamik analizinin temel prensiplerini kurmuştur. Basit bir eksenel akış için ilk olarak momentum ve enerji ilişkilerini uygulamıştır. Sonra kanadın uç ve göbek bölgesinden geçen ikincil akımın etkilerini dikkate almıştır. Lissaman (1974) ve Wilson (1976), Glauert'in çalışmalarını geliştirmişler ve rüzgar türbinlerinin performans karakterlerinin hesaplanmasını adım adım ortaya koymuşlardır. Analizlerini, iki boyutlu kanat elemanında strip teorisine (kanat eleman teoremi) dayandırmışlardır. Ayrıca eksenel ve teğetsel indüksiyon (hız değişim) katsayı değerlerini iterasyonla elde etmişlerdir. Daha sonra, Wilson (1980) YERT' lerin aerodinamiğini özetlemiştir. Performans sınırlarını ortaya koymuş ve vortex akış modelinin uygulanması üzerine öneriler sunmuştur[1,39].

V.Parezanovic, B. Rasuo, M.Adzic (2006), yaptıkları çalışmada NACA 63 (2) 215, FFA-W3-211 ve A-airfoil kanat kesitlerinin aerodinamik katsayılarını, Fluent ve Xfoil (panel metod) bilgisayar paket programlarıyla hesaplamışlardır. Her iki programla elde edilen sonuçları birbiriyle ve deney sonuçlarıyla ([44], [47]) karşılaştırmışlardır. Sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Ancak, sürükleme katsayı değerlerindeki farklılıklar gözlemlemişler ve bu farkın nedeni olarak kanat üzerindeki akışın laminer-türbülans geçişinin yeterince hesaba katılmaması olduğunu belirtmişlerdir[2].

Tangler ve Somers (1995) ise, benzer bir şekilde yatay eksenli rüzgar türbinleri için NREL serisi kanat kesitleri üzerinde yoğunlaşmışlar, bu kesitlerin türbin kanat

kökünden kanat ucuna kadar C_L kaldırma kuvvet katsayı değişimlerine bakmışlardır. Ayrıca, HAD (HAD, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) paket programlarını kullanarak, kanat kesiti üzerindeki akış için türbülans modellerini test etme ve geliştirme odaklı çalışmalar yapmışlardır[3].

Bekka ve diğerleri (2010), NACA 0012 kanat kesiti üzerindeki akışa düşük hücum açılarında bakmış ve Spalart Almaras modeli ile birlikte k-omega, k-omega SST türbülans modellerini test etmişlerdir[4].

Özdamar ve Kavas (1999) tarafından yapılan çalışmada, Glauert-Schmitz yöntemi kullanılmış; kanat sayısı, tasarım devirlilik sayısı, standart kanat kesiti ve hücum açısı değiştirilerek bu parametrelerin elde edilecek enerji miktarına ve üretim maliyetlerine etkisi araştırılmıştır[5].

Barış Önen ve Ali Çınar (2010), NACA 4412 kanat kesitinin flaplı durumlarının aerodinamik performansını, Ansys Fluent bilgisayar paket programıyla araştırmışlardır. Flap uzunluğu ve açısının kaldırma kuvvetine etkilerini analiz etmişler; flaplı kanatların aerodinamik performansı artırdığını görmüşlerdir. Sonuçta fazladan kaldırma kuvvetinin gerekli olduğu uçaklarda flaplı kanatların düşük hücum açısıyla kullanılabileceğini göstermişlerdir. Her ne kadar flap çalışmaları havacılık için önemli olsa da, rüzgar türbinleri içinde bir fikir verebileceği düşünülerek bu çalışma okunmuş ve burada bahsedilmiştir[6].

S. Sarada, M. Shiva Shankar and Rudresh. G. (2012), Ansys Fluent bilgisayar paket programı ile NACA 64618 kanat kesit geometrisinin 2D ve 3D olarak HAD (CFD) analizini yapmışlardır. Bu çalışmada k-epsilon modelini kullanmışlardır. Bu türbülans modeli ile stall durumunda, 2D ile deneysel verilere yakın değerleri elde edememişlerken, 3D ile elde etmişlerdir[7].

Ravi. H. C., Madhukeshwara. N., S. Kumarappa (2013), HAD (CFD) ile NACA 4412 kanat kesitinin kaldırma ve sürükleme katsayılarını hesaplamışlardır. Bu çalışmada, kanat kesiti üzerindeki akışın laminerden türbülansa geçişini dikkate almak için k-omega SST transition türbülans modelini tercih etmişlerdir. Bu

türbülans modeli ile elde edilen değerleri, diğer bir türbülans modeli olan Spalart Almaras ile elde ettikleri değerlerle ve rüzgar tünel deney sonuçları [44] ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma neticesinde HAD ile elde ettikleri sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu görmüşlerdir. K-omega SST, laminer-türbülans geçişini ele alarak kullanılan bu model ile hem stall öncesi hem de stall ve stall sonrasında deneysel veriler ile uyumlu değerler elde etmişlerdir[8].

Mr Kerryn Newey ve Dr Russell Philips (2012), küçük rüzgar türbinlerinin aerodinamik tasarımları ile jeneratör özelliklerinin uyumluluğunda optimum performansın elde edilmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Rotorun açısal dönme hızına göre ürettiği güç ile jeneratörün alabileceği güç değerleri arasındaki ilişkileri analiz etmişlerdir. Güç çarpan ile optimum uç hız oranı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Rüzgar türbin sonrası akımdaki dönme hareketinden ve kanat kesitlerindeki sürüklemeden dolayı oluşan kayıpların güç çarpanına etkilerini analiz etmişlerdir. Reynold sayısı, uç hız oranı, hava yoğunluğu, kanat sayısı, rüzgar hızı, kanat uzunluğu parametrelerini girdi değerler olarak alıp kanat geometrisinin ölçülerini hesaplamışlardır. Bu parametreler arasındaki etkileşimleri, farklı reynold sayısı, farklı uç hız oranları için hesapladıktan sonra elde edilebilecek maksimum güç değerine ulaşmışlardır. Yaptıkları hesapların anlamlılığını göstermek için elde ettikleri sonuçları GL-PMG-1800 rüzgar türbininin özellikleri ile karşılaştırmışlardır. Tasarladıkları 3 kanatlı yatay eksenli küçük rüzgar türbinlerini HAD bilgisayar paket programında analiz etmişler, aerodinamik kuvvetleri, momentleri ve gerilmeleri hesaplamışlardır. Kanat üretiminde kullanılacak malzemeleri seçerek hesaplanan gerilmelere karşı durumlarını değerlendirmişlerdir. Tasarladıkları rüzgar türbininin bir modelini üretip üzerinde aerodinamik, güç, gerilim deneyleri yapıp elde ettikleri sonuçları, teorik olarak ve HAD ile bulunan sonuçlarla karşılaştırmışlardır[9].

U. Aguirre Lıona, J. J. Perez Rambla ve G. Aguirne Zamalloa, iki kanatlı 200 kw nominal güç üreten, değişken hızlı, sabit uç hız oranına sahip, pitching (yunuslama) kontrollü bir rüzgar türbin tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Rüzgar hızı tasarım rüzgar hızının altında ve üstünde iken, oluşan tork, itme kuvveti ve güç değerlerini hesaplamışlardır. NACA serisi 4412, 4415, 4418 ve Göttingen 398 kanat kesitlerini kullanıp sonuçları karşılaştırdıklarında NACA 4415 kanat kesiti ile en iyi

performansı yakaladıklarını göstermişlerdir. Değişik rüzgar hızlarındaki güç, tork ve itme kuvvetini hesaplamışlar ve bu sonuçları mukavemet hesapları için kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmaların farklı kanat uzunlukları içinde uygulanabildiğini göstermişlerdir. Sonuçta hem aerodinamik hem de dinamik faktörlerin performansa etkilerini dikkate alan bir tasarım metodu geliştirmişlerdir [10].

L. J. Vermeer, J. N. Sorensen (1992), A. Crespo yatay eksenli rüzgar türbinlerinin rotorundan geçen akışkanın öncesi, rotor üzeri ve sonrasındaki hız değişimlerini, basınç değerlerini, dönme hareketlerini sayısal ve deneysel olarak inceleyip, akışkanın aerodinamik özelliklerinin rüzgar türbininde elde edilecek gücü nasıl etkilediklerini ortaya koymuşlardır. Kanat kesiti üzerindeki akış ayrılmalarını, deneyle analiz etmişlerdir. Navier Stokes denklemlerini türbülans ve laminar-türbülans geçişli akışkanlara sayısal olarak çözümünü, vortex iz metodunu kullanarak HAD ile yapmışlardır[11].

K.R. Ajao ve J.S.O. Adeniyi (2009), üç kanatlı, küçük, yatay eksenli bir rüzgar türbininin teorik ve deneysel güç değerlerini karşılaştırmışlardır. Kanat uzunluğu 2,15 m (kanatların süpürdüğü alan 3,65 m^2), tasarım hücum açısı 7 derece olan türbininin modelini yapmış 14,9 m yüksekliğindeki bir kulenin üzerine yerleştirmişlerdir. Minimum 3,5 m/s hızla çalışmaya başlayan bu türbinin ürettiği güç değerleri birer dakika aralıklarla ölçülmüştür. Bölgede rüzgar hızı çoğu defa 3,5 m/s altında kaldığından, türbinin çalışma zamanı beklenenin altında olmuştur. Aynı modelin bilgisayarda sayısal hesaplamasını Wınmech model programıyla yapmışlardır. Sayısal hesaplamalar sonucunda elde edilen güç değeri 536 watt iken test sonuçlarına göre bu değer sadece 80 watt olarak tespit edilmiştir. Buldukları değerleri kullanarak teorik güç ve test güç değerlerini dördüncü dereceden polinom fonksiyonları ile ayrı ayrı ifade etmişlerdir. Ayrıca hava yoğunluğunun, güç değerleri üzerinde çok önemli etkiye sahip olmadığını test sonuçlarıyla göstermişlerdir[12].

Hiroharu Suzuki ve diğerleri (2006), NACA 63012 kanat kesit geometrisinin hücum kenarını alt yüzey tarafına doğru esneterek, farklı hücum açılarında laminer sürükleme kuvvetinin azaldığını analitik ve sayısal analizleriyle göstermişlerdir.

Kanat kesit geometrisindeki bu değişiklik, üst yüzeydeki akış ayrılmasının firar kenarına doğru kaydırılması ile laminer bölgedeki toplam sürükleme kuvvetinin azaldığı görülmüştür [13].

Wang Xudong ve diğerleri (2009), rüzgar türbinlerinin optimizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Büyük yatay eksenli rüzgar türbinlerinde, üretilen yıllık enerjiye göre birim enerji fiyatı ile türbin üretim maliyeti arasında optimum tasarım analizi için yatay eksenli rüzgar türbin kanat geometrisinde değişiklikler yapıp yıllık enerji üretim maliyetlerini karşılaştırmışlardır. Kullanılan üç farklı rüzgar türbini; Mexıco 25 Kw, Tjaereborg 2 MW ve NREL 5 MW rüzgar türbinleridir. Türbinde oluşacak güç, tork ve itme kuvvetinin hesaplanmasında kanat eleman teorisi (PEM) ve yapısal dinamik modeline dayalı Aeoro-elastik Model kullanılmıştır. Birim enerji maliyetini, rüzgar türbininin üretim, kurulum, bakım masraflarının toplamının, kurulacak olan rüzgar türbininin bir yıl boyunca üreteceği enerji fiyatına oranı olarak tanımlamışlardır. Amaç birim enerji maliyetini en aza indirmektir. Üretim, kurulum ve bakım masraflarının toplam maliyetini, türbinin kütle parametrisi (kanat eleman kesit kiriş uzunluğu, kanat elemanın kütlesi ve kanat toplam kütlesi ile hesaplanan) cinsinden ifade etmişlerdir. Weibull (rüzgar hızı ve esme frekansı istatistik fonksiyonu) dağılımını kullanarak yıllık enerji üretim miktarını hesaplamışlardır. Kanat geometrisini, kanat uzunluğu, kanat kesit kiriş uzunluğu, burulma açısı, maksimum kanat kesit kalınlığı, kanat cidar kalınlığı ile belirlemişlerdir. MEXICO 25 Kw, Tjaereborg 2 MW ve NREL 5 MW rüzgar türbinlerinin kanat geometrilerinde kanat kesit kiriş uzunluğu, bağlanma açısı ve maksimum kalınlık için alt ve üst limit değerlerini belirlemişlerdir. Kanat geometrisi üzerinde dört tane kontrol noktası seçerek, geometri ölçülerini değiştirip maksimum güç değeri veren optimum değerleri bulmuşlardır. Sonra da bu türbinlerinden elde edilebilecek yıllık enerji miktarlarını hesaplamışlardır. Birim enerji maliyetine göre karşılaştırma yaptıklarında Mexıca (2,25 m yarıçapında) tipinde % 1,15, Tjaereborg (30,56 m yarıçapında) tipinde % 3,4, NREL (63 m yarıçapında) tipinde % 2,6 maliyet azalması oluştuğunu göstermişlerdir[14].

Xavier Mauclere (2009), kanat kesitlerindeki geometri değişiklilerin aerodinamik performanslarına etkilerini incelemiştir. Yapılan bu çalışmada önce, seçilen bir kanat

kesit yüzeyi üzerinde 14 tane kontrol noktası alınıp, Matlab B-spline tekniğini kullanılarak, bu noktaların kanat kesit kirişine dikey olarak yer değiştirmesi ile farklı geometriler elde edilmiştir. Her değişiklikte elde edilen yeni kanat kesitinin aerodinamik performansı (kaldırma ve sürükleme kuvvetleri) XFoil programıyla hesaplanmıştır. Sonuçlar karşılaştırılarak en iyi sonucu veren geometriyi elde etme stratejileri geliştirilmiştir. Ayrıca, XFoil ile bulunan sonuçlar, HAD fluent ile bulunan sonuçlarla kıyaslanarak doğrulatılmıştır[15].

Emrah Kulunk ve Nadir Yılmaz (2009) tarafından yapılan bir çalışma; yatay eksenli rüzgar türbinleri için Kanat Eleman Momentum (BEM) teorisine dayalı bir tasarım metodunun geliştirilmesidir. Bu metotla, NREL S 809 kanat kesitini kullanarak 100 kw gücünde bir türbin tasarlamışlar ve bu türbinin performans analizini yapan bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir[16].

Alireza Maheri ve diğerleri, kanat elemanı momentum teorisini kullanarak yapılan rüzgar türbin kanat performans hesabında, değişkenler arasındaki bağlantıyı sağlayan eksenel indüksiyon (hız değişim) faktörünün iterasyonla hesaplanmasında yakınsama hızının artırılması ve ıraksama problemlerinin giderilmesi üzerine formüller geliştirmişlerdir[17].

Serhat Duran (2005), yüksek lisans tezi olarak yatay eksenli rüzgar türbin kanatlarının bilgisayar destekli aerodinamik tasarım ve performans analizini yapmıştır. Kanat kesit analizi için 'XFoil' paket programını, kanat tasarımı içi ara yüz olarak 'matlab' paket programını kullanmıştır. Optimum geometri ölçülerini PEM Teorisine göre bulduktan sonra geometride bazı değişiklikler yapmıştır. Elde edilen yeni geometriye göre tasarlanan rüzgar türbin kanadının aerodinamik performansını incelemiş ve güç azalmalarını telafi etmek için kanat boyu bu azalmayı telafi edecek şekilde arttırmayı tercih etmiştir[18].

Han Cao (2011), küçük yatay eksenli rüzgar türbinlerinin aerodinamik analizini 2 ve 3 boyutlu olarak HAD bilgisayar paket programıyla analiz etmiştir. Navier Stokes denklemlerinin çözümüne dayanan HAD programında, Spalart Allmaras türbülans viskoz modelini kullanarak bir çok rüzgar türbininde kullanılan DU-93-W-210 ve

NREL-S809 kanat kesitlerinin aerodinamik analizlerini yapmıştır. Analiz çalışmalarında, değişik hücum açılarında ve farklı rüzgar hızlarında bu kanat kesitler etrafında oluşan akımların özelliklerini (basınç, hız, akış ayrılmaları,…) incelemiştir. Akış ayrılmasının oluşmaya başladığı hücum açılarının, akış ayrılmalarının kanat kesiti üzerindeki yerlerinin tespiti, kaldırma ve sürükleme katsayılarının hesabı ve polar eğrilerinin oluşturulmasını yapmıştır. Sonra bu iki kesitin özelliklerinin karşılaştırmış ve bu farklılıkların sebepleri üzerine tespitlerde bulunmuştur. Hücum açısı arttıkça, kanat kesitinin üst yüzeyinde oluşan akış ayrılma noktasının firar kenarından hücum kenarına doğru kaydığını göstermiştir. Bulduğu değerleri, OSU (Ohiu State University, ABD) üniversitesinin deneysel olarak bulduğu sonuçlarla karşılaştırmıştır. Büyük farklılıkların olduğu durumlarda, bunun sebeplerinden biri olarak gerçekte kanat kesiti üzerindeki akışın bir bölümü laminer diğer kısmının türbülans olmasına rağmen, HAD modelinde akışın tamamen türbülans alınması olarak göstermiştir. Genel olarak DU 93-W-210 kanat kesitinin daha iyi performansa sahip olduğunu ortaya koymuştur. Üç kanadı sahip yatay eksenli bir küçük rüzgar türbinin üç boyutlu modeli üzerinde yine HAD ile standart lineer olmayan k–omega türbülans modelini kullanarak güç, tork, kuvvet, güç çarpan değerlerini elde etmiştir. Ayrıca, rüzgar türbinini terk eden iz akımın genişleme ölçülerini veren ampirik formülü açıklamıştır. Rüzgar türbin rotor dönme hızının 'iz akımının' şekline ve ses düzeyine etkilerini incelemiştir. Farklı kanat geometrilerinin (dikdörtgen, kanat ucu sivrilmiş,..) performanslarını karşılaştırmıştır [19].

Horia Dumıtrescu ve Vladimir Cardoş (2010), YERT' lerde rotor dönme hızının, rüzgar hızının, kanat kesit geometrisinin ve kesit yüzey sürtünmesinin kanat kesitlerindeki sınır tabaka ayrılmalarına etkilerini incelemişlerdir. Kanadın kök kısmına yakın yerlerinde kanat kesitinin hücum kenarında oluşan kısa akış ayrılma baloncuklarının rotor açısal hızından kaynaklanan merkezcil kuvvetlerin etkisi altında kanat boyunca hareket etmeleri, viskoz katsayısının kanat boyunca değişimi, sınır tabaka kalınlığı, akımın türbülans ve laminer oluşu, akışın reynold değeri gibi faktörler arasındaki ilişkileri matematiksel modellerle açıklamışlardır[20].

Tetsuya Kogaki ve diğerleri (2004), rüzgar türbinlerinde kanat kesit performansını etkileyen vortex (girdap) üreticileri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Rüzgar

tünelinde ve HAD ile yaptıkları çalışmaları neticesinde, özellikle küçük rüzgar türbinleri için kanat kesit geometrisine sahip vortex üreticilerin dikdörtgen kesitli olanlara göre daha verimli olduğunu görmüşlerdir[21].

Bu çalışmada ise, maksimum güç oluşması için en iyi kanat geometrisinin ölçüleri, momentum ve kanat eleman teoremlerine göre elde edilmiştir. Sonra, oluşturulan bu kanattan elde edilebilecek performans Kanat Eleman Momentum teoremine göre excelde hazırlanan program ile hesaplanmıştır. Ayrıca, standart NACA 0012 ve NACA 4412 kanat kesitlerinin geometrilerinde değişiklikler yapılarak yeni kesitler elde edilmiş ve elde edilen bu yeni kanat kesitlerinin aerodinamik analizleri HAD ile yapılmıştır.

1.3. Enerji ve Rüzgar Enerjisi

İnsanlığın artan talepleri ve gelişen üretim süreçleri, enerjiye ve enerji kullanımına olan ihtiyacı artırmıştır. Bu ihtiyaç, dünyamızı tehdit eden iki önemli sorun oluşturmuştur: Birincisi, küresel iklim değişikliğine sebep olan fosil yakıtların düzensiz kullanımı, ikincisi ise savaşlara yol açan enerji temini sorunudur.
Fosil yakıtlardan enerji üretimi ile havaya salınan sera gazları nedeniyle, iklimlerin değiştiği, ekolojik dengenin bozulmaya başladığı günümüzde, küresel ölçekte önlemlerin alınmaması durumunda dünyamız yaşanılabilir bir dünya olmaktan çıkma tehlikesiyle karşı karşıya kalacaktır.

Fosil yakıt kaynaklarının dünya üzerindeki rezervlerinin sınırlı olması, fosil yakıt elde edilmesinde yaşanan bir takım istikrarsızlıklar, ani fiyat yükselişleri, çevre üzerindeki olumsuz etkileri, ülkelerin enerji politikalarını oluştururken, tükenmez, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı kaçınılmaz olmuştur.

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal çevrede sürekli tekrarlanan enerji akımlarının nicelik ve nitelik özelliklerini bozmayacak şekilde kullanımı veya doğanın kendi evrimi içinde bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağı olarak ifade edilebilir. Bunlara örnek olarak, güneş, su, biyogaz, biyokütle, rüzgar, hidrojen,

jeotermal enerji ve deniz akıntıları gösterilebilir. Doğalgaz, kömür, linyit, petrol, nükleer kaynaklardan elde edilen enerji, tükenebilen, çevreyi kirleten enerjidir. Su, güneş, rüzgar, dalga, jeotermal, biyokütle, gelgit olayı gibi kaynaklardan elde edilen yenilenebilir enerji ise çevre dostudur ve dünya var oldukça tükenmezler.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkan seçeneklerden birisi de rüzgar enerjisidir. Son yıllarda rüzgar enerji sistemlerindeki teknolojik gelişmeler ve verilen devlet destekleri, rüzgar enerjisinin güç sistemi içindeki payını hızla arttırmaktadır. Toplam enerji üretimindeki büyüyen pay artışı, rüzgar enerjisinin güç sistemi ile ilgili olarak birçok çalışmayı ve araştırma konusunu da beraberinde getirmiştir.

Rüzgar enerjisi, temiz, bol, yenilenebilir olmasının yanı sıra hemen hemen tüm dünya genelinde faydalanma imkanı olan bir kaynaktır. Rüzgar enerjisi, yerden belli yükseklikteki direklere iyi yerleştirilmiş rüzgar türbinleri tarafından elektrik enerjisine dönüştürülür. Rüzgar türbini, kurulduğu arazinin sadece bir kısmını işgal ettiğinden ve türbin kanatları yerden epeyce yüksekte olduğundan, kalan arazi diğer amaçlar için rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca deniz alanları karalara göre daha büyük potansiyel gösterdiği için denizlerde denizüstü (off-shore) tipi rüzgar santralleri de kurulmaktadır. İlk önceleri rüzgar türbinleri ile enerji üretimi diğer enerji türlerine göre daha maliyetli iken bugün teknolojik gelişmelerle birlikte bu maliyet azalmıştır.

Rüzgar türbinlerinin görsel ve estetik olumsuzlukları, gürültülü çalışmaları, kuş ölümlerine neden olmaları, haberleşmede parazit oluşturmaları, 2-3 km ye kadar radyo ve televizyon alıcılarını karıştırmaları gibi istenmeyen etkileri ve kaza olasılıkları da rüzgar enerjisinin dezavantajları olarak söylenebilir. Rüzgâr türbinlerinde iki çeşit gürültü oluşmaktadır. Bunlar, mekanik ve aerodinamik gürültülerdir. Mekanik gürültü, dişli kutusu, jeneratör ve yedek motorların sebep olduğu gürültüdür. Mekanik gürültü, akustik kılıfların ve özel dişlilerin kullanılması ve dönen parçaların ses emici malzemeyle kaplanması ile giderilebilmektedir. Aerodinamik gürültü ise, hava içinde dönen kanatların hızına bağlı olarak artar.

1.3.1. Rüzgar Oluşumu

Yeryüzünde rüzgarların oluşumunun en önemli nedeni, yer kabuğunun her noktasının güneş tarafından eşit olarak ısıtılmamasıdır. Isınan hava hafifleyip yükselir, gaz yoğunluğu azalır ve böylece alçak basınç alanı oluşur. Soğukta hava sıkışır, yoğunluğu artar, ağırlaşır, çöker ve böylece yüksek basınç alanı oluşur. Yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru hava akımları yani rüzgarlar oluşur.

Yeryüzünde başlıca rüzgar çeşitleri: sürekli rüzgarlar, mevsimsel rüzgarlar ve yerel rüzgarlardır. Sürekli rüzgarlar, genel atmosfere göre oluşmuş ve yıl boyunca esen rüzgarlardır. Bu rüzgarlar, ekvatorun kutuplardan daha iyi ısınması nedeniyle oluşur. Dünyanın kendi ekseni etrafında dönme hareketi bu rüzgarları saptırır (Şekil 1.1.). Dünyanın dönme hızı, atmosferdeki hava kütlelerine merkezkaç kuvvetinin etkimesine sebep olur. Bu kuvvetin dünya yüzeyine teğet olan bileşeni (coriolis kuvveti) havayı ekvatora doğru sürüklemek isterken, dünya yüzeyine dik bileşeni ise hava kütlelerini yer yüzeyine yakınlaştırır. Yer yüzeyine yakınlaşan ve 100 m yükseğe kadar oluşan bu rüzgarlara yüzey rüzgarları denir. Rüzgar enerjisinin esas kaynağı bu rüzgarlardır. Bu rüzgarlar yer yüzeyinden çok etkilenirler; hızları ve yönleri değişir.

Karalar ve denizler arasında mevsimlere göre meydana gelen sıcaklık farkları sonucunda oluşan rüzgarlara mevsimlik rüzgarlar denir. Yazın, karalar çok ısındığından alçak basınç alanı olurken okyanuslar karalara göre daha serin olduğundan yüksek basınç alanı olurlar. Dolayısıyla, yazın rüzgarlar okyanuslardan karalara doğru eserler. Kış mevsiminde bu olayın tersi gerçekleşir. Yerel rüzgarlar ise yerel ısınma ve soğumaya bağlı olarak dar bölgede oluşan yerel basınçların neden olduğu rüzgarlardır. Gündüzleri kara yüzeyi, denizlere göre daha çabuk ısındığından alçak basınç alanı, denizler ise daha geç ısındığından yüksek basınç durumundadırlar ve bu nedenle denizlerden karalara doğru rüzgarlar oluşur. Geceleri ise karalar denizlere göre daha çabuk soğuduğundan, karalardan denizlere doğru rüzgarlar oluşur. Ayrıca, geceleri dağlardan ova ve vadilere doğru eserken, gündüzleri tam ters yönde rüzgarlar oluşur.

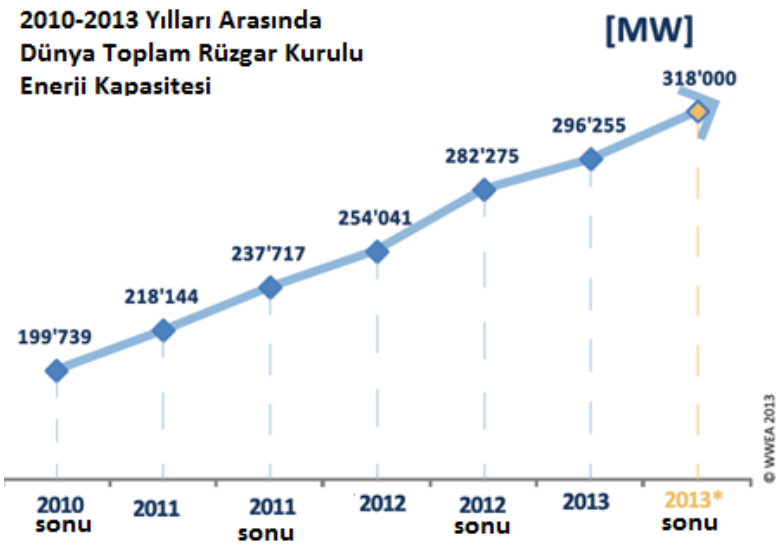


Şekil 1.1. Sürekli rüzgarlar

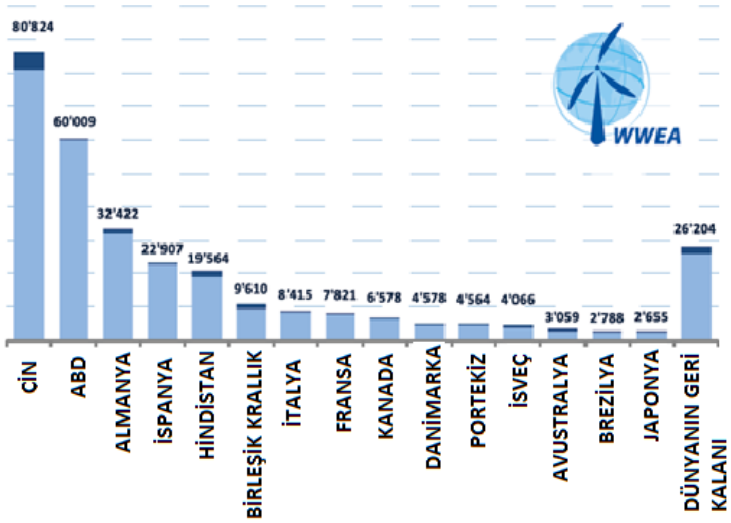
1.3.2. Dünyada ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisini önemi en çok 1973 yılında yaşanan petrol krizi ile başlamıştır. Bu krizden sonra alternatif enerjiye olan talep artmıştır. Pek çok ülke güneş ve rüzgar enerjisi üretimi alanında ciddi yatırımlar yapmaktadırlar. Son yirmi yılda yapılan mühendislik çalışmaları sonucunda, rüzgar türbinlerin daha düşük maliyetli elektrik enerjisi üretmeleri sağlanmıştır. Dünya Rüzgar Enerji Birliği (WWEA-World Wind Energy Association) raporuna göre, 2013 sonu itibarıyla dünyadaki toplam kurulu rüzgar güç kapasitesi 300.000 MW üstüne çıkacağı tahmin edilmiştir (Şekil 1.2).

Bağımsız Rüzgar Enerji Araştırma şirketi olan BTM' ye göre, son beş yılda dünya kurulu rüzgar enerji kapasitesi yıllık ortalama %27,8 oranında artmıştır [24]. Bu istatistikler, küresel düzeyde rüzgar enerjisine olan ilgi artışını göstermektedir. 2012 yılı verilerine göre, Rüzgar Enerjisinde lider ülkelerin kurulu rüzgar enerji kapasiteleri Şekil 1.3 de verilmiştir[22].



Şekil 1.2. Dünyada toplam kurulu rüzgar enerjisinin son üç yılda değişimi[22]



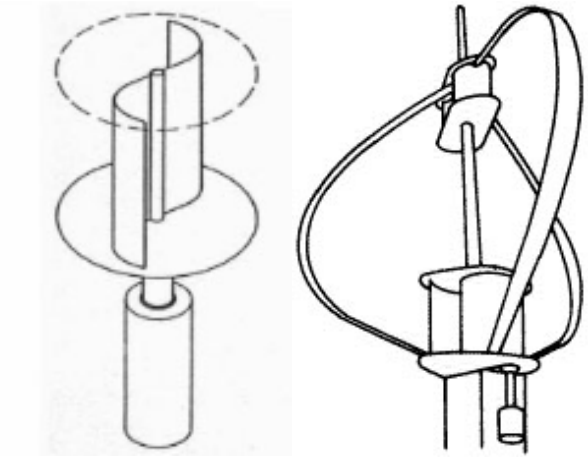
Şekil 1.3. Rüzgar enerjisinde lider ülkelerin kapasiteleri (MW)[22]

Rüzgar enerjisi kurulu güçlerine ülkeler bazında bakıldığında ilk üç sırayı Çin, ABD ve Almanya oluşturmaktadır. Bu üç ülkeyi İspanya, Hindistan, Birleşik Krallık ve İtalya takip etmektedir. Türkiye 2009 da dünya ülkeleri arasında 796,5 MW kurulu

rüzgar santrali ile 19. sırada iken 2010 yılında 1274MW ile 17.sıraya yükselmiştir [27]. Türkiye'de şebekeye bağlı rüzgar enerjisi ile elektrik üretimi 1998 yılında başlamış ve özellikle 2005 yılından itibaren özellikle 5346 sayılı Yenilenebilir Elektrik Kanununun çıkmasından sonra kurulu güç ve enerji üretiminde her yıl yüzde yüzün üzerinde artış göstermiştir. Kısmen veya tamamen işletmede olan rüzgar santralleri ile 2012 yılı itibariyle ise mevcut santrallerdeki kapasite artırımları ve eklenen yeni santrallerle 2312 MW'a ulaşmıştır. Marmara bölgesinde Balıkesir, İstanbul, Çanakkale, Ege bölgesinde İzmir, Manisa, Doğu Akdeniz çevresinde Hatay rüzgar santrallerinin yoğun olarak yer aldığı illerdir[27].

1.4. Rüzgar Türbinleri

Eski tarihlerden günümüze rüzgar türbinlerinin, değirmencilik, su pompalama sistemleri, ısı pompalarının çalıştırılması, soğutma sistemleri ve elektrik üretimi gibi kullanım alanları olmuştur. Günümüzde daha çok elektrik üretim amacıyla kullanılmaktadır. Rüzgar türbinleri, kanatlarının dönme eksenlerine göre sınıflandırılabilir. Kanatların dönme ekseni yatay ise bu tip rüzgar türbinlerine yatay eksenli (YERT), düşey ise bunlara da düşey eksenli (DERT) ismi verilir. Düşey eksenli rüzgar türbinleri yere yakın olduklarından ve bu yüksekliklerden rüzgar hızı düşük değerlerde olduğundan ilk harekete geçmeleri için ek bir motora ihtiyaç duymaları dezavantajlarından biridir. Bu ek motor büyük rüzgar türbinlerinde uygun görülebilir ancak küçük olanlar için gereksiz bir ek maliyet demektir. Düşey eksenli rüzgar türbinlerinin çalışmasının rüzgar yönüne bağlı olmaması ise en önemli üstün yanlarıdır. Düşey eksenli rüzgar tiplerine en iyi örnekler, Darrious ve Savinous rüzgar türbinleridir(Şekil 1.4) [28].



(a)Savinous (b) Darrieus

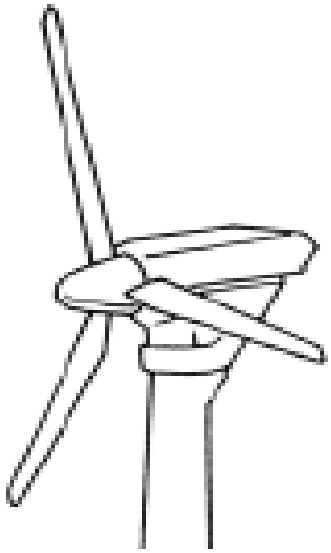
Şekil 1.4. Savinous ve Darrieus rüzgar türbinleri [28]

Yatay eksenli rüzgar türbinleri kanat sayılarına göre sınıflandırılabilir. Çok sayıda kanattan oluşanlarda yüksek tork oluşur ancak yavaş döndükleri için düşük güç elde edilir. Bundan dolayı 1, 2, 3 veya 4 kanatlı olanlar elektrik elde etmek için uygun iken çok sayıda kanattan oluşanlar daha çok su pompası olarak kullanımlara uygundurlar. Ayrıca, çok kanatlı olanların çapları büyüdükçe ağırlık artacağından bu tür türbinleri kurmak kolay değildir (Şekil 1.5)[28].



Şekil 1.5. Çok kanatlı rüzgar türbini[28]

Az sayıda kanat sayısı, maliyet avantajı sağlar. Ani rüzgar hızındaki değişimlerinden kaynaklanan basınç değişimlerinden çok fazla etkilenmezler. Yüksek verimi nedeniyle günümüzde elektrik üretim amaçlı kullanılan rüzgar türbinlerinin hemen hemen tamamı bu tip türbinlerdir. Tek dezavantajı çalışmaya başlamaları için gerekli rüzgar hızı diğerlerine oranla yüksektir (Şekil 1.6)[28].

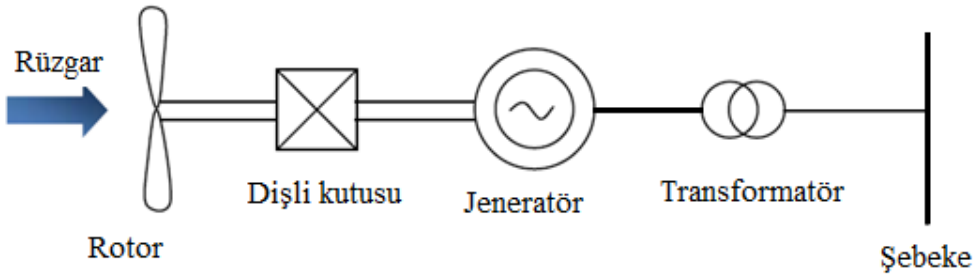


Şekil 1.6. Üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbini [28]

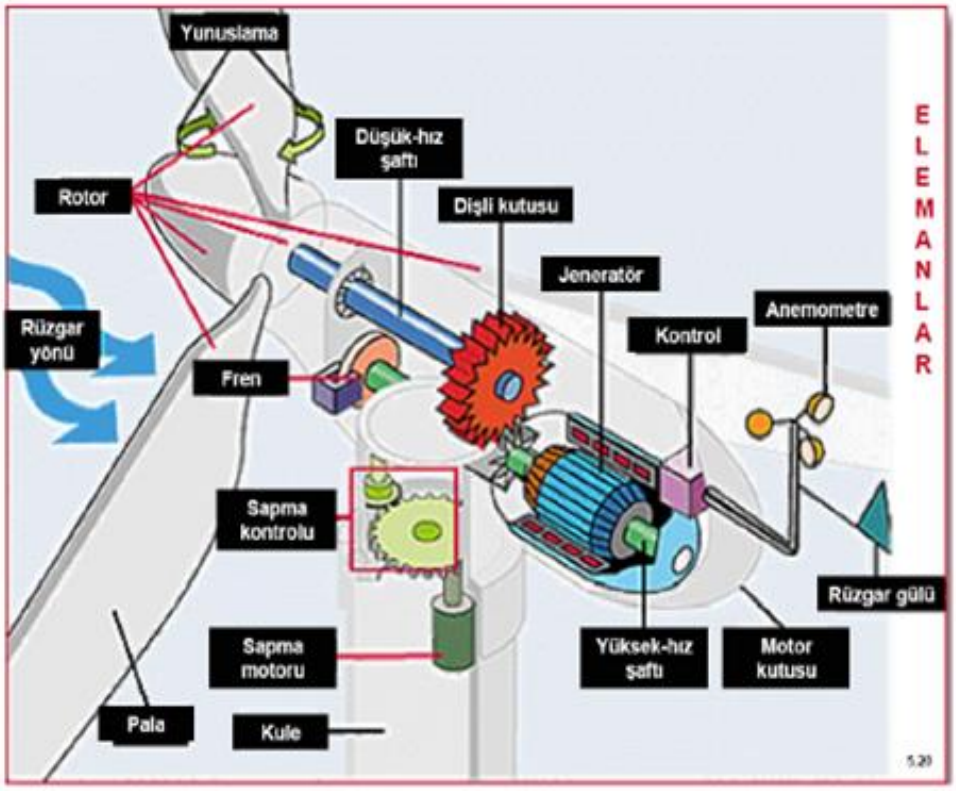
Rüzgar enerjisi ile dönen yatay eksenli rüzgar türbin kanat sisteminin dönme hızı, dişli kutusu ile hızlandırılarak elde edilen yüksek açısal hız ile magnetik alanda bulunan iletken teller (jeneratör) dönerler. Böylece elektrik elde edilir. Şekil 1.7 de gösterildiği gibi, jeneratörden elde edilen elektrik akımının gerilimi transformatör ile şebekeye göre ayarlanır. Transformatörden elde edilen elektrik enerjisi aküler vasıtasıyla depolanır veya doğrudan alıcılara ulaştırılır.

Elektrik üretiminde kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerinin ana parçaları; rotor kanatları (pala), fren sistemi, kanat sisteminin kule ekseni etrafında döndürülmesini sağlayan sapma (yaw) ve kanadın kendi ekseni etrafında döndürülmesini sağlayan

yunuslama (pitching) kontrol sistemleri, iletim sistemi (dişli kutusu), jeneratör ve kuledir (Şekil 1.8).



Şekil 1.7. Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü [28]



Şekil 1.8. Rüzgar türbin iç yapısı [28]

Kule yüksekliği, yüksekteki daha büyük rüzgar hızlarından yararlanmanın getirisi ile boya bağlı artış gösteren kule maliyeti arasındaki optimum çözümle belirlenir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

En yüksek güç üreten yatay eksenli rüzgar türbin kanat geometrisinin oluşturulmasında ve kanadın üretebileceği güç hesabında çeşitli teoremler kullanılmıştır. Bu çalışmada optimum rüzgar türbin kanat geometrisini oluştururken, ideal disk (Momentum-Betz) teoremi, kanat eleman teoremi, açısal momentum (Schmitz) teoremi kullanılmıştır. Elde edilen rotordan üretilebilecek maksimum güç hesabı için bu teoremlere ek olarak Prandtl uç kayıp faktörü ve Glauert düzeltme formülleri kullanılmıştır. Bu hesapların yapıldığı bir program, Excel'de geliştirilmiştir. Standart kanat kesit (airfoil) geometrisinde yapılan değişikliklerle oluşturulan yeni kanat kesit geometrilerinin aerodinamik analizleri HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) ile yapılmıştır.

2.1. Rotor Geometrisi

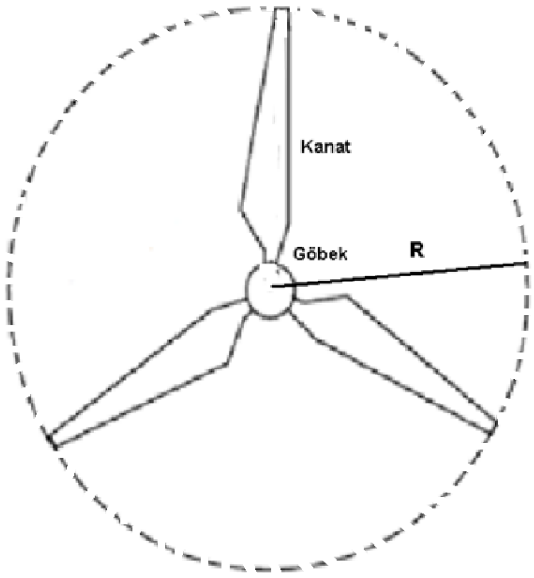
Rüzgardaki doğrusal hareketi dönme hareketine dönüştüren rüzgar türbin kanat sistemine rotor denir (Şekil 2.1). Bu sistem, kanatlardan ve göbek kısmından oluşur. Rüzgardan elde edilebilecek maksimum güç, en çok rotor geometrisine bağlıdır. Rotor geometrisi, kanat sayısına, rotor göbek kısmına, kanat uzunluğuna ve kanat geometrisini oluşturan kanat kesitine (airfoil) ve bu kesitlerin kanat boyunca yerleştirilmesine bağlıdır.

Kanat uzunluğu R, göbek kısmının yarıçapı R_0 olarak alınırsa kanatların süpürme alanı,

$$A = \pi(R^2 - R_0^2) \tag{2.1}$$

eşitliği ile hesaplanır. Türbin rotoru, bu alandan geçen rüzgarın gücünü mekanik güce çevirir. Rotor çapı D=2R dir. Rotor göbek kısmı, kanatların birleştirildiği ve kanatların dönme hareketini türbinin diğer sistemlerine taşıyan ilk kısımdır, küresel

biçime sahiptir. Güç kontrolü için, kanatların kendi eksenleri etrafında döndürme hareketi bu kısımda gerçekleşir.



Şekil 2.1. Rüzgar türbin kanat sistemi (rotor) [43]

Kanat sayısı, bir, iki, üç, dört, beş şeklinde kanat sayısı arttıkça güç verimi de artar. Ancak kanat sayısı her artmada güç verimindeki artma miktarı azalır. Üç kanattan sonra verimdeki artma, her ekstra kanat maliyeti ile karşılaştırıldığında dördüncü kanadın ekonomik olmayacağı ortaya çıkmaktadır. İki kanatlı rüzgar türbinlerinin üç kanatlı olanlara göre daha düşük verimlerine rağmen bir kanat eksik olmasından dolayı maliyet ve ağırlık gibi avantajları vardır. Ancak, iki kanatlı rüzgar türbinlerinin üç kanatlı olanlarla aynı çıkış gücünü verebilmeleri için daha büyük döndürme hızına ihtiyaç duyarlar; bu da aşırı gürültüye neden olur. Bir kanatlı türbinlerde ise yüksek hız gereksiniminden dolayı gürültü problemlerine ek olarak rotoru dengelemek için ters yönde ağırlık takviyesine gereksinim duyulur. Bu durumda da bir kanattan maliyet avantajı yok olur. Sonuç olarak; verim, maliyet, gürültü ve estetik görünüm açısından optimum kanat sayısının üç olduğu söylenebilir.

Kanat uzunluğu, rotor yüzey alanını ve böylece enerjisinden yararlanılacak rüzgar miktarını belirler. Rüzgar hızının büyüklüğünden sonra rotorun süpürdüğü alan bir rüzgar türbininin üretebileceği güç miktarını belirleyen en önemli değişkendir.
Kesit alanı A olan bir yüzeyden V_1 hızıyla birim zamanda geçen (ve yoğunluğu ρ olan) m rüzgar kütlesi,

$$\dot{m} = \rho A V_1 \tag{2.2}$$

eşitliği ile belirlenebilir. Bu kütlenin sahip olduğu kinetik enerji için

$$E_K = \frac{1}{2} m V_1^2 \tag{2.3}$$

eşitliği yazılır. Birim zamandaki kinetik enerji değişimi yani P güç değeri ise

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} V_1^2 \tag{2.4}$$

formülü ile hesaplanır. Buradan 2.4 eşitliğinde 2.2 bağıntısı yerine yazılırsa, P güç değeri için,

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \tag{2.5}$$

elde edilir. (2.5) formülünden anlaşılacağı gibi, bir rüzgar türbininde elde edilebilecek güç rüzgar hızının küpü ve rotor alanı (kanat uzunluğunun karesi) ile orantılıdır. Rüzgar hızı iki katına çıktığında elde edilebilecek güç değeri 8 katına çıkmaktadır. Bu da, rüzgar hızının güç üretiminde ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Rüzgar türbininin kanat uzunluğunu iki katına çıkarmak, süpürülen alanı dört katına çıkarmak demektir, bunun anlamı da üretilen rüzgar elektrik enerjisinin dört katına çıkması demektir. Elde edilmesi planlanan güç P_e ve türbini oluşturan kısımların verim oranları biliniyorsa (veya yaklaşık hesap olarak) bu gücü verecek türbinin kanat boyu,

$$P_e = \eta_m \eta_g \eta_t C_p \frac{1}{2} \rho \ \pi R^2 \ V_1^3 \qquad (2.6)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Burada,

η_m ; Mekanik verimi,

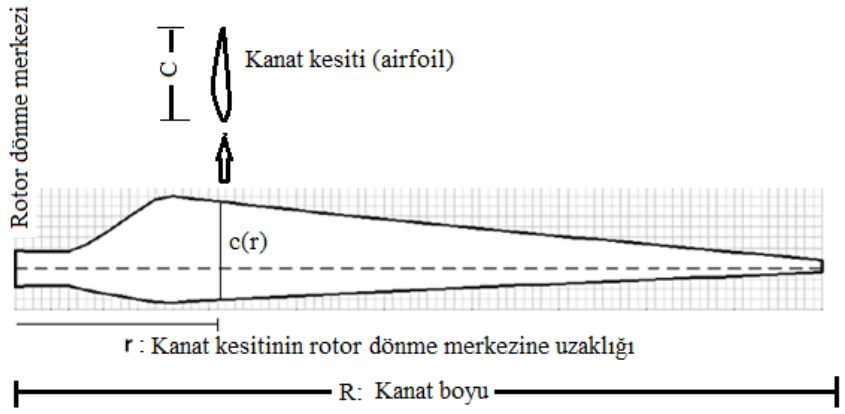
η_g ; Jeneratör verimi,

η_t ; Transformatör verimi,

C_p ; Güç çarpanını (rotor verimi) ifade etmektedir.

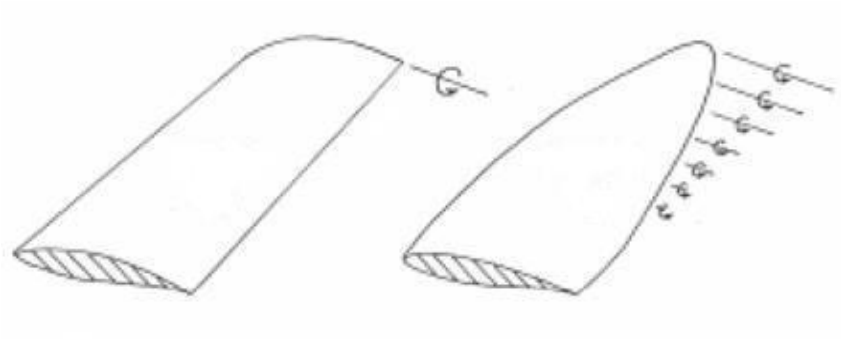
Kanat geometrisini, kanat genişliği (kanat kesit kiriş uzunluğu), özel tasarlanmış kanat kesiti (literatürdeki ismi airfoil), bu kanat kesitlerinin rotor düzlemine göre duruş açısı olan bağlanma açısı ve bu açının kanat boyunca değişimini gösteren burulma açısı oluşturur. Bu çalışmada bağlanma açısı beta (β) ile, burulma açısı ise teta (θ) ile gösterilmiştir.

Kanat kesit kiriş uzunluğu: Kanat genişliği, kanatların kesit kiriş uzunluğu olarak isimlendirilebilir. Bu çalışmada kanat kesit kiriş uzunluğu c ile gösterilmiştir. Kanat kesit kiriş uzunluğunun kanat boyunca değişimi c(r) ile ifade edilmiştir (Şekil 2.2) .



Şekil 2.2. Kanat kesit kiriş uzunluğu (c) [43]

Kanat kesit kiriş uzunluğu, türbin verimini etkileyen en önemli değişkenlerden biridir. Kanat kesit kiriş uzunluğunun en ideal (en fazla güç oluşturan) değerleri, Momentum (rüzgar hızında meydana gelen hız değişimi ile kuvvet ilişkisi) teoremi ve Kanat Eleman (kanat elemanına etkiyen kuvvetlerin tork oluşturması) teoremine göre hesaplanır. Ancak üretim zorlukları veya mukavemet nedenleri (malzemenin, meydana gelen gerilmelere dayanabilmesi gerekliliği) ile bu ideal ölçülerde bazı değişilikler yapılabilmektedir. Kanat geometrisini belirleyen aerodinamik modeller uç geometrisi hakkında herhangi bir bilgi vermekten uzaktırlar. Deneyimler sonucu, hücum kenarı tarafındaki köşesi yuvarlatılan kanat uçlarının Şekil 2.3 (a) iyi bir aerodinamik performans sağladığı gözlenmiştir [29]. Uç geometrisinden kaynaklanan gürültü seviyesini düşürmek için kullanılan kılıç biçimli bir diğer uç geometrisi (b) ise aerodinamik açıdan daha düşük bir performans sergiler. Uç geometrisini seçerken aynı zamanda performans ve gürültü arasında da bir seçim yapma gereği ortaya çıkmaktadır[29].

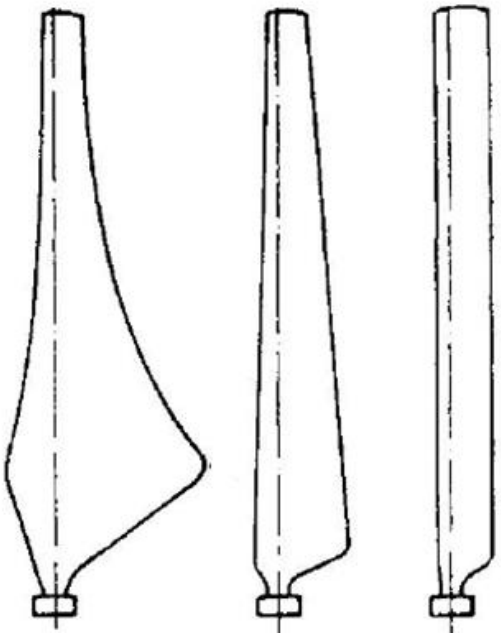


a)Aerodinamik performansı daha iyi b) Daha az gürültü oluşur

Şekil 2.3. Kanat uç geometrisi [29]

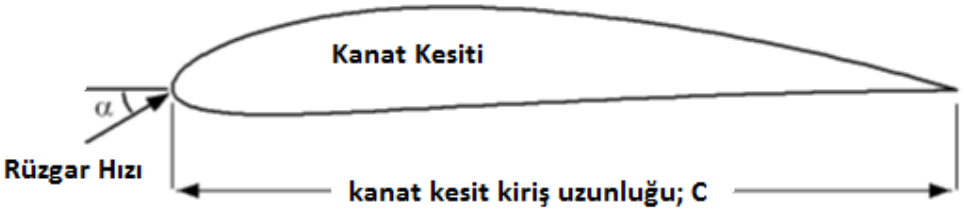
Buna bağlı olarak, kanat kesit uzunluğu, Şekil 2.4 de gösterildiği gibi ideal olabilir, lineer olarak değişebilir veya kanat boyunca sabit kalabilir. İdeal kanat kesit kiriş uzunluğunda yapılacak değişiklikler güç çarpan değerinde kayıplara neden olur. Kanat kesit uzunluğunda üstel fonksiyona göre yeniden düzenlendiğinde verimde yaklaşık % 0,2, kanat kesit kiriş uzunluğu, lineer azaltılması durumunda verim

yaklaşık % 1,5, kanat kesit kiriş uzunluğu sabit alındığında ise verim kaybı % 8 oranında olacaktır[30]. Bu kayıplar bu çalışmada yeniden hesaplanmıştır.



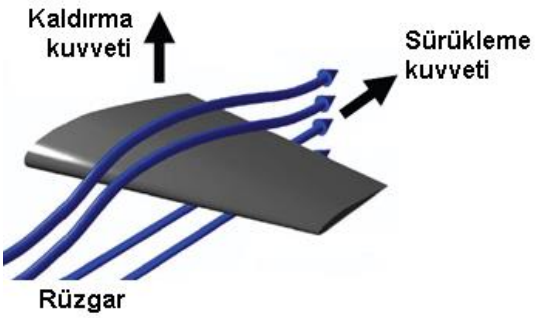
Şekil 2.4. Kanat kesit kiriş uzunluğuna göre farklı kanat geometrileri[31]

Kanat kesiti (airfoil): Rüzgar türbin kanadı, rüzgarın V doğrusal hızı ile kanadın rotor düzleminde ω açısal hızıyla dönmesini sağlayan özel tasarlanmış damla şeklindeki kanat kesitlerinden oluşturulur (Şekil 2.5).



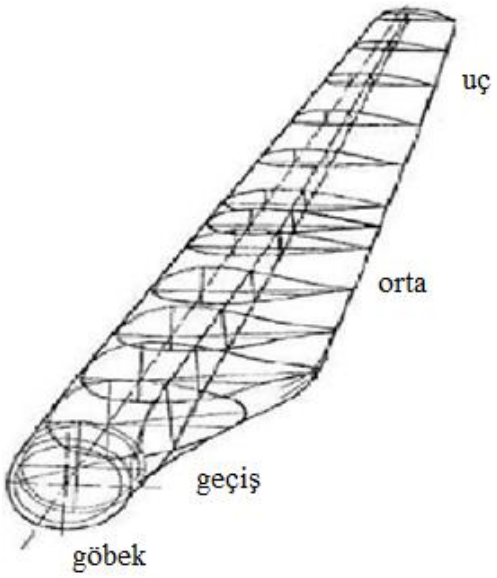
Şekil 2.5. Kanat kesiti [61]

Bu özel tasarlanmış kanat kesitlerinin geometrileri sayesinde, kanadın etrafında oluşan hız ve dolayısı ile basınç değişimi nedeniyle kaldırma ve sürükleme kuvvetleri oluşur. Kaldırma kuvveti sayesinde uçaklar havada düşmeden ilerlerken, rüzgar türbin kanatlarının dönmesi sağlanır. Rüzgar kesitinin alt ve üst kısmından geçerken kaldırma ve sürükleme kuvvetleri oluşur. Kaldırma kuvveti, rüzgar türbin kanatlarının dönmesini sağlar (Şekil 2.6.) [43].



Şekil 2.6. Rüzgar hızı ile kanatta oluşan kaldırma ve sürükleme kuvvetleri [61]

Kanat boyunca aynı kesit geometrisi kullanılabileceği gibi, farklı kesit geometrileri de seçilebilir. Kanat tasarımı yapılırken, Şekil 2.7. de gösterildiği gibi, önce göbek kısmında dairesel ve geçiş kısmında elips kesitler kullanılır daha sonra kanatlara dönme hareketi kazandıran kaldırma kuvvetinin oluşturduğu özel kanat kesitleri kullanılır. Kanadın göbek ve geçiş bölgesinin, güç üretimine bir katkısı olmadığı kabul edilir; güç, sadece özel kanat kesitlerinin kullanıldığı kısımlarda (göbek ve geçiş bölgesi dışında) üretilir.



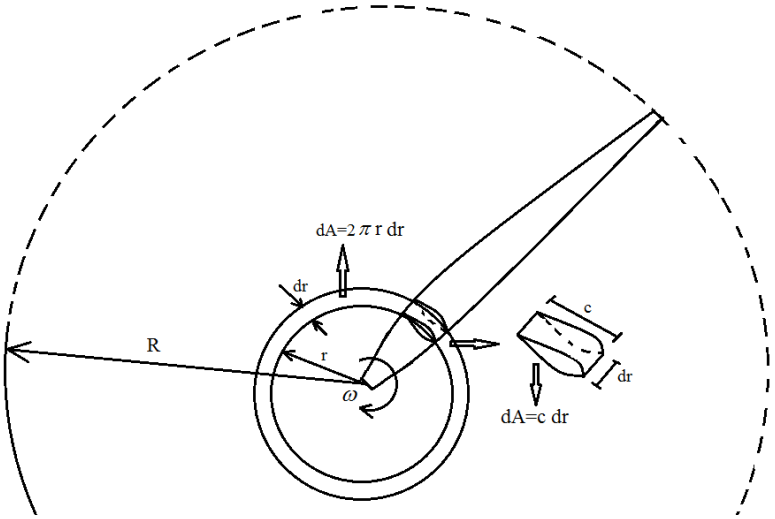
Şekil 2.7. Kanat boyunca kullanılan farklı kanat kesitleri[43]

Katılık oranı, rüzgar türbinlerinde rotor düzleminin hangi oranda kanat yüzeyi ile kaplandığı verim açısından önemlidir. Kanat sayısının ve kanat genişliğinin etkilediği bu oran, 'katılık oranı' denilen bir tanımla ifade edilir. Bir rotor için katılık oranı, rotoru oluşturan kanatların rotor düzlemindeki izdüşüm yüzey alanlar toplamının rotor alanına oranı olarak tanımlanır. Kanat, N tane kanat parçasına ayrıldığı düşünüldüğünde her bir parçaya kanat elemanı denir. Bir kanat elemanı için katılık oranı, kanat elemanının rotor düzlemindeki izdüşüm yüzey alanının, bu kanat elemanının rotor düzleminde süpürdüğü yüzey alanına oranı olarak tanımlanır ve σ ile gösterilir (Şekil 2.8.).

Kanat sayısı B, kanat elemanının rotor dönme merkezine (eksenine) uzaklığı r, kanat kesit kiriş uzunluğu c ve kanat eleman uzunluğu dr ise katılık oranı;

$$\sigma = \frac{B\ c\ dr}{2\pi r\ dr} = \frac{B\ c}{2\pi r} \tag{2.7}$$

eşitliği ile hesaplanır.

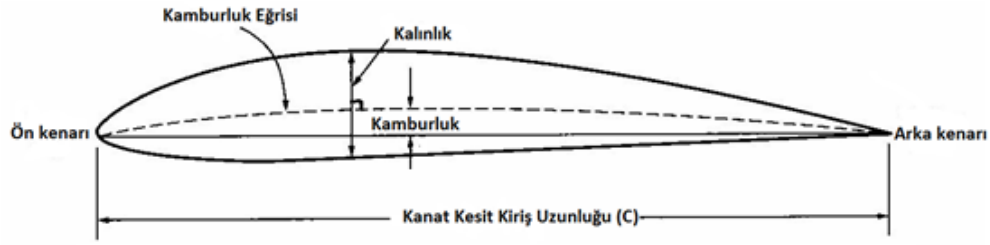


Şekil 2.8. Katılık oranı ve kanat elemanı[43]

2.2. Kanat Kesitleri (Airfoil) Ve Aerodinamik Özellikleri

Rüzgar türbinlerinin verimini etkileyen en önemli unsurlarından birisi kanat aerodinamiğidir. Kanat kesit geometrilerinin aerodinamik tasarımı tüm kanadın performansını, dolayısı ile de rüzgar türbininin toplam verimini etkiler (Hansen, 2008)[69].

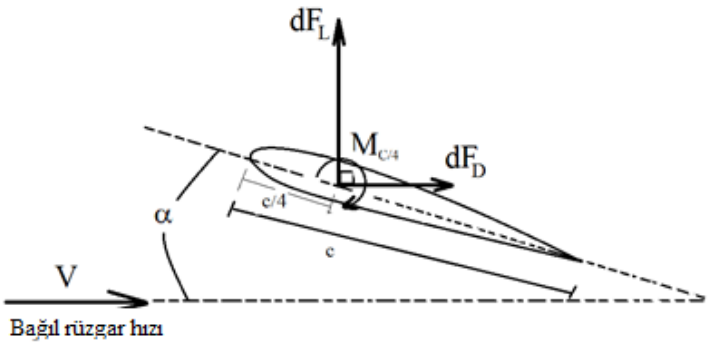
Özel tasarlanmış standart kanat kesitleri iki eğri yüzeyden oluşur. Kesitlerin uzunlukları, kanat kesit kiriş uzunluğu (veter, chord) olarak isimlendirilir ve c ile gösterilir. İki yüzey arasındaki dikey uzunluk ise kanat kesit kalınlığı diye isimlendirilir ve t ile gösterilir. Kesitin, akışı karşılayan ön kısmına ön (hücum) kenar, diğer kısmına arka (firar) kenar ismi verilir. Bu iki ucu birleştiren doğruya kanat kesit kiriş hattı (veter) denir. Üst ve alt yüzeylerin ortasından geçip ön kenar ile arka kenarı birleştiren eğriye kamburluk eğrisi denir. Bu eğri ile kiriş hattı arasındaki dikey uzaklık ise kamburluk olarak isimlendirilir (Şekil 2.9.) [60].



Şekil 2.9. Kanat kesit geometrisi [60]

Kanat kesitine V hızı ile gelen akışkan (hava), bu kesitin özel tasarlanmış geometrisi sayesinde alt ve üst yüzeyleri arasında basınç farkı oluşturur. Bu basınç farkı sayesinde akış doğrultusuna dik bir dF_L kaldırma kuvveti (lift) meydana gelir. V hızının kanat kesit kiriş hattı ile yaptığı açıya hücum açısı denir ve α ile gösterilir. Burada kaldırma kuvveti, dr uzunluğundaki kanat elemanı için yazıldığı için F_L yerine dF_L simgesi kullanılmıştır. F_L nin birimi N (Newton) iken dF_L nin birimi (birim uzunluk başına etkiyen kuvvet olduğundan) N/m olur.

Kanat kesitinde kaldırma kuvveti dışında ikinci bir kuvvet oluşur. Akış doğrultusunda meydana gelen bu kuvvet sürükleme kuvveti (drag) olarak isimlendirilir ve dF_D ile gösterilir. Bu iki kuvvetin dışında, kanat kesitini saat yönünde dönmeye zorlayacak şekilde bir de moment oluşur. Kaldırma ve sürükleme kuvvetlerinin uygulama noktası düşük hızlı akışkana maruz kalan kesitlerde, kanat kesitinin ön hücum kenarının 1/4 gerisindedir (Şekil 2.10) [64].



Şekil 2.10. Kaldırma ve sürükleme kuvvetleri[43]

V havanın hızı, kanat elemanında oluşan dF_L kaldırma kuvveti ve dF_D sürükleme kuvveti olmak üzere, C_L kaldırma kuvvet katsayısı,

$$C_L = \frac{dF_L}{\frac{1}{2}\,\rho\, V^2\, c\, dr} \tag{2.8}$$

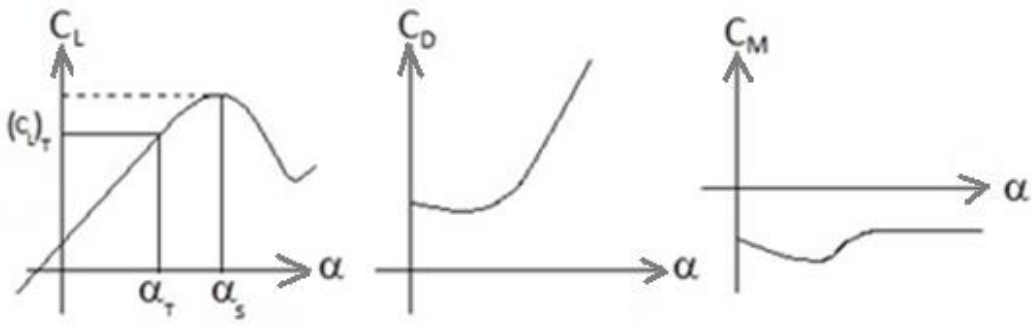
C_D sürükleme kuvvet katsayısı,

$$C_D = \frac{dF_D}{\frac{1}{2}\,\rho\, V^2 c\, dr} \tag{2.9}$$

şeklinde tanımlanırlar. Burada C_L ve C_D birimsiz katsayılardır. Kanat elemanında oluşan dM moment ise C_M moment katsayısı,

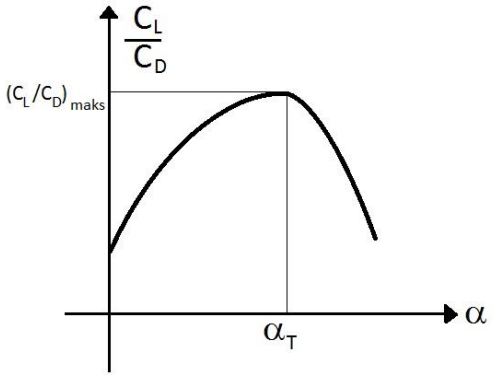
$$C_M = \frac{dM}{\frac{1}{2}\,\rho\, V^2\, c^2\, dr} \tag{2.10}$$

biçiminde tanımlanır. C_L kaldırma ve C_D sürükleme kuvvet katsayıları α hücum açısıyla değişirken, C_M moment katsayısı hücum açısıyla pek fazla değişmez. Bu katsayıların hücum açısına göre değişen değerleri polar grafikler ismi ile anılan grafiklerle gösterilir. Şekil 2.11 de stall açısı α_s, tasarım hücum açısı α_T ile gösterilmiş ve C_L kaldırma katsayısının C_D sürükleme kuvvetinin ve C_M moment katsayısının α hücum açısına göre değişimlerini gösteren polar grafikler gösterilmiştir[61].



Şekil 2.11. Polar grafikler [61]

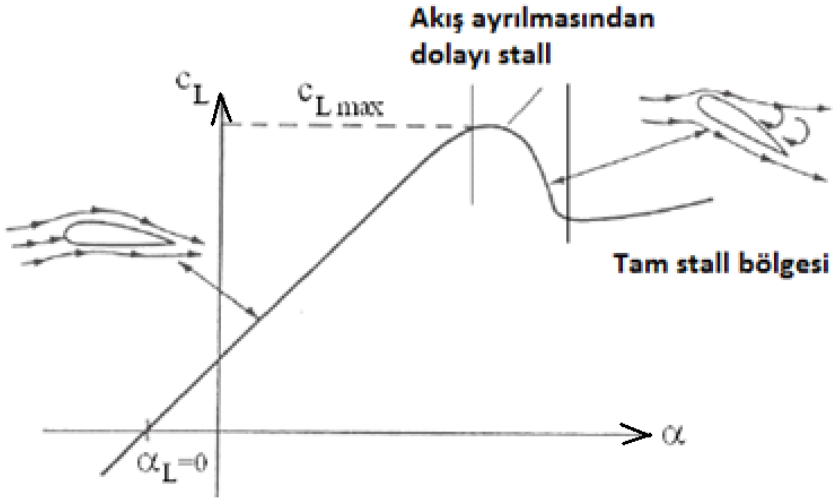
Kaldırma/sürükleme oranının en yüksek olduğu açı, rüzgar türbinlerinde tasarım açısı olarak alınır (Şekil 2.12) [69].



Şekil 2.12. Tasarım hücum açısı[64]

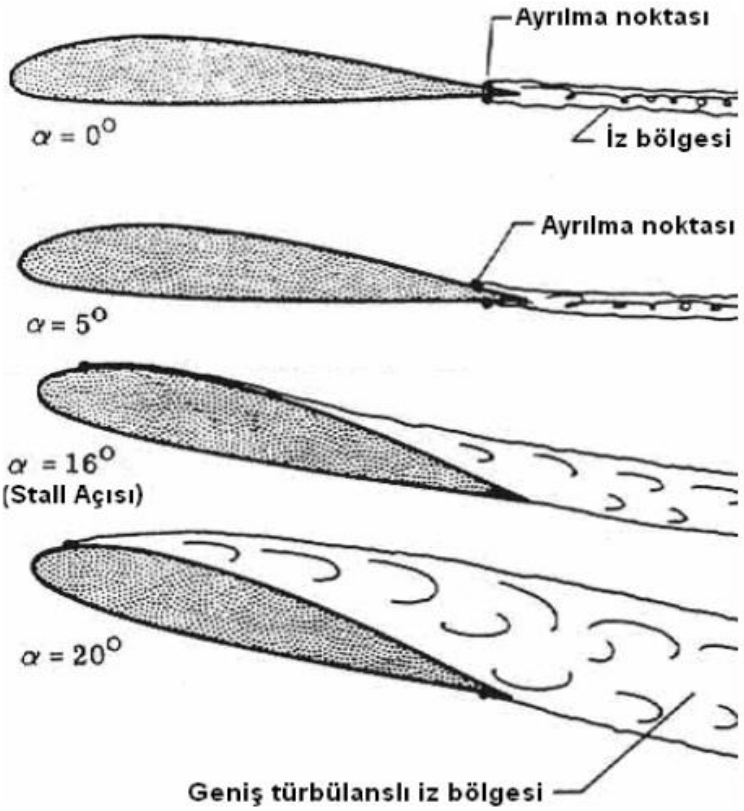
Hücum açısı arttıkça C_L ve C_D değerleri artar. Ancak bu artış, hücum açısının kritik bir değerine kadar (10^0 ile 20^0 arasında) devam eder ve bu açıdan sonra C_L değeri azalmaya başlarken C_D değeri hızla artmaya devam eder (Şekil 2.13). Bu kritik açıya kadar akış, kanat kesit üst yüzeyinde yüzeye uyumlu bir şekilde hareket ederken hücum açısının artmasıyla birlikte akış yüzeyden ayrılmaya başlar [64].

Akış ayrılmasının ön uca yaklaşmasıyla beraber C_L değeri azalmaya başlar. Bu olaya 'stall' veya 'tutunma kaybı' denilir ve bu açıya stall açısı denir. Şekil 2.11 de gösterildiği gibi, stall öncesinde C_L kaldırma katsayısı α hücum açıyla artar, α_S stall hücum açısında maksimum değerine ulaşır. Stall sonrası ise C_L azalır[64].



Şekil 2.13. Kanat kesitinin üç farklı akış bölgesindeki davranışı [60]

Bu ayrılma kanat kesitinin arka ucunda başlar ve hücum açısının artmasıyla birlikte ön uca doğru kayar (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Stall olayı [60]

Kaldırma ve sürükleme kuvvetlerinin oluşmasının sebebi, cisim etrafında oluşan basınç değişimi ve yüzey sürtünmesidir. C_f yüzey sürtünme katsayısı olup kayma gerilmesinin dinamik basınca oranı olarak tanımlanır. C_P basınç katsayısı olup statik basınç farkının dinamik basınca oranı olarak tanımlanır. Kanat kesit yüzeyindeki C_P basınç ve C_f sürtünme katsayılarının dağılımı bilinirse C_L ve C_D katsayıları belli bir hücum açısında hesaplanabilir. P_0 açık hava basıncı, P akışkanın statik basıncı, V akışkanın hızı olmak üzere, basınç katsayısı C_P

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2}\rho V^2} \tag{2.11}$$

eşitliği ile verilir.

Sürtünme katsayısı C_f,

$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\,\rho\, V^2} \tag{2.12}$$

eşitliği ile verilir. τ terimi, kayma gerilmesini (shear stress) ifade eder ve

$$\tau = \mu \left.\frac{\partial U}{\partial y}\right|_{y=0} \tag{2.12}$$

şeklinde tanımlanır. Burada, $\left.\frac{\partial U}{\partial y}\right|_{y=0}$ terimi yüzeydeki hız profilinin eğimini, μ terimi havanın dinamik viskozitesini ve $\frac{1}{2}\rho\, V^2$ terimi dinamik basıncı ifade eder[58]. Kanat kesitinin hem alt hem de üst yüzeyi üzerindeki basınç katsayı C_P ve yüzey sürtünme katsayı C_f dağılımı bilinirse, kanat kesit kiriş (x) doğrultusunda oluşan eksenel kuvvet katsayısı C_x ile bu doğrultuya dik (y) oluşan normal kuvvet katsayısı C_y aşağıdaki eşitliklere göre hesaplanabilir[58].

$$C_y = \frac{1}{c}\left[\int_0^c \left(c_{p,alt} - c_{p,üst}\right)dx + \int_0^c \left(c_{f,üst}\frac{dy_{üst}}{dx} - c_{f,alt}\frac{dy_{alt}}{dx}\right)dx\right] \tag{2.13}$$

$$C_x = \frac{1}{c}\left[\int_0^c \left(c_{p,üst}\frac{dy_{üst}}{dx} - c_{p,alt}\frac{dy_{alt}}{dx}\right)dx + \int_0^c \left(c_{f,üst} + c_{f,alt}\right)dx\right] \tag{2.14}$$

C_y ile C_x değerleri hesaplandıktan sonra,V akış doğrultusundaki C_D sürükleme kuvvet katsayısı ile akış doğrultusuna dik oluşacak C_L kaldırma kuvvet katsayısı, α hücum açısına göre aşağıdaki formüllerle hesaplanır [64].

$$C_L = C_y \cos\alpha - C_x \sin\alpha \tag{2.15}$$

$$C_D = C_y \sin\alpha + C_x \cos\alpha \tag{2.16}$$

Kanat kesitlerinin aerodinamik karakterleri, Reynold sayısından etkilenmektedir. Atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanan Reynold sayısı,

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho\, V\, c}{\mu} \tag{2.17}$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada V havanın cisme göre bağıl hızını, μ terimi havanın dinamik viskozitesini, ρ havanın yoğunluğunu, c cismin karakteristik uzunluğunu (kanat elemanı için bu uzunluk kanat kesit kiriş uzunluğu c alınır) ifade eder. Reynold sayısının büyüklüğü akışın laminer veya türbülans olduğunu belirler. Akışta düzenlilik varsa laminar akış, akışta yüzeye dikey veya dairesel hareketler varsa türbülans akış oluşur. Reynold sayısı arttıkça; akım alanında atalet kuvvetlerinin hakimiyeti artar, viskoz kuvvetlerin etkinliği dar bir bölge içerisinde (sınır tabaka) kalır ve sınır tabaka daha çabuk türbülanslı hale geçer. Böylece yüksek Reynold sayı değerlerinde ayrılma olayı daha geç olacağından kaldırma katsayı değeri artarken sürükleme katsayı değeri azalır.

Rüzgar türbinlerinde kullanılan kanat kesit geometrileri, rüzgar türbin büyüklüğüne ve rüzgar hızı ile rotor dönme hızına göre değeri değişen farklı Reynold sayı değerlerinde bulunurlar. Çünkü rüzgar türbin kanat elemanında hız olarak, rüzgar hızı V yerine bağıl rüzgar hızı W alınır. W bağıl hızı ise V rüzgar hızı, ω kanat açısal hızı ve r (R kanat uzunluğuna ve kanat elemanın kanat üzerinde bulunduğu yere bağlı) uzunluğunun fonksiyonudur. Bir rüzgar türbininin kök kısmından uç kısmına bile bu sayının değeri değişir; çünkü kanat boyunca W bağıl rüzgar hızı ve kanat kesit kiriş uzunluğu (c) değişir. Reynold sayısının değişmesi kanat kesitinin aerodinamik katsayı değerlerinin de değişmesine sebep olur [58]. Bu çalışmada düşük rüzgar hızında çalışan küçük rüzgar türbini tasarımı yapıldığından seçilen kanat kesitlerin aerodinamik değerleri düşük Reynold sayı değerinde alınmıştır. Standart kanat kesitlerinin aerodinamik özellikleri, literatürde belli Reynold sayı değerlerinde verilmesi ve bu değerlerin farklı Reynold sayı değerlerinde kullanılması hatalara neden olmaktadır.

2.2.1. Rüzgar Türbin Kanat Kesit Özellikleri

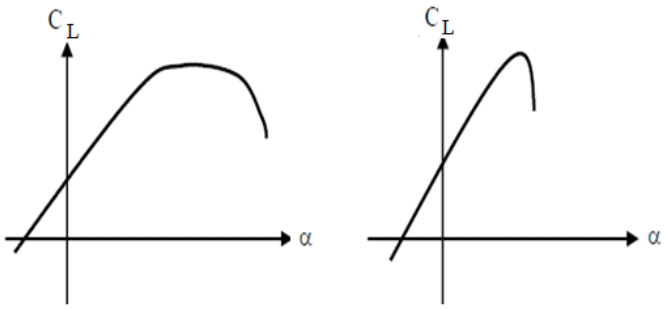
Kanat kesit seçiminde kritik nokta, yüksek kaldırma/sürükleme oranına ve düşük momente sahip geometrinin seçilmesidir. Modern rüzgar türbin kanat kesitlerinin uç kısımlarında yüksek kaldırma/sürükleme oranına sahip ince kanat kesitleri kullanılırken kanadın kök kısmına yakın bölgelerinde mukavemet ihtiyacından dolayı aynı geometriye sahip ancak kalın kanat kesitleri kullanılır. Kalın kanat kesitleri havacılık endüstrisinde pek kullanılmaz. Çünkü bu tip kanat kesitlerin kaldırma/sürükleme oranları düşüktür. Dolayısıyla rüzgar türbinleri için kalın kanat kesitlerinde yüksek kaldırma/sürükleme oranını elde etmek özel bir çalışma alanı oluşturmuştur [28].

Rüzgar türbin kanatlarında düşük Reynold sayı değerlerindeki aerodinamik özellikleri daha önemlidir. Çünkü rüzgar türbinleri uçak kanatlarına kıyasla çok daha düşük rüzgar hızlarına maruz kalırlar. Ancak çok büyük rüzgar türbinlerinde Reynold sayı değeri, küçük rüzgar türbinlerine göre daha büyüktür. Bağıl rüzgar hızı W, kanat kesit kiriş uzunluğu c olmak üzere reynold sayı değeri yaklaşık olarak [28],

$$\mathrm{Re} = 68500\, c\, W \tag{2.18}$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Küçük rüzgar türbinlerinde Reynold sayısı 100 bin-300 bin arasında değerler alırken büyük rüzgar türbinlerinde bu değer 10 milyon değerine kadar artabilmektedir.

Stall olayı, havacılıkta çok tehlikeli olarak kabul edilir. Uçak stall durumuna girerse uçağı havada tutan kaldırma kuvveti aniden azalır ve uçak yükseklik kaybeder. Rüzgar türbinlerinde ise bu olay, aşırı rüzgar hızlarında jeneratöre gelen fazla gücü ve kanatlara gelen fazla gerilme kuvvetlerini sınırlandırmak için kullanılır. Rüzgar türbin kanat kesitleri, stall durumuna çok hızlı girerse, ekstra dinamik kuvvetler ve titreşimler oluşacağından, türbin kanat kesitleri stall durumuna yavaşça geçmelidir (Şekil 2.15).



(a) yumuşak stall geçişi (b) sert stall geçişi

Şekil 2.15. Kanat kesitinin stall karakteri[28]

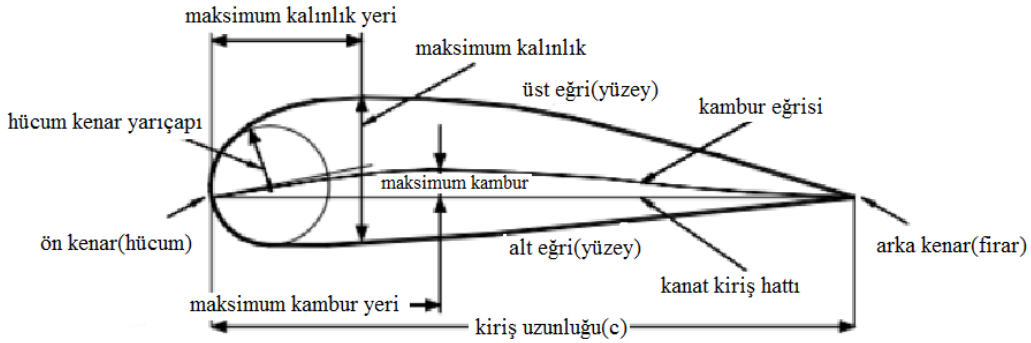
Tasarım dışı şartlarda rüzgar türbinin, özellikle stall durumlarında fazladan oluşan kuvvetlere dayanıklı olması için ve toz-toprak kirliliğinin oluşturduğu şekil bozukluklarına karşı duyarlılığını azaltmak amacıyla özel rüzgar türbin kanat kesitleri geliştirilmektedir. Süper mekanik özelliklere sahip malzemelerin kullanılması kanat kök kısmında daha ince kanat kesit kullanım imkanı oluşturmuştur. Yüksek kaldırma değerine sahip ince kanat kesitlerinin kullanılması da kanat kesit kiriş uzunluğunu küçültür ve dolayısıyla daha az malzeme kullanılmasına neden olur. Kanat kesit seçiminde, üretim zorlukları da dikkate alınmalıdır. NACA 4412 kanat kesiti üretim açısından uygun olan türlerdendir çünkü bu kanat kesitinin alt yüzeyi düz bir yüzeye çok yakındır [28]. Çizelge 2.1, kanadın farklı bölgelerinde değişen bağıl rüzgar hızını ve mukavemet gereksinimlerini düşünerek gerek duyulan kanat kesitlerinin özelliklerini özetlemektedir.

Çizelge 2.1. Kanadın farklı bölgeleri için gerek duyulan kanat kesit özellikleri [28]

Gerek duyulan kanat kesit özelliği	Kanat kök bölgesi	Kanat orta kısım	Kanat uç bölgesi
Kalınlık/kesit kiriş uzunluğu oranı(%)	>27	27-21	21-15
Mukavemet yüklerini karşılama gereksinimi	yüksek	orta	düşük
Geometrik bütünlük	orta	orta	orta
Hücum kenarı pürüzlülüğüne karşı maksimum kaldırmanın duyarlılığı	-	-	Yüksek
Tasarım dışı çalışma şartlarındaki kaldırmanın, tasarım kaldırma değerine yakın olması	-	düşük	orta
Maksimum C_L değeri ve stall sonrası karakteri	-	düşük	yüksek
Az gürültü oluşması	-	-	yüksek

2.2.2. Standart Kanat Kesitleri

Yüksek kaldırma ve düşük sürükleme kuvvetlerinin oluşmasının sağlandığı özel tasarlanmış kanat kesitlerinin geometrileri, kamburluk, kalınlık, maksimum kalınlık ile maksimum kamburluğun kiriş uzunluğuna göre miktarları ve kiriş üzerindeki konumları ile ifade edilir. Bu tanımlar Şekil 2.16 da gösterilmiştir[44].



Şekil 2.16. Kanat kesit geometrisinde tanımlar[61]

Kiriş hattı x ekseni ile, kamburluk ve alt-üst eğrilerin ordinatları y ile gösterilmiştir. Maksimum kalınlık maksimum kamburluk y değerleri ve konumlarının x değerleri, üst ve alt eğrilerin (x,y) koordinatları, kamburluk eğrisinin (x,y) koordinatları, kanat kesit kiriş uzunluğuna (c) bölünerek boyutsuz olarak ifade edilir.

NACA 4412 kanat kesitinin içinde bulunduğu dört basamaklı NACA serisi olarak tanımlanan kanat kesitleri için kambur eğrisi ve bu çizgiye dik olarak tanımlanan ve kesitin üst ve alt yüzeylerinin oluşturulmasında kullanılan kesit kalınlıkları; kiriş hattı boyunca tanımlanan boyutsuz mesafe x cinsinden aşağıdaki denklemlerle tanımlanmıştır. m değişkeni boyutsuz maksimum kamburluk miktarını, p değişkeni maksimum kamburluğun kiriş hattı üzerindeki konumunu gösterir, t ise kesitin maksimum kalınlığını ifade etmektedir [44]. Kamburluk eğrisinin ordinatı maksimum kamburluk konumundan öncesi için; $0 \le p \le x$,

$$y = \frac{m}{p^2}\left(2px - x^2\right) \tag{2.19}$$

denklemi ile verilirken, maksimum kamburluk sonrası için; $p \le x \le 1$,

$$y = \frac{m}{\left(1-p\right)^2}\left[\left(1-2p\right) + 2px - x^2\right] \tag{2.20}$$

denklemi ile verilmektedir[44]. Geometrinin alt ve üst yüzeylerinin koordinatlarını kamburluk eğrisinin ordinatına aşağıdaki denklemle verilen y değeri eklenerek üst yüzey, çıkartılarak alt yüzey ordinatı elde edilir.

$$\pm y = \frac{t}{0,2}\left[0,2969\sqrt{x} - 0,126x - 0,3516x^2 + 0,2843x^3 - 0,1015x^4\right] \tag{2.21}$$

Dört rakamlı NACA kanat kesitlerinin isimlendirilmesinde kullanılan rakamların ne anlama geldiği şu şekilde açıklanabilir: Dört rakamdan soldan birincisi, kambur eğrisinin maksimum ordinat değerini kiriş uzunluğunun yüzdesi olarak ifade eder. Soldan ikinci rakam, maksimum kamburluğun olduğu yerin hücum kenarından uzaklığını kiriş uzunluğunun onda biri olarak gösterir. Son iki rakamın oluşturduğu

iki basamaklı sayı ise kesitin maksimum kalınlığını kanat kesit kiriş uzunluğunun yüzdesi olarak ifade eder [44].

NACA 4412 için m, p ve t değerleri: Kambur eğrisinin maksimum ordinat değeri, kanat kesit kiriş uzunluğunun %4 üne eşittir; dolayısı ile m=0,04 olur. Maksimum kamburluğun olduğu yerin hücum kenarına uzaklığı; kanat kesit kiriş uzunluğunun 4/10 una eşit olduğundan; p=0,4 olur. Maksimum kalınlık, kanat kesit kiriş uzunluğunun % 12 sine eşit olduğundan; t=0,12 olur.

NACA beş rakamlı kanat kesitlerindeki rakamlar ise şu şekilde izah edilebilir: Soldan birinci rakam, C_L tasarım kaldırma katsayısının kamburluk miktarına göre anlatımıdır. Bu rakamın 3/2 katı, C_L tasarım katsayısının on katına eşittir. İkinci ve üçüncü rakamlar birlikte maksimum kamburluğun olduğu yerin hücum kenarına olan uzaklığını kanat kesit kiriş uzunluğunun yüzdesi olarak ifade eder. Bu iki rakamın oluşturduğu iki basamaklı sayının yarısı, maksimum kamburluk yerinin hücum kenarına uzaklığının kanat kesit kiriş uzunluğunun yüzde kaçı olduğunu gösterir. Son iki rakam ise maksimum kalınlığın kanat kesit kiriş uzunluğunun yüzde kaçı olduğunu gösterir [44].

Örneğin, NACA 23012 için: 30 sayısı; maksimum kamburluk yerinin hücum kenarına uzaklığı: kiriş uzunluğunun % 15. 12 sayısı; maksimum kalınlık: kanat kesit kiriş uzunluğunun % 12 sine eşittir[44].

Diğer standart kanat kesitlerinin (NREL, FFA, DU, FX, RISO,... serilerine ait kanat kesitler) geometri tanımları kendilerine özel olup bazılarında polinom fonksiyonlar kullanılarak yüzey koordinatları ifade edilebilmektedir.

Türbin kanatlarında kullanılacak standart kanat kesitlerinin seçiminde göz önüne alınacak en önemli kriterler özetle şöyle sıralanabilir:

- Yüksek C_L/C_D oranı
- Kesit yüzeyinin pürüzlülüğüne karşı hassasiyetin düşük olması
- Güç kontrolü sistemine uygun stall davranışı

Bu gereksinimler, eski türbinlerde kullanılan uçak kanat kesitleri yerine, türbin veriminin artmasını sağlayacak, rüzgar türbinlerine özel kanat kesit tasarımının yolunu açtı.

Bu ihtiyaçlara uygun olarak tasarlanmış olan ve rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılan bazı standart kanat kesitleri şunlardır: DU serisi, (Delft Üniversitesi Hollanda), NREL serisi (Ulusal Yenilenebilir Enerji Labaratuarı, ABD), FFA serisi (İsveç Havacılık Araştırmaları Enstitüsü), FX serisi (Althaus ve Wortmann), RISO serisi (Riso Ulusal Laboratuarı, Danimarka), NACA dört ve beş basamaklı serileri. Bu çalışmada kullanılan standart kanat kesitleri şunlardır:

1. NACA 0012
2. NACA 4412
3. NACA 23012
4. NACA 63-215
5. NREL S 809
6. FFA-W3-211
7. DU 93-W-210
8. RIS0 A1-21

Bu çalışmada kullanılan kanat kesitlerinin stall öncesi aerodinamik (kaldırma ve sürükleme) katsayı değerleri akademik kaynaklardan alınmıştır. Bu kaynaklarda verilen aerodinamik katsayılar kullanılarak polinom fonksiyonları oluşturulmuştur:

$$C_L = k_0 + k_1\alpha + k_2\alpha^2 + k_3\alpha^3 + k_4\alpha^4 \tag{2.22}$$

$$C_D = k_0 + k_1\alpha + k_2\alpha^2 + k_3\alpha^3 + k_4\alpha^4 \tag{2.23}$$

Bu fonksiyonlar kullanılarak Excel'de oluşturulan programda, stall öncesi her hücum açısı için kaldırma ve sürükleme katsayılarının hesaplanması sağlanmıştır. Stall sonrası için aerodinamik katsayı değerlerinin hesaplanmasında ise, düz levha kabülüne ve deneysel elde edilen sonuçlara göre düzenlenen Viterna eşitlikleri [32] kullanılmıştır. Bu eşitlikler hücum açısının stall açısı ile 90 derece arasında olduğu aralıkta kullanılmıştır. Viterna eşitlikleri aşağıda verilmiştir:

$$C_L = A_1 \ sin(2\alpha) + \frac{A_2 \ cos^2\alpha}{sin^2\alpha} \tag{2.24}$$

$$C_D = B_1 \ sin^2(\alpha) + B_2 \ cos(\alpha) \tag{2.25}$$

$$A_1 = \frac{B_1}{2} \tag{2.26}$$

$$A_2 = \left[(C_L)_s - \left(C_{D_{maks}} \right) sin(\alpha_s) \ cos(\alpha_s) \right] \left[\frac{sin(\alpha_s)}{cos^2(\alpha_s)} \right] \tag{2.27}$$

$$B_1 = C_{D_{maks}} \tag{2.28}$$

$$B_2 = C_{Ds} - \frac{\left(C_{Dmaks} \right) \ sin^2(\alpha_s)}{cos(\alpha_s)} \tag{2.29}$$

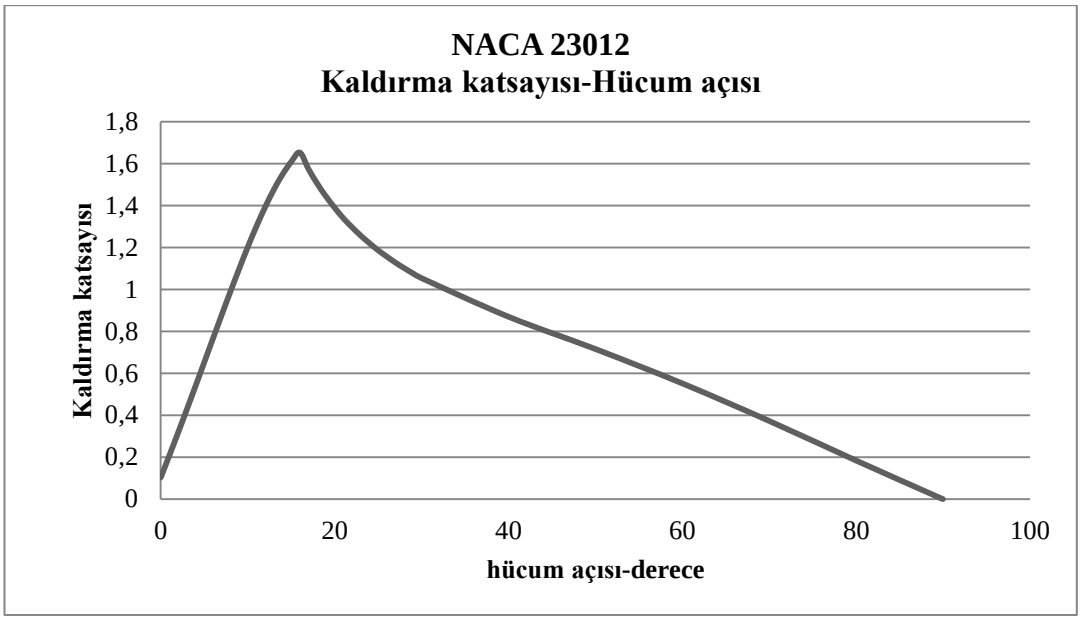
$$C_{Dmaks} = 1{,}11 + 0{,}18 \ AR \tag{2.30}$$

Burada kullanılan simgelerin anlamları şöyledir: α; hücum açısı, α_S; stall açısı, $C_{D_{maks}}$; maksimum sürükleme katsayısı, C_{Ds}; stall açısındaki sürükleme katsayısı, AR; en-boy oranı (aspect oranı). Örnek olarak, NACA 23012 için elde edilen bu değerler Çizelge 2.2 de verilmiştir.

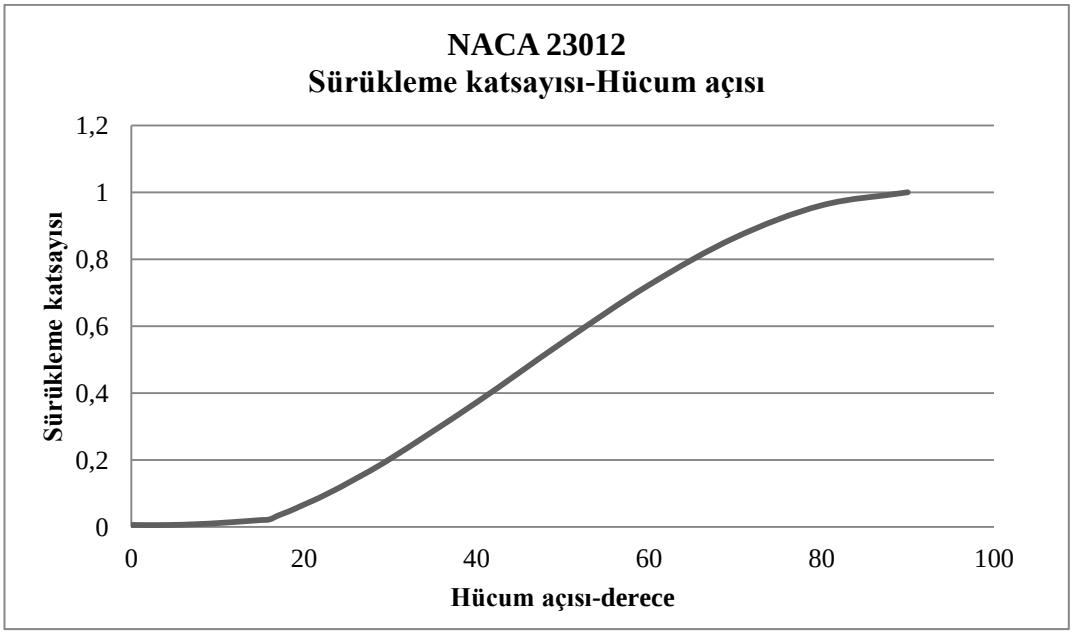
Çizelge 2.2. NACA 23012 Aerodinamik katsayılar

NACA 23012	C_L	C_D	
k_0	0,10318	0,00604	
k_1	0,10516	-0,00036	stall öncesi için
k_2	0,001048	5,43E-05	
k_3	7,35E-06	6,53E-06	
k_4	-6,6E-06	-2,8E-07	
Stall açısı	16 derece	-	
Stall açısındaki C_L	1,653	-	
Stall açısındaki C_D	0,0225	-	
B_1	1,29	-	stall sonrası için
B_2	-0,0556	-	
A_1	0,5	-	
A_2	0,414	-	

Çizelge 2.2 deki değerler kullanılarak NACA 23012 kanat kesitinin C_L nin ve C_D nin, 0 derece ile 90 derece aralığındaki hücum açılarında sahip olduğu değerlere göre yeniden oluşturulan polar grafikleri Şekil 2.17 ve Şekil 2.18 de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. NACA 23012 Kaldırma katsayısı (C_L)-hücum açısı polar grafiği



Şekil 2.18. NACA 23012 Sürükleme katsayısı(C_D)-hücum açısı polar grafiği

NACA 23012 için yapılan çalışmaların aynıları diğer standart kanat kesitleri içinde yapılmıştır. Bu kanat kesitlerinin geometrileri ve aerodinamik özellikleri Ek-1 ve Ek-2 de verilmiştir.

2.2.3. Standart Kanat Kesitinden Yeni Kesitlerin Oluşturulması

Rüzgar Türbin kanatları için kanat kesit (airfoil) tasarımı, rüzgar türbin geliştirilmesinde kritik öneme sahiptir. Yapılan çalışmalar, optimum kanat kesit seçiminin enerji üretim maliyetini azalttığını göstermiştir. Kanat kesit tasarımı, mukavemet gereksinimleri, üretim zorlukları ve aerodinamik performans arasında optimum durumun elde edilmesi için yapılır. Örneğin; yüksek kaldırma/sürükleme oranının ve pürüzlülüğe karşı duyarsızlığın elde edilmesi aerodinamik performans için önemlidir. Ancak bu özelliklerin elde edilebildiği ince kanat kesitlerinin özellikle büyük rüzgar türbinlerinde mukavemet şartlarını sağlayacağı garanti değildir.

Şu anda kullanılan NACA serisi kanat kesitleri, İkinci Dünya Savaşında üretilen savaş uçaklarının kanatları için geliştirilmiştir. Uçaklar için üretilen bu kanat kesitlerinin rüzgar türbin kanatları içinde aynı performansı vermesi beklenemez. Çünkü, uçaklarda kullanılan kanat kesitleri yüksek Reynolds sayı değerlerinde ve stall öncesi hücum açılarında iyi aerodinamik performans göstermesi istenirken, rüzgar türbinleri için düşük Reynolds sayı değerinde ve hem stall öncesi hem de stall sonrası için iyi performans göstermesi istenir.

Kanat kesit geometri tasarımı için genel de iki metod vardır: Birincisi, mevcut standart kanat kesit geometrisinde bazı değişiklikler yaparak istenilen şartlarda (Hücum açısı, Reynolds sayısı, Mach sayısı) daha iyi performansa sahip olmasını sağlamaktır. Mach sayısı, akış hızının aynı ortamdaki ses hızına oranı olarak tanımlanır. Yüksek mach (supersonik-ses üstü) sayılarındaki kanat kesit geometrileri ile düşük mach sayılarındaki (subsonik-ses altı) kanat kesit geometrileri oldukça farklıdır. Rüzgar türbin kanat kesitleri düşük mach sayılarına göre tasarlanırlar.

İkincisi ise; istenilen aerodinamik performansı oluşturacak basınç katsayı dağılımını belirlemek ve sonrada bu dağılımı veren geometriyi elde etmektir.

Yeni kanat kesit geometrisinin istenilen aerodinamik özellikleri karşılayacak şekilde tasarımı veya standart kanat kesit geometrisinin modifiye edilmesi ile yeni kesitlerin elde edilmesi stratejileri üzerine yapılan çalışmalar hala devam etmektedir. Yeni kanat tasarımı için yapılan uluslararası çalışmalarda çeşitli teknikler [67] (örneğin; B-Spline[68]) kullanılmıştır. S. Dahl ve Peter Fuslang kanat kesit tasarımı üzerine önemli çalışmalar yapmışlardır [66].

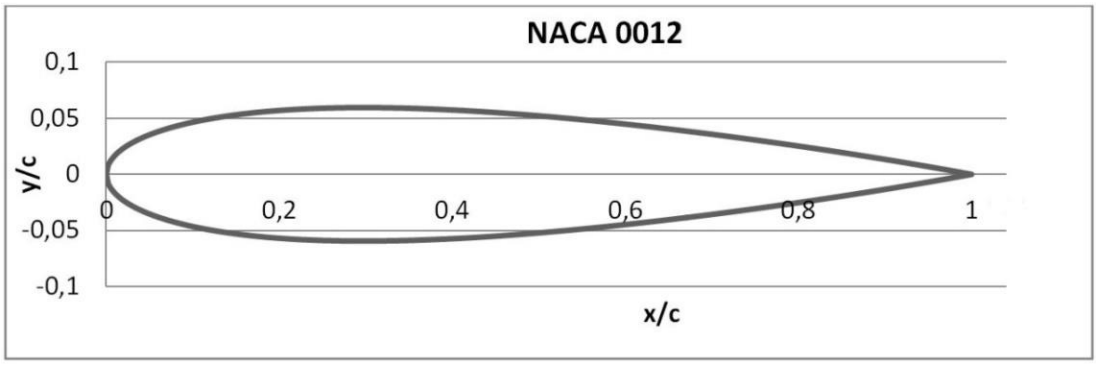
Bu çalışmada ise yukarıda sözü edilen tekniklere ([67], [68]) girmeden, standart iki kanat kesit geometrisinde yapılan değişikliklerle üç yeni geometri elde edilmiş ve elde edilen bu kesit geometrilerinin aerodinamik analizleri HAD bilgisayar paket programında standart k-epsilon türbülans modeli ile yapılmış ve elde edilen sonuçlar orijinallerinin aynı şartlarda elde edilen sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Rüzgar türbin kanatlarında en çok kullanılan kanat kesit geometrilerinden biri Ulusal Havacılık Araştırma Birliği (National Advisory Committee for Aeronautics-NACA) tarafından geliştirilen NACA serisidir. Bu serinin dört, beş ve altı basamaklı çeşitleri vardır. Bu çalışmada, dört basamaklı serisinden olan NACA 0012 ve NACA 4412 kesitleri kullanılmıştır.

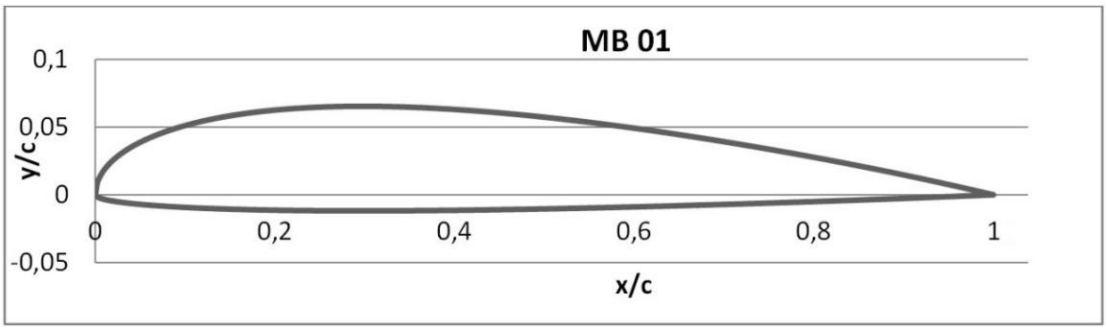
NACA 0012 ve NACA 4412 standart kanat kesit geometrilerinde [55] değişiklikler yapılarak yeni kanat kesit geometrileri elde edilmiştir. Elde edilen yeni kanat kesit geometrilerine MB 01, MB 02 ve MB 03 isimleri verilmiştir.

MB 01 Geometrisi: NACA 0012 kanat kesiti simetrik geometriye sahip olduğundan kamburluk eğrisi yoktur. Üst yüzeyin ordinatları %10 artırılarak ve alt yüzey ordinatları 0,2 ile çarpılarak yeni yüzey ordinatları elde edilmiştir. Yeni geometri ile kesitin alt yüzeyi daha düzleştirilmiş ve kesite kamburluk kazandırılmıştır. Kamburluğun arttırılması ile kaldırma kuvvet katsayısının arttırılması ve alt yüzeyin düzleştirilmesi ile üretim kolaylığının sağlanması ve sürükleme kuvvetinin

azaltılması amaçlanmıştır. NACA 0012 ve MB 01 diye isimlendirilen yeni kesit geometrileri Şekil 2.19 ve Şekil 2.20 de gösterilmiştir.



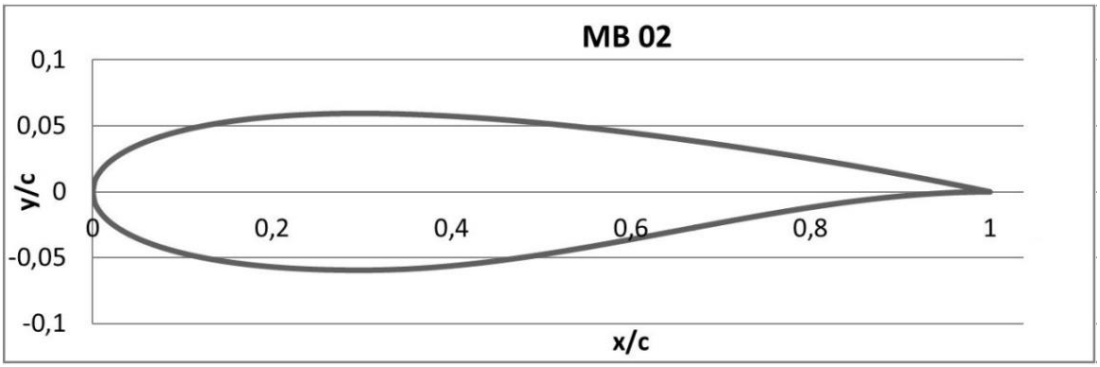
Şekil 2.19. NACA 0012 kanat kesit geometrisi



Şekil 2.20. MB 01 kanat kesit geometrisi

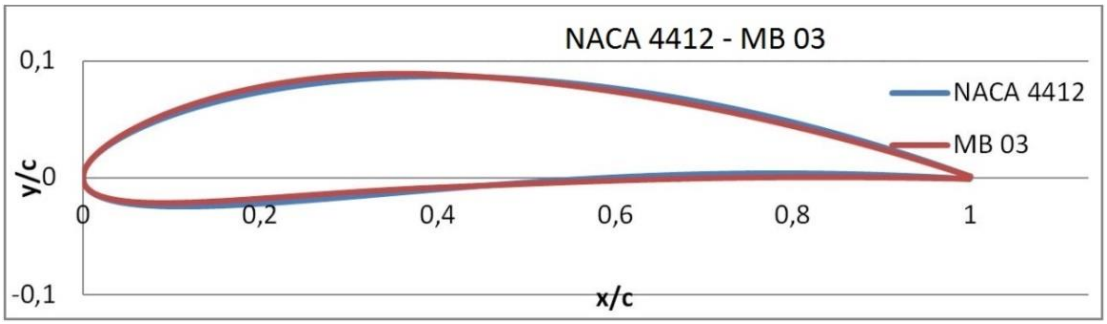
MB 02 Geometrisi: NACA 0012 geometrisinin alt yüzeyinin x/c=0,3 den sonraki kısmı 3. dereceden bir polinom fonksiyon ile yeniden düzenlenmiş ve elde edilen bu yeni geometriye MB 02 denilmiştir. NACA 0012 kanat kesitinin alt ve üst yüzeylerinin $x/c = 0,3$ apsisi ve x/c=1 apsisi için $\frac{dy}{dx} = 0$ koşulu sağlattırılmıştır. $x/c = 0,65$ için ise $\frac{d^2y}{dx^2} = 0$ şartı sağlattırılarak geometrik uyum oluşturulmuştur. Bu şartlar kullanılarak, $0,3 < x/c < 1$ için $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ polinom fonksiyonun

katsayıları hesaplanmış ve grafiğin koordinatları oluşturulmuştur. Bu geometrinin oluşturlmasındaki amaç, stall geciktirilmesi ve kaldırma kuvvetinin arttırılmasıdır. MB 02 kanat kesit geometrisi Şekil 2.21 de gösterilmiştir.



Şekil 2.21. MB 02 kanat kesit geometrisi

MB 03 Geometrisi: NACA 4412 kanat kesitinde; m=0,04 maksimum kamburluk, p=0,4 maksimum kamburluk yeri ve t=0,12 maksimum kalınlık değerlerinden m ve t değerleri sabit tutularak sadece p değerinin yeni değeri 0,5 alınarak MB 03 geometrisi elde edilmiştir. Bu geometrinin elde edilmesinde amaç, maksimum kamburluk yerinin geriye doğru ötelenmesinin aerodinamik performansa etkisini araştırmaktır. Yeni kanat kesit ve NACA 4412 geometrileri Şekil 2.22 de birlikte verilmiştir.



Şekil 2.22. NACA 4412 ve MB 03 kanat kesit geometrileri

2.2.4. HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)

Bir kanat kesiti etrafındaki akışkan sayesinde oluşacak C_L, C_D ve C_M aerodinamik katsayı değerleri deneylerle, teorik formüllerle veya HAD (CFD-Computational Fluids Dynamics) bilgisayar paket programlarıyla hesaplanabilmektedir. Teorik hesaplamalarda yapılan kabullenmeler, elde edilen değerlerin yaklaşık sonuçlar olmasına sebep olmaktadır. Bu teorik hesaplamalarda dayalı olan düz levha yaklaşımı, vortex(girdap) panel metodu, kaldırma çizgisi teorisi kullanılan metotlardan bazılarıdır. Deneylerle yapılan çalışmalarda daha güvenilir sonuçlar elde edilmekte ancak akış ayrılmasının olduğu stall durumlarında güvenilirlik azalmaktadır. Ayrıca rüzgar türbinlerinde çok fazla değişik hücum açılarında bu katsayı değerlerini bulmak hem çok zaman alıcı hem de daha masraflı olmaktadır. Son zamanlarda daha da gelişen ve güvenilirliği artan HAD, XFOİL (panel metot) gibi bilgisayar paket programları ile kanat kesit etrafındaki akışla oluşan kuvvetleri ve aerodinamik katsayılarını elde etmek daha az zaman alıcı ve daha güvenilir olmaktadır. Dış akış analizlerinde, cisim etrafındaki akışta oluşan hız ve basınç değişimleri hesaplanır. Bu hesaplar için, akışın matematiksel modeli olan Navier Stokes denklemlerinin sayısal olarak çözüldüğü bir bilgisayar paket programı olan HAD kullanılır. HAD analizinde akış fiziğinin, hücre oluşturma sisteminin, türbülans model seçiminin ne kadar doğru yapıldığı elde edilecek sonuçların güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir[65].

İki boyutlu Navier Stokes denklemleri, bir süreklilik ve iki momentum korunum denklemlerinden oluşur. Türbülans ve sıkıştırılamaz akışlarda, bu korunum denklemlerine türbülans etkisini hesaba katan ilave denklemler ortaya çıkar. Bu denklemler şunlardır[65]:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \tag{2.31}$$

$$\rho u\frac{\partial u}{\partial x}+\rho v\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left(-\rho\overline{u'v'}\right) \tag{2.32}$$

$$\rho u\frac{\partial v}{\partial x}+\rho v\frac{\partial v}{\partial y}=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y})\right]+\frac{\partial}{\partial y}(-\rho\overline{u'v'}) \tag{2.33}$$

Bu denklemelerde yer alan u ve v sırasıyla x ve y doğrultusundaki hız bileşenlerini, p basıncı, μ dinamik viskoziteyi, ρ akışkanın yoğunluğunu, τ türbülans kayma gerilmesini ve u' ve v' yatay ve düşey türbülans hız sapmalarını temsil etmektedir. Denklemde yer alan türbülans kayma gerilmesi aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$-\rho\overline{u'v'}=\eta(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}) \tag{2.34}$$

Denklemde görülen η terimi, türbülans viskozitesi olarak adlandırılmaktadır ve η nin belirlenmesi için farklı türbülans modelleri geliştirilmiştir[65].

Farklı fiziksel durumlara ve yorumlara göre geliştirilen farklı türbülans modelleri söz konusudur. Cebirsel, tek denklemli, iki denklemli ve Reynolds gerilme modelleri dahil olmak üzere günümüzde kullanılan birçok türbülans modeli vardır. Türbülans modellerinin en çok kullanılanları, Spalart Allmaras, k-epsilon, k-omega modelleridir. Tüm akışlar için en iyi olan belli bir türbülans modeli yoktur. Akış fiziğine uygun türbülans modeli kullanılmalı, gerekirse aynı akış için farklı modeller kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalıdır. Bu çalışmada türbülans modeli olarak k-epsilon modeli seçilmiştir. Bu modelde iki yeni denklem, korunum denklemlerine eklenir. Bu denklemler, ortalama hız değişiminin ve kaldırma (bouyance) kuvvetinin oluşturduğu türbülans kinetik enerjiyi ve bütün yayılma oranlarında sıkıştırılabilir türbülansta genişleyen çalkantıların katkısını dikkate alır. Türbülans kinetik enerjisi 'k', türbülans kaybolma hızı 'ε' ile gösterilir [56].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho k u)=\frac{\partial}{\partial x}(\alpha_k\mu_{eff}\frac{\partial k}{\partial y})+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_K \tag{2.35}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho k u)=\frac{\partial}{\partial x}(\alpha_k\mu_{eff}\frac{\partial\varepsilon}{\partial y})+c_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+c_{3\varepsilon}G_b)-c_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \tag{2.36}$$

G_k, ortalama hızdaki değişimin neden olduğu türbülans kinetik enerji üretimini, G_b, kaldırma (bouyance) kuvvetinin neden olduğu türbülans kinetik enerji üretimini, Y_M sıkışabilen türbülans çalkantılardaki genişlemenin bütün yayılmaya etkisini göstermektedir. Bu denklemler deneysel ve matematiksel hesaplamaların birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Bu çalışmada k-epsilon modeline ait $c_{1\varepsilon} = 1,44$, $c_{2\varepsilon} = 1,92$, $c_\mu = 0,09$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $\sigma_k = 1$ değerleri aynen kullanılmıştır.

Birçok ticari HAD paket bilgisayar programları vardır: Star-CD, Ansys-Fluent, Ansys-CFX, Ellipsys 2D gibi. Hepsinde üç temel aşama söz konusudur: Çözüm öncesi işlemler, çözüm ve çözüm sonrası sonuçların alınması. HAD paket programlarında üç temel eşitlik çözülür: kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri. Sınır koşulları (boundary conditions) akış ve akış alanı özelliklerine göre tanımlanır. Akış alanı hücrelere (mesh) bölünür.

Üç korunum denklemi, sınır koşulları ile birlikte bu hücrelerde (eşitlikler yeterince yakın değerlere ulaşılıncaya kadar iterasyonla) çözülür. Hücreler iki boyutlu alanlar için, yapılandırılmış dörtgensel veya yapılandırılmamış üçgensel şeklinde olabilir. Geçerli fiziksel sonuçların alınabilmesi için hücrelerin doğru bölünmesi çok önemlidir. Az sayıda hücre hatalı sonuçlara neden olurken gereğinden fazla hücre sayısı yüksek kapasiteli bilgisayar ve daha fazla zaman gerektirir[65]. Dolayısı ile optimum hücre sayısını yakalamak gerekir.

Korunum (Navire Stokes) denklemlerinin çözümünde sonlu fark (FDM-finite difference method), sonlu eleman (FEM-finite element method) ve sonlu hacim (FVM-finite volume method) metotları olmak üzere üç farklı sayısal metot kullanılır. Ansys Fluent bilgisayar paket programı FVM metodunu kullanır[65].

2.2.5. HAD İle Kanat Kesitinin Aerodinamik Analizi

Burada yapılan HAD çalışmasında ki amaç, kanat kesit geometrisinde yapılan değişikliklerin aerodinamik performansa (C_L, C_D, C_M katsayı değerlerine) etkilerini incelemek ve daha iyi aerodinamik perfomansa sahip kanat kesit geometrisi tasarlamaktır. NACA 0012, NACA 4412 ve yeniden tasarlanan MB 01, MB 02 ve MB 03 kanat kesit geometrilerinin aerodinamik analizi k-epsilon türbülans modeli ile yapılmıştır. 4, 8 ve 12 derece hücum açılarında, 20 m/s akış hızında bu üç farklı geometri etrafında oluşan basınç ve hız değişimi incelenmiş, C_P basınç katsayı grafikleri elde edilmiş, C_L kaldırma ve C_D sürükleme katsayıları hesaplanmıştır.
Bu işlemler aşağıdaki sırası ile yapılmıştır:

1. Kanat kesit geometrisinin koordinatları Ansys fluent (bilgisayar paket programının) geometri kısmına alınmış ve burada iki boyutlu geometri oluşturulmuştur.

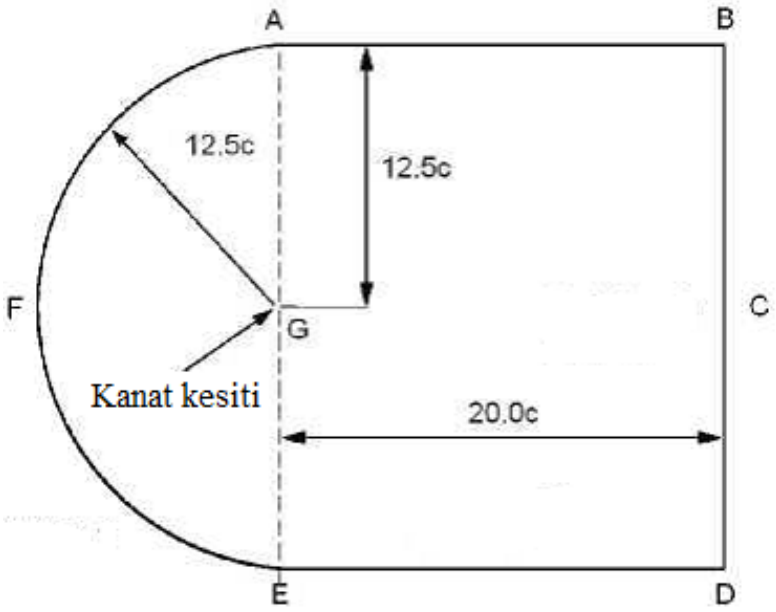
2. Kanat kesit geometrisinin etrafındaki akış bölgesinin sınırları çizilmiştir. Akış bölgesi için C-mesh geometrisi kullanılmıştır (Şekil 2.23).

3. Bu bölümde, sınır bölgelerinin giriş(input) ve çıkış (output) kısımları belirlenmiş ve yüzeyler oluşturulmuştur. Sınır koşulları belirlenmiş ve değerleri girilmiştir. Burada, giriş (input) kısmında hız ve çıkış kısımlarında (output) basınç değerleri tanımlanmıştır. EC ve AB ise simetri (symetry) olarak tanımlanmıştır.[62]

$$V_x = V\cos\alpha \rightarrow \text{AFE} \quad (2.37)$$

$$V_y = V\sin\alpha \rightarrow \text{AFE} \quad (2.38)$$

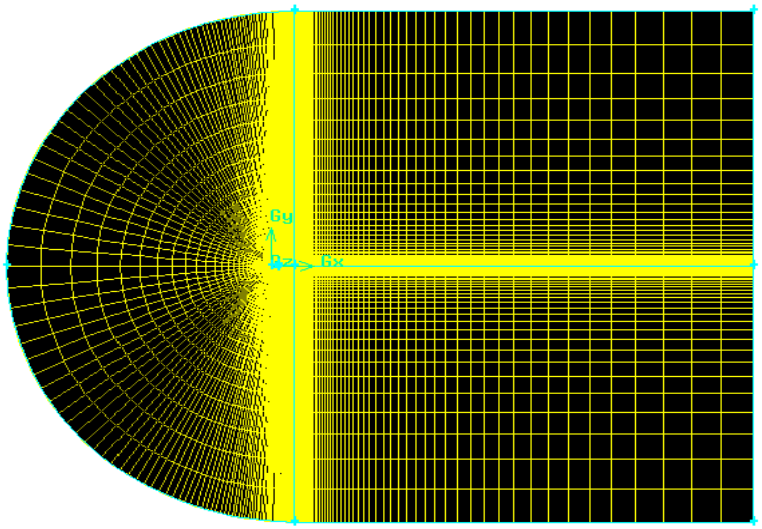
$$Po = 101\,000 \text{ Pa} \rightarrow \text{BCD}$$



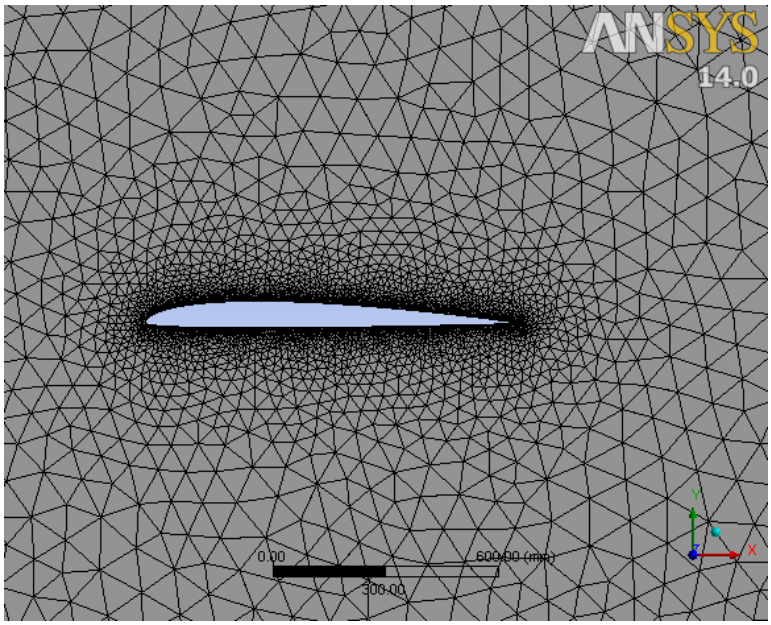
Şekil 2.23. Kanat kesit geometrisi etrafındaki akış alanı[62]

4. Elde edilen geometri (kanat kesiti ve akış alanı), mesh programına alındıktan sonra akış alanı hücrelere (mesh) bölünmüştür. İki boyutlu mesh olarak üçgen (yapılandırılmamış) mesh ve dörtgen mesh (yapılandırılmış) olarak iki farklı mesh geometrisi vardır. Kanat kesit yüzeyi üzerinde daha küçük hücreler ve geometriden uzaklaştıkça büyüyen hücreler oluşturulmuştur (Şekil 2.24 ve Şekil 2.25). Her bir hücre, korunum denklemlerinin çözüldüğü çok çok küçük kontrol hacimleri olarak düşünülebilir. HAD çözümünün doğruluğu büyük oranda oluşturulan hücrelere bağlıdır[62].

5. Mesh programında hücrelere bölünmüş geometri, fluent programına alınmış, çözüm başlatılmış ve yakınsama alıncaya kadar beklenilmiştir. Başlangıç değerlerinden başlayarak tüm hücreler için korunum denklemleri (ve türbülans modelinin denklemleri) iteratif olarak çözülür. İlerleyen iterasyonlarda korunum denklemlerinin sağ ve sol tarafındaki terimlerin değerleri arasındaki fark sıfıra yaklaşır[62].



Şekil 2.24. Dörtgen mesh[62]



Şekil 2.25. Üçgen mesh

6. Sonuçların alınması: Hız, basınç değerleri renkli görüntü alarak alınmıştır. Geometri üzerinde ve akış alanında bu değerlerin minumum ve maximum olduğu yerler belirlenmiş, C_f yüzey sürtünme katsayısı, C_p basınç katsayısı ve eksenel yöndeki C_x kuvvet ile normal yöndeki C_y kuvvet katsayılarının değerleri elde

edilmiştir. Hücum açısının kosinüs ve sinüs değerleri kullanılarak C_L ve C_D katsayılarının değerleri hesaplanmıştır.

2.3. Kanat Kesitlerinin Kanat Boyunca Yerleştirilmesi

Uçak kanadı ile rüzgar türbin kanadı arasındaki farklardan biri, rüzgar türbinlerinde kanat boyunca W bağıl rüzgar hızının değişmesidir. Bu bağıl hız, kanadın dönme düzlemine dik olan V rüzgar hızı ile kanadın dönmesinden kaynaklanan açısal hız nedeniyle oluşan U teğetsel hızın vektörel bileşkesidir. Kanatların dönme hareketinden dolayı, rüzgarın kanat kesitine göre bağıl hızı W ile gösterilir ve büyüklüğü,

$$W^2 = V^2 + U^2 \tag{2.39}$$

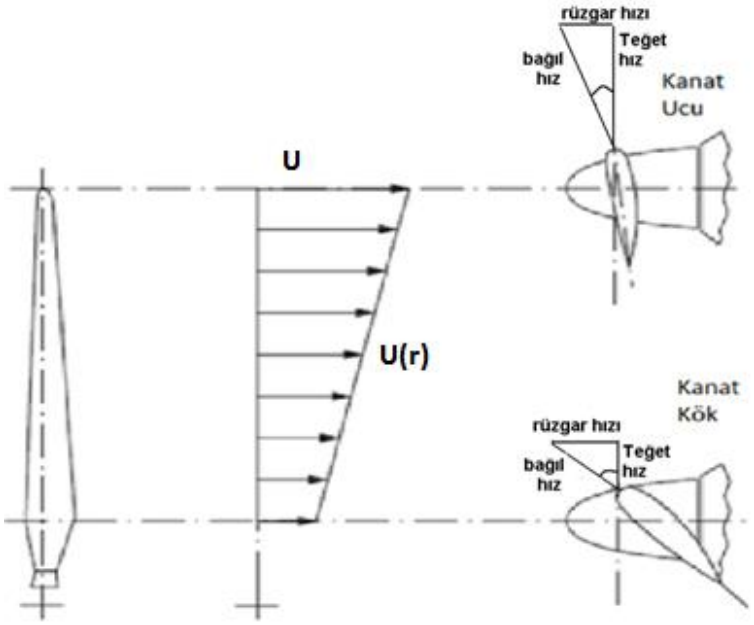
eşitliği ile hesaplanır. Rüzgar türbin kanadı ω açısal hızıyla dönerken kanat üzerindeki her kanat elemanının U teğetsel hızı;

$$U = \omega\, r \tag{2.40}$$

eşitliği ile hesaplanır. Kanat ucundaki teğetsel hız ise;

$$U = \omega\, R \tag{2.41}$$

eşitliği ile hesaplanır. Uçak kanat tasarımcılarının kanat boyunca aynı değerde hız dağılımı kabul etmelerinden dolayı sabit değerde bir hücum açısı kullanmaları doğru sonuçlar verecektir. Ancak, rüzgar türbinlerinde kanat boyunca bağıl hız vektörel ve büyüklük olarak değiştiğinden aynı hücum açısını elde etmek amacıyla (optimum tasarım hücum açısını elde etmek için) kanat, uzunluğu boyunca burulmalıdır. Göbekten uzaklaştıkça bağıl hız rotor düzlemine dike yakın duruma geleceğinden kanat uç kısmında kanat bu düzleme paralel hale gelir (Şekil 2.26).

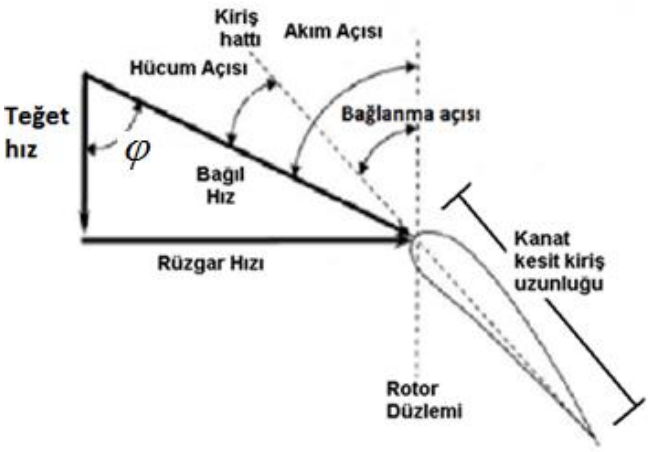


Şekil 2.26. Kanat teğet hızının kanat boyunca değişimi ve burulma açısı[28]

Hücum açısı (α), kanat kesit kiriş hattı ile bağıl rüzgar hızı arasındaki açıdır. Akım açısı (φ), toplam rüzgar hızı ile rotor düzlemi (dönme ekseni) arasındaki açıdır. Bağlanma açısı (β), kanat uç kısmındaki kanat kesit kiriş hattı ile rotor düzlemi arasındaki açıdır. Burulma açısı θ ile gösterilirse, bu açılar arasındaki eşitlik

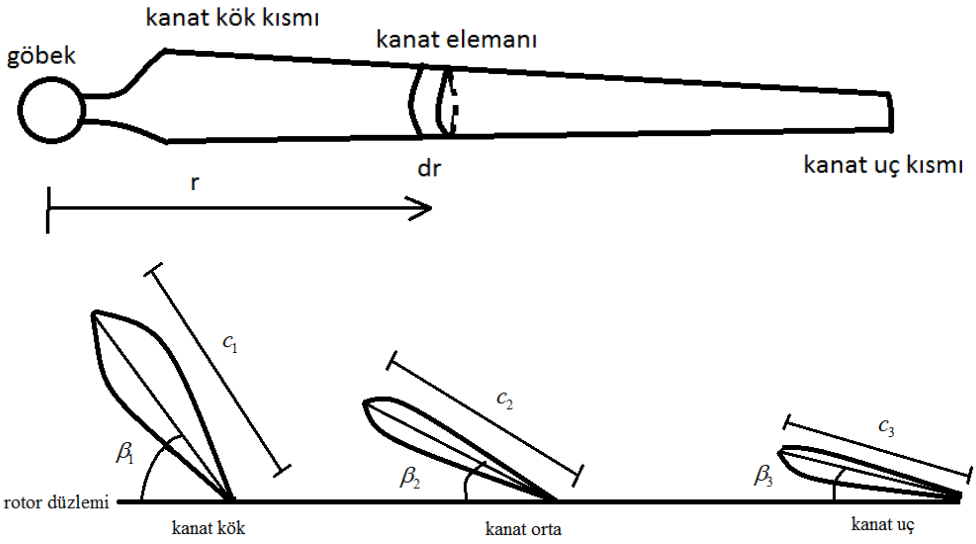
$$\varphi = \theta + \beta + \alpha \tag{2.42}$$

şeklinde yazılabilir (Şekil 2.27). β bağlanma açısı kanat boyunca değişir (Şekil 2.28). Açının değişmesi ile θ burulma açısı oluşur. Bu açıların değerleri maksimum güç elde edilecek (optimum hücum açısını elde ederek) şekilde hesaplanır.



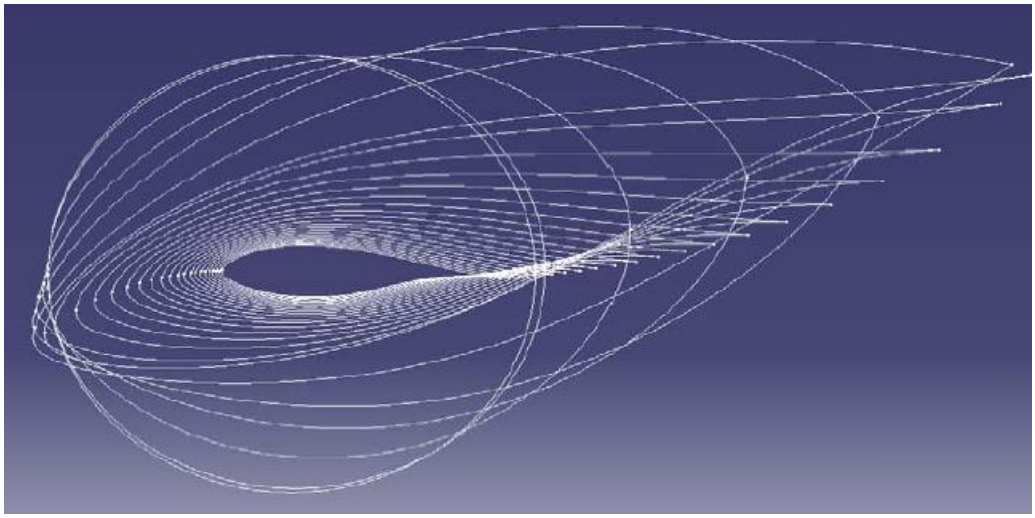
Şekil 2.27. Kanat kesiti için tanımlanan açılar[28]

Kanat kök kısmında bu açılar daha büyük iken kanat uç kısmında sıfır dereceye yakındır. Kanat kök kısmında kanadın teğet hızı küçük olacağından bağlanma açısı büyük olması gerekirken, kanat uç kısmında teğet hız büyük olacağından bağlanma açısı küçük olmalıdır. Optimum kanat geometrisinde, c kanat kesit kiriş uzunluğu kanat kök kısmından uç kısmına doğru gittikçe azalır (Şekil 2.28).



Şekil 2.28. Kanat kesit uzunluğunun (c) ve bağlanma açısının (β) kanat boyunca değişimi[28]

Kanat kesitlerine dik bakıldığında bağlanma açısı ve kanat kesit geometrileri Şekil 2.29 deki gibi görülür.



Şekil 2.29. Kanat kesitlerinin kanat boyunca değişimi

2.4. Uç Hız Oranı

Rüzgarın rotor düzlemine gelmeden önceki hızına serbest rüzgar hızı denir ve bu çalışmada V_1 ile gösterilmiştir. Kanat uç teğetsel hızının (U), V_1 rüzgar hızına oranı 'Uç Hız Oranı' olarak tanımlanır ve X ile gösterilir. Uç hız oranı X;

$$X = \frac{\omega R}{V_1} \tag{2.43}$$

eşitliği ile ifade edilir. Kanat üzerindeki bir kanat elemanına ait yerel 'x' uç hız oranı ise;

$$x = \frac{\omega\, r}{V_1} \tag{2.44}$$

veya

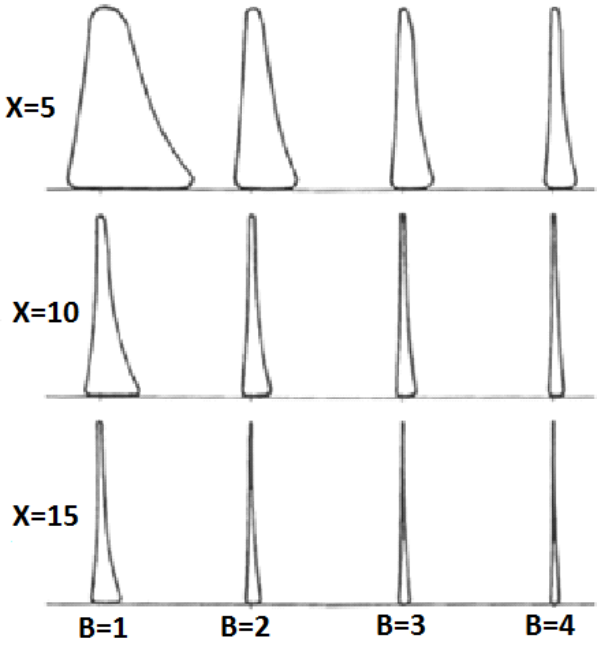
$$x = \frac{r}{R} X \tag{2.45}$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Uç hız oranı, rüzgar türbin rotor verimini etkileyen en önemli değişkenlerden biridir. Rüzgar türbinlerinin verimliliği uç hız oranının bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Yüksek uç hız oranı demek yüksek verimlilik demektir ancak bu yüksek uç hız oranı aynı zamanda aşırı gürültü demektir. Modern yatay eksenli rüzgar türbinlerinde, uç hız oranı değeri iki kanatlı olanlar için 7-15 arasında, üç kanatlı olanlar için ise 4-12 aralığındadır [28]. Uç hız oranının çok düşük ve çok yüksek değerlerinin etkileri Çizelge 2.3 de özetlenmiştir.

Tasarım uç hız oranının kanat geometrisine etkisi Şekil 2.20 de gösterilmiştir.
Yüksek uç hız oranlarında daha ince kanat geometrisi gerekmektedir.

Çizelge 2.3. Uç hız oranının düşük ve yüksek değerlerinin etkileri [35]

UÇ HIZ ORANI	DÜŞÜK	YÜKSEK
Değeri	1-2 arasında	10 dan büyük
Kullanıldığı durum	Geleneksel yel değirmenleri ve su pompa rüzgar türbinlerinde	Özellikle bir ya da iki kanatlı rüzgar türbinlerinde
Tork	Artar	Azalır
Verimlilik	5 değerinden küçük iken, rotor sonrası bölgede yüksek torkun ürettiği dönen girdaplardan dolayı önemli oranda azalır	8 değerinden sonra önemli oranda artar
Merkezcil(merkezkaç) gerilimler	Azalır	Açısal hızın karesi ile orantılı olarak artar
Aerodinamik gerilimler	Azalır	Açısal hızla orantılı artar
Katılık oranı	Artar (10-30 kanat gerekebilir)	Önemli oranda azalır
Kanat kesiti	Geniş	Dar
Aerodinamik	Basit	Kritik öneme sahip
Gürültü	Bu oranın altıncı kuvvetiyle orantılı olarak artar[36]	



Şekil 2.30. Uç hız oranının ve kanat sayısının kanat geometrisine etkileri [28]

2.5. Kanat Geometri Ölçüleri

Kanat tasarımına kanat sayısı belirlendikten sonra başlanır. Kanat sayısı 1 den 2 ye arttırıdığında maksimum verim % 13 artar. Kanat sayısı 2 den 3 e çıkartıldığında bu verim % 7 artar. Kanat sayısı 3 den 4 e artırıldığında ise maksimum verim ancak % 3 artar[31]. Görüldüğü gibi dört kanattan sonraki verim artışı çok az olacaktır. Her ilave kanat, maliyet demek olduğundan en iyi kanat sayısı üç olmaktadır.

Kanat tasarımında hedef, rotor yüzey alanından geçen rüzgardan olabildiğince çok enerji almaktır. Bu amacı gerçekleştirmek için kanat tasarımında dört ana kriter belirlenir:

1. Standart kanat kesit seçmek veya yeni bir kanat kesiti oluşturmak.
2. Kanat kesitlerinin β(r) bağlanma açısının kanat boyunca değişen değerlerini hesaplamak.
3. C(r) kanat kesit kiriş uzunluğunun kanat boyunca değişen değerlerini hesaplamak.

4. X uç hız oranının optimum değerinin belirlemek.

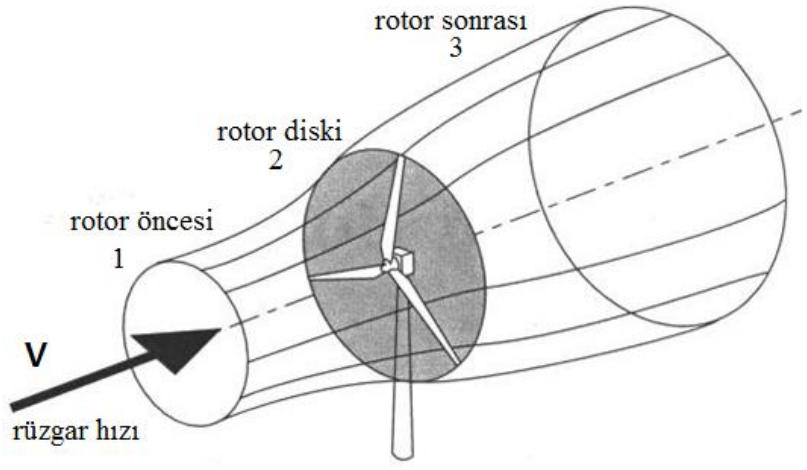
Bu kriterlerin optimum olarak belirlenmesi için çeşitli teoremler geliştirilmiştir.

2.6. Teoremler

Rüzgar türbin tarafından rüzgardaki gücün ne kadarının alınabileceğinin hesabı ve maksimum verim oluşturan kanat geometri ölçülerinin belirlenmesi için geliştirilen teoremlerden, Betz ideal disk (momentum) teoremi, Schmitz açısal momentum teoremi, kanat eleman teoremi ve kanat eleman momentum teoremi sırasıyla takip eden bölümlerde açıklanmıştır.

2.6.1. Betz İdeal Disk Teoremi

Bu teoremde, Şekil 2.31 de gösterildiği gibi rüzgar türbin rotoru bir disk kabul edilerek; bu disk alanından geçen rüzgarın kütlesi, yoğunluğu, hızı ve değişen yüzey kesit alanlar göz önüne alınarak elde edilebilir güç hesabı yapılır.



Şekil 2.31. İdeal disk[23]

İdeal disk teoreminde yapılan kabuller şunlardır;

1. Rotor diski sonsuz sayıda kanattan oluşmaktadır.
2. Diskin kalınlığı sıfırdır.
3. Kanatlar sürtünme kuvvetine maruz kalmadan dönerler.
4. Rotor diskinden geçen hava ile dışarıdan geçen hava akımı birbirine karışmaz.
5. Rotor diskinin ön tarafında ve arka tarafında yeterince uzaklıkta rüzgarın basınç değeri, rotor etkisinde olmayan statik basınç değerine eşittir.
6. Rotor diskinin üzerinde her yerde itme kuvveti aynıdır.
7. Rotor diski tarafından akıma herhangi bir dönme hareketi kazandırılmaz.
8. Hava sıkıştırılamaz yani hava yoğunluğu değişmez.

Şekil 2.31 de görüldüğü gibi rotor öncesi '1' indisi, rotor üzeri '2' indisi (bir çok yerde indis olmadan), rotor sonrası ise '3' indisi ile gösterilmiştir. Rotor diski alanından geçen $\dot{m}$ rüzgarın kütlesi, rotor öncesi, rotor üzeri ve rotor sonrası için kütle korunumu ilkesine göre,

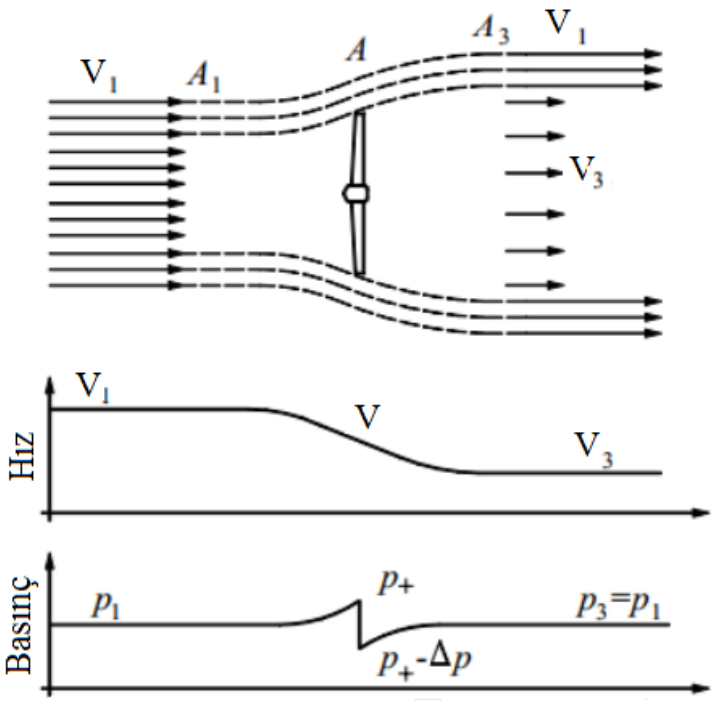
$$\dot{m} = \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \rho_3 A_3 V_3 \tag{2.46}$$

eşitliği yazılabilir. Bu eşitlikte, ρ (yoğunluk) sabit ve rüzgar kinetik enerjisinin bir kısmını türbine vereceğinden $V_1 > V_2 > V_3$ olur ve (2.46) eşitliğine göre $A_1 < A_2 < A_3$ yazılır. Rüzgar rotor düzleminden geçerken hızındaki azalmayı ifade etmek için, rotor öncesindeki azalmayı gösteren bir katsayı tanımlanmıştır. Bu katsayı a ile gösterilip

$$a = 1 - \frac{V}{V_1} \qquad \text{veya} \qquad V = V_1\,(1-a) \tag{2.47}$$

biçiminde ifade edilir. Burada V_1 rüzgarın rotor etkisine girmeden sahip olduğu hızı, V ise rüzgarın kanat elemanı (rotor diski) üzerinde sahip olduğu hızı olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada rotor diski üzerindeki hız V_2 yerine V, disk alanı A_2 yerine A kullanılmıştır. Enerji korunumuna göre hız değişirken basınç değeride

değişir. Şekil 2.32 de gösterildiği gibi, rotor öncesi akımın (üst akım) basıncı p_0 (açık hava basıncı) ve hızı V_1 iken, rotor düzlemine yaklaşırken hızı azalarak V olurken, basıncı artarak p_+ değerine ulaşır. Rotor düzleminde, basınç ani olarak düşerek disk sonrasında p_- değerine sahip olur. Rotor sonrası akımda (alt akım) hız azalmaya devam ederken basınç değeri p_- değerinden artarak p_0 değerine yeniden ulaşır.



Şekil 2.32. Hız ve basıncın rotor eksen boyunca değişimi[28]

Üst akım ve alt akım için ayrı ayrı enerji (Bernouilli) eşitlikleri yazılırsa

$$\frac{1}{2}\rho V_1^2 + p_0 = \frac{1}{2}\rho V^2 + p_+ \tag{2.48}$$

$$\frac{1}{2}\rho V^2 + p_- = \frac{1}{2}\rho V_3^2 + p_0 \tag{2.49}$$

elde edilir. Bu eşitlikler taraf tarafa toplanırsa,

$$p_+ - p_- = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_3^2) \tag{2.50}$$

ve basınç değişimi,

$$p_+ - p_- = \Delta p \tag{2.51}$$

biçiminde gösterilirse (2.50) eşitliği,

$$\Delta p = \frac{1}{2}\rho\ (V_1^2 - V_3^2) \tag{2.52}$$

şeklinde ifade edilir. Ayrıca, rüzgar kütlesinin momentumundaki değişimi gösteren ΔM için**,**

$$\Delta M = \dot{m}V_3 - \dot{m}V_1 \tag{2.53}$$

$$\Delta M = \rho AV(V_3 - V_1) \tag{2.54}$$

eşitlikleri yazılabilir. Burada rüzgar hızı azaldığından ΔM değeri negatif olur. Momentum değişiminin nedeni, rotor diski üzerinde meydana gelen Δp basınç farkından kaynaklanan F_x eksenel itme kuvvetidir. Momentum teoremine göre rotor düzleminde oluşan eksenel kuvvet, etki-tepki prensibine göre rüzgar kütlesindeki momentum değişiminin ters işaretlisine eşit olur. Eksenel kuvvet ile momentum değişimi arasında,

$$F_x = -\Delta M \tag{2.55}$$

$$\Delta p\ A = -\Delta M \tag{2.56}$$

eşitlikleri yazılabilir. (2.52), (2.54) ve (2.56) eşitlikleri biraraya getrilirse,

$$\frac{1}{2}\rho\ (V_1^2 - V_3^2)\ A = \rho AV(V_1\ - V_3\ ) \tag{2.57}$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikten V, V_1 ve V_3 hızları arasında

$$V = \frac{V_1 + V_3}{2} \tag{2.58}$$

eşitliği elde edilir. (2.47) eşitliği kullanılarak V_1 ile V_3 hızları arasında

$$V_3 = V_1\ (1-2a) \tag{2.59}$$

bağıntısı elde edilir.

2.6.2. Güç Çarpanı ve Betz Limiti

Rüzgar türbin verimini ifade etmek için güç çarpanı denilen ve C_P ile gösterilen bir tanım kullanılır. Rüzgarda mevcut olan güç P_{mak} ve elde edilen güç P ile gösterilirse, C_P güç çarpanı,

$$C_P = \frac{P}{P_{mak}} \tag{2.60}$$

biçiminde tanımlanır[38].

Rotor düzlem (kanat süpürme) alanı A, rotor öncesi rüzgar hızı V_1, rotor alanındaki rüzgarın toplam gücü P_{mak} ile gösterilirse,

$$P_{mak} = \frac{1}{2}\rho A V_1^3 \tag{2.61}$$

eşitliği ile rüzgardaki maksimum güç değeri hesaplanır. Bu değer (2.60) eşitliğinde yerine yazılarak,

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A V_1^3} \tag{2.62}$$

eşitliği elde edilir. Rüzgardan elde edilecek P güç değeri, üst ve alt akımlardaki güç farkına eşit olacağından,

$$P = P_1 - P_3 \tag{2.63}$$

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}V_1^2 - \frac{1}{2}\dot{m}V_3^2 \tag{2.64}$$

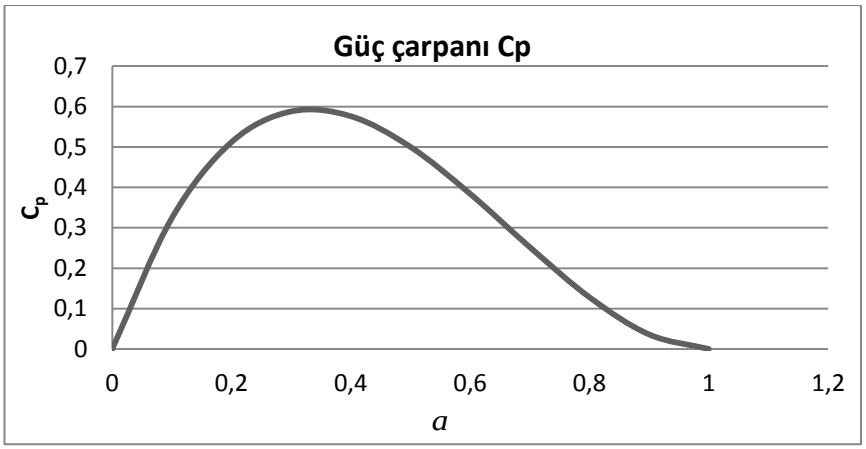
eşitlikleri yazılabilir. (2.62) eşitliğinde P için, (2.64) ve (2.2) eşitlikleri kullanılarak,

$$C_P = \frac{\frac{1}{2}\rho A V\left(V_1^2 - V_3^2\right)}{\frac{1}{2}\rho A V_1^3} \tag{2.65}$$

eşitliği elde edilir. Elde edilen bu eşitlikte gerekli sadeleştirmeler yapılır ve (2.47) ile (2.59) eşitlikleri kullanılır ise

$$C_P = 4a\left(1-a\right)^2 \tag{2.66}$$

bağıntısı bulunur. (2.66) eşitliğinde verilen C_P' nin a ya göre değişimi, Şekil 2.33 de grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.33. C_p'nin a ' ya göre değişimi

Güç çarpanın alabileceği maksimum değeri bulmak için, C_P'nin a değişkenine göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse;

$$\frac{dc_p}{da} = \frac{d}{da}\left[4a\left(1-a\right)^2\right] = 0 \tag{2.67}$$

a =1/3 bulunur. Bulunan a değeri C_P fonksiyonunda yerine yazılırsa C_P nin maksimum değeri 16/27 olarak elde edilir. Bu değere "Betz limiti" denir. Betz tarafından rüzgardaki gücün en çok %59,3 ünün mekanik enerjiye dönüştürebileceği bu işlemlerde gösterildiği gibi ispatlanmıştır.

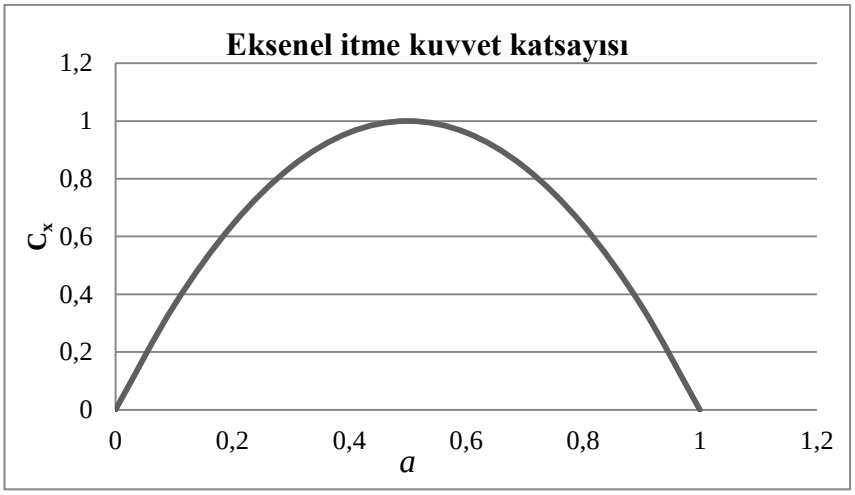
Rotor diskine etkiyen eksenel itme kuvvet katsayısı C_x ile gösterilir ve

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho\, V_1^2 A} \tag{2.68}$$

biçiminde tanımlanır. (2.52) eşitliğindeki Δp basınç farkı ile A rotor disk alanının çarpımı F_x eksenel itme kuvvetine eşittir. (2.68) bağıntısında F_x yerine Δp A yazılır ve (2.47), (2.52) ile (2.59) eşitlikleri kullanılır ise,

$$C_x = 4a(1-a) \tag{2.69}$$

eşitliği elde edilir. C_x eksenel kuvvet katsayısının, a ya göre değişim grafiği Şekil 2.34 de gösterilmiştir.



Şekil 2.34. Eksenel itme kuvvet katsayısı (C_x) nın a ' ya göre değişimi

2.6.3. Kaldırma ve Sürükleme Tipi Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri, kanatları döndüren kuvvetlere göre sınıflandırıldığında kaldırma tipi ve sürükleme tipi olmak üzere iki çeşit rüzgar türbininden bahsedilebilir. Modern yatay eksenli rüzgar türbinlerinin hepsi kaldırma tipi rüzgar türbinleridir. Düşey eksenli rüzgar türbinlerinin bir kısmı kaldırma, bir kısmı da sürükleme kuvvetini kullanarak güç üretirler. Savinous rüzgar türbinleri sürükleme tipine, Darrieus rüzgar türbinleri ise kaldırma tipine örnek olarak gösterilecek düşey eksenli rüzgar türbinleridir. Bu bölümde sürükleme tipi rüzgar türbinlerinin maksimum güç çarpan değeri hesaplanmıştır. Böylece, burada elde edilen maksimum C_P değeriyle, kaldırma tipi rüzgar tribünlerinde Betz Limiti olarak bilinen $C_{P_{\max}} = 16/27$ değeri karşılaştırılmıştır. W bağıl hız, V eksenel rüzgar hızı ile U teğet kanat hızının vektörel toplamına eşittir.

$$\overrightarrow{W} = \overrightarrow{V} + \overrightarrow{U} \tag{2.70}$$

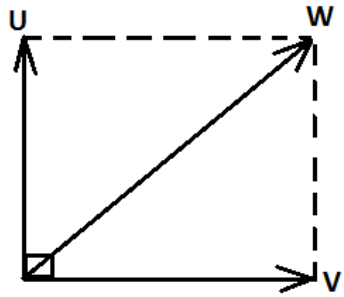
Bu bağıntı hem kaldırma hem de sürükleme tipi rüzgar türbinleri için kullanılır. Ancak, kaldırma tipi rüzgar türbinlerinde Şekil 2.35 de gösterildiği gibi V eksenel hız ile U teğetsel hız birbirlerine dik olduklarından, W hızının hesaplanmasında,

$$W^2 = U^2 + V^2 \tag{2.71}$$

bağıntısı kullanılır. $U = \omega\, r$ olduğundan,

$$W^2 = (\omega\, r)^2 + V^2 \tag{2.72}$$

eşitliği yazılır. Burada ω kanadın açısal hızı, r ise kanat elemanının rotor dönme eksenine olan uzaklığını gösterir.

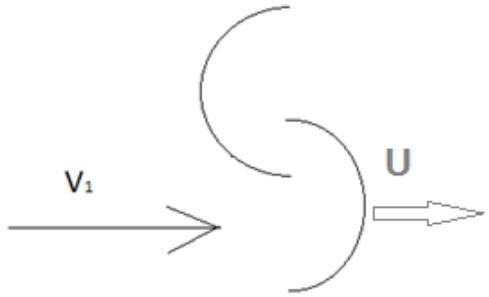


Şekil 2.35. Kaldırma tipi rüzgar türbinlerinde bağıl rüzgar hızı[38]

Sürükleme tipi rüzgar türbinlerinde ise Şekil 2.36 da gösterildiği gibi, W bağıl hız, U kanat çizgisel hızı ile V_1 rüzgar hızının farkına eşittir. W hızı,

$$W = V_1 - U \tag{2.73}$$

bağıntısı ile hesaplanır.



Şekil 2.36. Sürükleme tipi rüzgar türbini (Savonius) [38]

Ayrıca, sürükleme tipi rüzgar türbinlerinde F_D sürükleme kuvveti ve C_D sürükleme katsayısı arasında,

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho A W^2} \tag{2.74}$$

eşitliği yazılabilir. Sürükleme tipi rüzgar türbinlerinden elde edilecek maksimum güç P, F_D sürükleme kuvveti ile U kanat çizgisel hızının çarpımı olarak yazılabileceğinden,

$$P = F_D\ U \tag{2.75}$$

eşitliğinde (2.74) bağıntısı kullanılırsa,

$$P = \left(\frac{1}{2}\rho\ A\ W^2\ C_D\right)U \tag{2.76}$$

ve W yerine (2.73) eşitliği yazılırsa

$$P = \frac{1}{2}\rho\ A\ (V_1 - U)^2\ C_D\ U \tag{2.77}$$

formülü elde edilir. U kanat çizgisel hızı, V_1 rüzgar hızı bölünür ve bu orana 'k' denir ise;

$$k = \frac{U}{V_1} \tag{2.78}$$

ve C_p güç çarpanı için (2.62) eşitliği ve (2.77) formülü kullanılırsa,

$$C_P = \frac{\frac{1}{2}\rho A\left(V_1 - U\right)^2 C_D\ U}{\frac{1}{2}\rho A V_1^3} \tag{2.79}$$

elde edilir. Bu eşitlikte gerekli düzenlemeler yapılır,

$$C_P = \left(1 - \frac{U}{V_1}\right)^2 \frac{U}{V_1} C_D \tag{2.80}$$

ve $\frac{U}{V_1}$ yerine k değişkeni kullanılırsa,

$$C_P = \left(1 - k\right)^2 k\ C_D \tag{2.81}$$

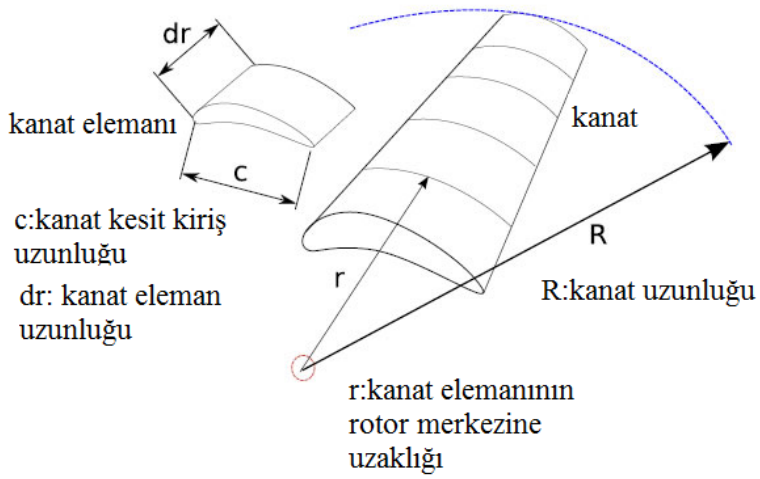
eşitliği bulunur. C_P nin maksimum değeri, türevin sıfıra eşitlenmesi ile elde edileceğinden,

$$\frac{dC_p}{dk} = 0 \tag{2.82}$$

eşitliğinden k=1/3 bulunur. C_D değeri 1 alınırsa, C_P güç çarpan maksimum değeri 4/27 olarak elde edilir. Kaldırma tipinde C_P nin maksimum değeri ise 16/27 bulunmuştu. Yani kaldırma tipi rüzgar tribününde elde edilebilecek max güç değeri, sürükleme tipinde elde edilebilecek değerin 4 katıdır. O halde, yüksek verim için kaldırma tipi rüzgar türbini seçilmelidir.

2.6.4. Kanat Eleman Teoremi

Yatay eksenli rüzgar türbin kanatlarının rotor ekseni etrafında dönmesini sağlayan kuvvet, kanatlarda oluşan rotor düzlemine paralel teğetsel kuvvettir(Şekil 2.38(b)). Rotor düzlemine dik etkiyen ve kanatları geriye doğru iten kuvvete ise eksenel itme kuvveti denir(Şekil 2.38(a)). Bu kuvvetler, kanat kesitlerinde oluşan kaldırma ve sürükleme kuvvetlerinin sonucudur. Bahsi geçen kuvvetler arasındaki ilişkilerin kurulduğu bu teoremde kanat, Şekil 2.37 de gösterildiği gibi N tane elemana ayrılır ve oluşan her bir elemana kanat elemanı denir. Bu kuvvetler herbir kanat elemanı için ayrı ayrı hesaplanır.



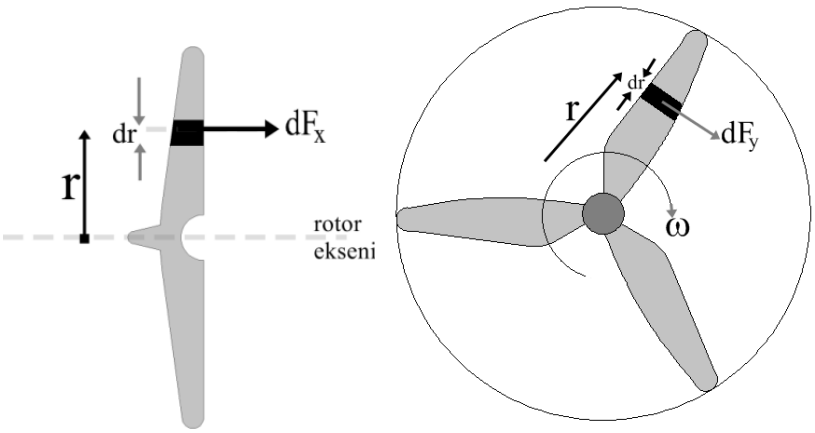
Şekil 2.37. Kanat ve kanat elemanı[28]

Kanat eleman teoreminde aşağıdaki kabuller yapılır:

1. Kanat boyunca alınan ard arda kanat elemanları arasında herhangi bir akım etkileşimi yoktur; kanat boyunca bir akış yoktur.

2. Kanat elemanına etkiyen kuvvetler, sadece kanat kesit geometrisinin özellikleri olan kaldırma ve sürükleme kuvvetlerinin sonuçlarıdır.

Kanat elemanında oluşan dF_x eksenel itme kuvveti türbin kanatlarını geriye doğru iterken, dF_y teğetsel kuvvet kanatların dönmesini sağlar (Şekil 2.38).



a) Eksenel kuvvet b) Teğetsel kuvvet

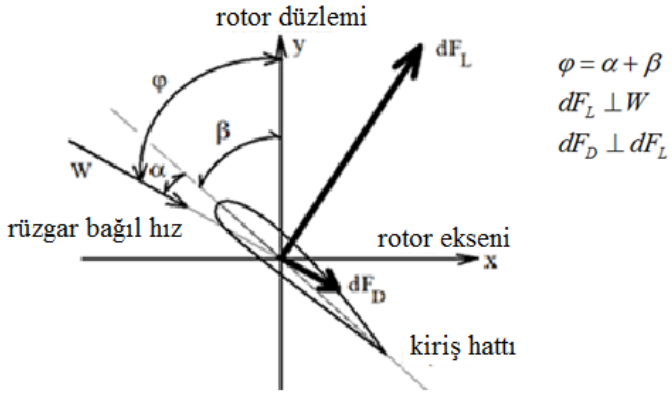
Şekil 2.38. Kanat elemanına etkiyen eksenel ve teğetsel kuvvetler

Her bir kanat elemanının bağımsız hareket etmesi kabulünden dolayı her bir kanat elemanı üzerinde oluşan kuvvetler, o eleman üzerindeki W bağıl rüzgar hızları ile hesaplanır. Şekil 2.39 (a) da gösterildiği gibi, W bağıl rüzgar hızı ile rotor düzlemi arasındaki açı φ ile gösterilmiştir. φ açısı, α hücum açısı ile β bağlanma açısının toplamına eşittir. Kanat elemanında oluşan dF_L kaldırma ve dF_D sürükleme kuvvetleri (2.5) ve (2.6) formüllerinde V hızı yerine W bağıl hızı alınarak elde edilen

$$dF_L = \frac{1}{2}\rho\, W^2 c\, dr\, C_L \qquad (2.83)$$

$$dF_D = \frac{1}{2}\rho\, W^2 c\, dr\, C_D \qquad (2.84)$$

formülleri ile hesaplanır. Uzunluğu dr olan bir kanat elemanı üzerinde meydana gelen dF_L kaldırma, dF_D sürükleme kuvvetleri Şekil 2.39 (a) da gösterilmiştir.

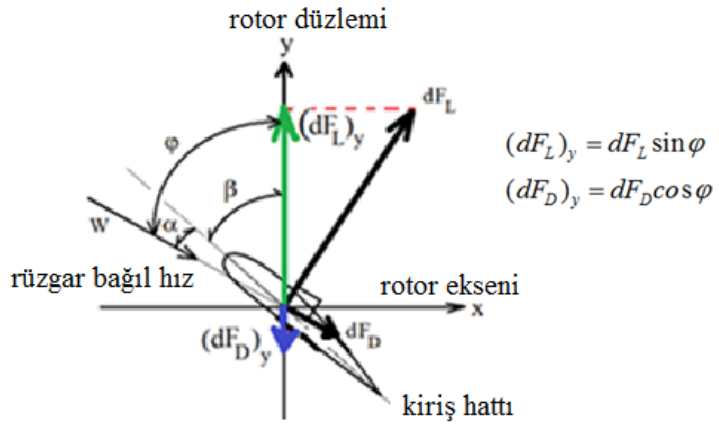


Şekil 2.39(a). Kaldırma ve Sürükleme kuvvetleri [38]

Uzunluğu dr olan bir kanat elemanında meydana gelen dF_L kaldırma ve dF_D sürükleme kuvvetlerinin rotor eksen doğrultusundaki bileşenlerinin toplamı dF_x itme eksenel kuvveti oluştururken, rotor düzlemindeki diğer bileşenlerinin farkıda dF_y teğetsel kuvveti meydana getirirler. dF_y teğetsel kuvvet, Şekil 2.39 (b) de gösterildiği gibi, dF_L kaldırma ve dF_D sürükleme kuvvetlerinin y eksenindeki (rotor düzlemindeki) bileşenlerinin farkına eşit olacağından

$$dF_y = (dF_L)_y - (dF_D)_y \tag{2.85}$$

eşitliği yazılır.



Şekil 2.39 (b). Teğetsel kuvvetin oluşması [38]

Kanat elemanında oluşan dF_y teğetsel kuvvet, C_y teğetsel kuvvet katsayısı cinsinden,

$$dF_y = \frac{1}{2}\, W^2 c\, dr\, C_y \tag{2.86}$$

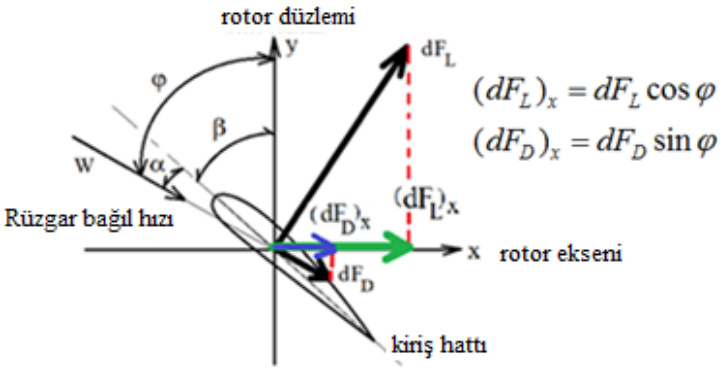
şeklinde tanımlanır. dF_x , dF_L, dF_D yerine C_x, C_L, C_D katsayıları cinsinden eşitleri yazılırsa C_y teğetsel kuvvet katsayısı,

$$C_y = C_L\, sin(\varphi) - C_D\, cos(\varphi) \tag{2.87}$$

şeklinde yazılır. dF_x eksenel itme, Şekil 2.39 (c) de gösterildiği gibi, dF_L kaldırma ve dF_D sürükleme kuvvetlerinin x (rotor ekseni) doğrultusundaki bileşenlerinin toplamına eşit olduğundan,

$$dF_x = \left(dF_L\right)_x + (dF_D)_x \tag{2.88}$$

eşitliği yazılır.



Şekil 2.39 (c). Eksenel kuvvetin oluşması [38]

Kanat elemanında oluşan dF_x eksenel kuvvet,

$$dF_x = \frac{1}{2}\ W^2 c\ dr\ C_x \tag{2.89}$$

şeklinde yazılır. dF_x eksenel itme kuvveti C_x katsayısı, dF_L kaldırma kuvveti C_L katsayısı, dF_D sürükleme kuvveti C_D katsayısı cinsinden yazılırsa C_x itme kuvvet katsayısı için,

$$C_x = C_L\ cos(\varphi) + C_D\ sin(\varphi) \tag{2.90}$$

eşitliği elde edilir. Rotorda meydana gelecek toplam eksenel kuvvet (F_x) ve toplam teğetsel kuvvet (F_y), her bir kanat elemanında oluşan dF_x ve dF_y kuvvetlerinin toplamına eşittir. N kanat eleman sayısı, i kanat eleman numarası ve B kanat sayısı olmak üzere; rüzgar türbin kanatlarını rüzgar hızı doğrultusunda geriye doğru iten toplam eksenel itme kuvveti F_x;

$$F_x = B \sum_{i=1}^{N} (dF_x)_i \tag{2.91}$$

formülü ile hesaplanır. Türbin rotorunda oluşan toplam T tork için

$$T = B\ F_y\ r \tag{2.92}$$

$$T = B \sum_{i=1}^{N} r_i (\mathrm{dF}_y)_i \tag{2.93}$$

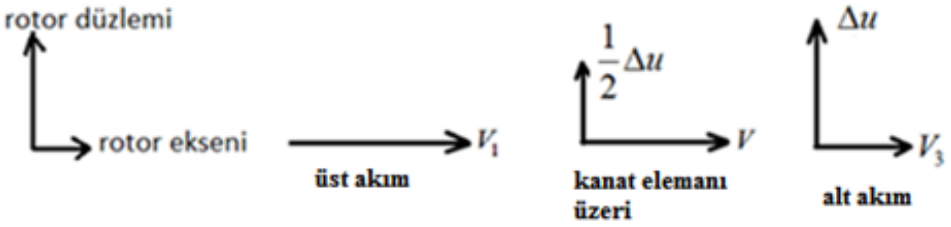
eşitlikleri yazılabilir. Rüzgar türbin kanat sisteminde elde edilebilecek toplam P güç değeri ise

$$P = T\ \omega \tag{2.94}$$

eşitliği ile hesaplanır.

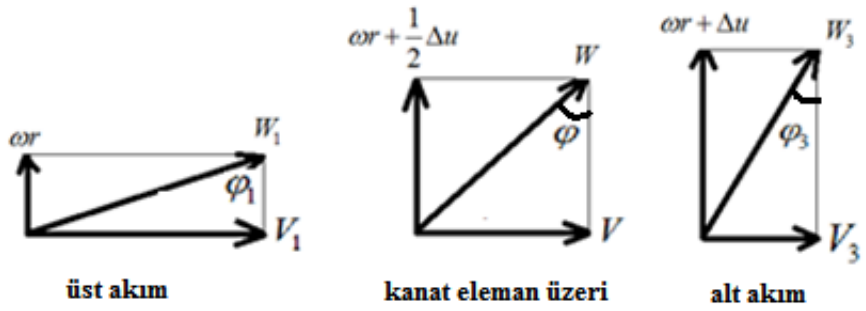
2.6.5. Açısal Momentum Teoremi

İdeal disk teoreminde, havanın rotor sonrasında herhangi bir dönme hareketine sahip olmadığı kabul edilmiştir. Oysa, açısal momentum korunumu teoremine göre rüzgar, kanatları döndürüyor ise kendisinin de ters yönde bir dönme hareketi olacaktır. Bu ters dönme hareketinden dolayı, hava rotor sonrasında teğetsel hız kazanır. Rotor sonrasında hvanın kazandığı bu teğetsel hız ΔU ile gösterilirse, rüzgarın rotor öncesinde, rotor üzerinde ve rotor sonrasında sahip olduğu eksenel ve teğetsel hızlar Şekil 2.40 da gösterildiği gibi olacaktır[38].



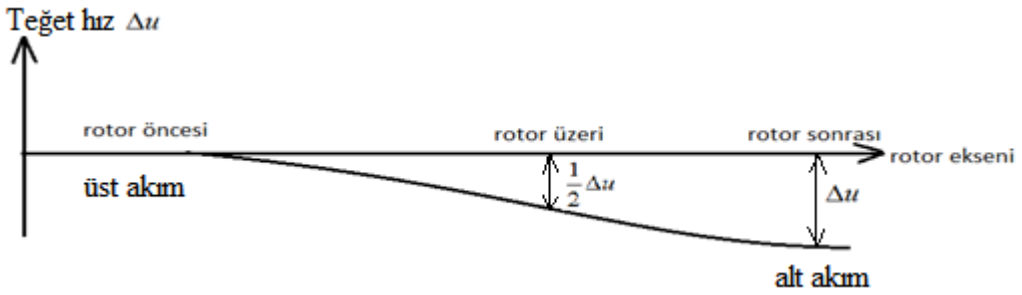
Şekil 2.40. Rüzgar hızının değişimi[38]

Bu hızlara ωr kanat teğet hızı vektörel olarak eklenirse, W bağıl rüzgar hızının değişimi Şekil 2.41 de gösterildiği gibi olur.



Şekil 2.41. Bağıl rüzgar hızının değişimi[38]

Şekil 2.41 de φ_1 açısı rotor öncesi akım açısını (W bağıl rüzgar hızı ile rotor düzlemi arasındaki açı) gösterirken φ açısı kanat elemanı üzerindeki akım açısını göstermektedir. $\frac{1}{2}\Delta U$ terimi ise Şekil 2.42 de gösterildiği gibi, alt akımdaki rüzgarın sahip olduğu ΔU teğet hızının etkisiyle kanat üzerinde oluşan ortalama ek teğet hızını göstermektedir.



Şekil 2.42. Rüzgar teğetsel hızının değişimi[38]

Önceki bölümlerde eksenel hızdaki değişimi göstermek için a eksenel indüksiyon katsayısı kullanılmıştı. Burada ise, teğetsel hızdaki değişimi ifade etmek için a' teğetsel indüksiyon katsayısı kullanılmıştır.

wr kanat teğet hızı ile rüzgarın teğetsel hızındaki değişimi ifade eden ΔU terimi ve a' teğetsel hız indüksiyon katsayı arasında

$$\tfrac{1}{2}\Delta U = a'\ \omega\ r \tag{2.95}$$

$$U = \omega\ r + a'\omega\ r \tag{2.96}$$

eşitlikleri yazılır[38]. (2.71) eşitliği rotor öncesi ve rotor üzeri için tekrar yazıldığında W_1 ve W hızları hesaplanır. Rotor öncesinde $u = \omega\ r$ ve rotor üzerinde $V = \omega\ r(1-a)$ ile $U = \omega\ r(1+a')$ eşitlikleri kullanılır. Şekil 2.41 de gösterildiği gibi, rotor öncesi (üst akım) rüzgarın bağıl hızı W_1,

$$W_1^2 = V_1^2 + (\omega r)^2 \tag{2.97}$$

eşitliği ile hesaplanırken, kanat elemanı üzerindeki bağıl rüzgar hızı W,

$$W^2 = V^2 + \left(\omega\ r\ (1+a')\right)^2 \tag{2.98}$$

veya

$$W^2 = \left(V_1\ (1-a)\right)^2 + \left(\omega\ r\ (1+a')\right)^2 \tag{2.99}$$

ile hesaplanır. Rüzgarın rotor sonrasında, kanadın dönme yönüne ters yönde sahip olduğu ΔU teğetsel hız nedeniyle ΔL açısal momentum değişimi oluşur. Bu değişimin sebebi, kanatta oluşan torktur. Yani rüzgar kanada tork uygularken kanat da rüzgara tork uygular ve böylece rüzgar teğet hız kazanır. Rüzgarın kazandığı bu tork değerinden yola çıkarak, kanadın kazandığı tork ve dolayısıyla güç hesaplanabilir. Kanat elemanından geçen havanın (rüzgarın) rotor sonrasında kazandığı dL_3 açısal momentumu, ΔU teğetsel hızı, dm kütlesi ve bu kütlenin rotor merkezinden uzaklığı r arasında

$$dL_3 = dm\ r\ \Delta U \tag{2.100}$$

eşitliği yazılabilir. Rotor öncesinde havanın teğetsel hızı sıfır olduğundan açısal momentum değeride sıfırdır.

$$dL_1 = 0 \tag{2.101}$$

O halde açısal mometum değişimi şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta(dL) = dL_3 - dL_1 \tag{2.102}$$

$$\Delta(dL) = dm\ r\ \Delta U \tag{2.103}$$

Açısal momentum teoremine göre kanat elemanı üzerinden geçen dm hava kütlesi için $\mathrm{d}\Delta L$ açısal momentumdaki değişme miktarı, dT tork değerine eşit olacağından,

$$dT = \Delta(dL) \tag{2.104}$$

bağıntısı yazılabilir. (2.103) ve (2.104) eşitlikleri biraraya getrilirse,

$$dT = r\ dm\ \Delta U \tag{2.105}$$

eşitliği elde edilir. Aynı zamanda bir kanat elemanında oluşan tork, bu elemanda meydana gelen teğetsel kuvvet ile r uzaklığı çarpımına eşit olduğundan

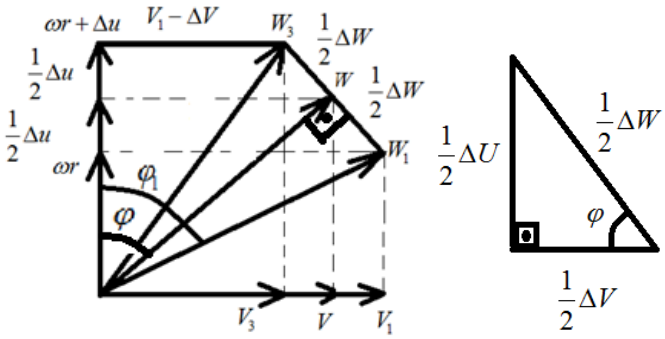
$$dT = r\ dF_y \tag{2.106}$$

eşitliği yazılabilir. (2.105) ve (2.106) eşitliklerinden

$$dF_y = dm\ \Delta \mathrm{U} \tag{2.107}$$

bağıntısı yazılabilir.

Şekil 2.41 deki bağıl rüzgar hız diyagramları birlikte çizilirse Şekil 2.43 de gösterilen hız diyagramları elde edilir. Bu diyagramlarda ΔV , ΔU ve ΔW sembolleri sırasıyla eksenel, teğetsel ve bağıl hız değişimlerini göstermektedir.



(a) Tüm hızlar (b) Hız değişimleri

Şekil 2.43. Eksenel, teğetsel, bağıl hız ve hız değişim diyagramları[38]

Şekil 2.43 (b) de gösterilen hız diyagramından,

$$\Delta W \sin\varphi = \Delta U \tag{2.108}$$

eşitliği yazılabilir. Kanat eleman teoreminde yazılan (2.85) eşitliği yerine,

$$dF_y = dF_L \sin\varphi - dF_D \cos\varphi \tag{2.109}$$

eşitliği yazılabilir. Bu eşitlik $dF_D \cos\varphi$ terimi diğer terime göre çok küçük olduğundan,

$$dF_y = dF_L \sin\varphi \tag{2.110}$$

yazılabilir. (2.107), (2.108) ve (2.110) eşitliklerinden,

$$dF_L = dm\ \Delta W \tag{2.111}$$

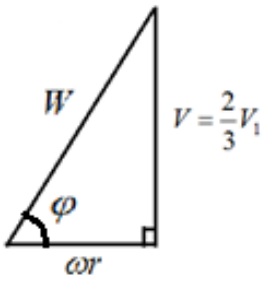
bağıntısı elde edilir. Bu eşitlik, bağıl hızdaki değişim nedeninin kanat elemanında oluşan kaldırma kuvveti olduğunu göstermektedir. Şekil 2.39 da görüldüğü gibi dF_L vektörü ile W vektörü birbirine diktir. Şekil 2.43 da görüldüğü gibi ΔW vektörü ile W vektörü birbirine diktir. O halde dF_L vektörü ile ΔW vektörü birbirine paraleldir.

2.7. Optimum Geometri

Bu bölümde, maksimum gücün oluşması için, c(r) kanat kesit kiriş uzunluğunun ve β(r) bağlanma açısının optimum değerlerinin hesaplandığı formüller elde edilmiştir. Bu formüller, havanın rotor sonrası dönme hareketinin ihmal edilerek hesaplandığı Betz teoremine ve bu dönme hareketlerinin hesaba katıldığı Schmitz teoremine göre ayrı ayrı bulunmuştur.

2.7.1. Momentum Teoremine (Betz Teoremi) göre Optimum Geometri

Betz'e göre maksimum güç, a nın 1/3 değerinde elde edilmektedir. O halde kanat elemanı üzerindeki V hızı, (2.47) eşitliğinde a yerine 1/3 yazılırsa $V = \frac{2}{3}V_1$ olur. Bu durumda kanat elemanı üzerinde V, U ve W rüzgar hızları Şekil 2.44 de gösterildiği gibi olur. Havanın rotor sonrası dönme hareketi dikkate alınmadığından a' teğetsel indüksiyon katsayı değeri sıfır alınmıştır ve böylece U yerine sadece ωr yazılmıştır.



Şekil 2.44. Kanat elemanı üzerinde rüzgar hızları[38]

Şekil 2.44 deki hız diagramından φ akım açısı için,

$$\tan\varphi = \frac{\frac{2}{3}V_1}{\omega r} \tag{2.112}$$

yazılabilir. (2.43) eşitliği ile verilen X uç hız oranı tanımı kullanılırsa,

$$\tan\varphi = \frac{2}{3}\frac{R}{rX} \tag{2.113}$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikten optimum φ açısı için,

$$\varphi_{opt} = \arctan\left(\frac{2}{3}\frac{R}{rX}\right) \tag{2.114}$$

bağıntısı elde edilir. Rüzgar türbin kanat geometrisi oluşturulurken kullanılacak standart kanat kesiti için maksimum C_L / C_D oranının elde edildiği α hücum açısı, α_T tasarım hücum açısı olarak isimlendirilirse kanat kesitinin rotor düzlemiyle yaptığı β bağlanma açısının optimum değeri,

$$\beta_{opt} = \varphi_{opt} - \alpha_T \tag{2.115}$$

eşitliği yazılabilir. Bu eşitlikte (2.114) bağıntısı kullanılırsa,

$$\beta_{opt} = \arctan\left(\frac{2}{3}\frac{R}{rX}\right) - \alpha_T \tag{2.116}$$

formülü elde edilir. Bu formül ile, maksimum gücün oluşmasını sağlayan β bağlanma açısının kanat boyunca değişen değerleri hesaplanır.

Maksimum gücü oluşturan c(r) kanat kesit kiriş uzunluğunun kanat boyunca değişen değerlerini bulmak için, kanat eleman teoremine göre hesaplanan (kanat elemanındaki) güç ile momentum (Betz) teoremine göre belirlenen maksimum güç birbirine eşitlenir.

Betz teoremine göre kanat elemanın süpürme alanında elde edilebilecek maksimum güç, rüzgarda bulunan toplam gücün 16/27 (%59) sidir. O halde, bir kanat elemanında üretilebilen dP_{mak} maksimum güç için,

$$dP_{maks} = \frac{16}{27}(dP_{toplam}) \tag{2.117}$$

eşitliği yazılabilir. Bu eşitlikte dP_{top} toplam güç için,

$$dP_{toplam} = \frac{1}{2}\rho\, V_1^3\, dA \tag{2.118}$$

eşitliği ve kanat eleman dA süpürme alanı için,

$$dA = 2\pi r\ dr \tag{2.119}$$

eşitliği yazılabileceğinden, (2.117), (2.118) ve (2.119) eşitliklerinden

$$dP_{mak} = \frac{16}{27}\ \frac{1}{2}\rho\ V_1^3\ 2\pi r\ dr \tag{2.120}$$

formülü elde edilir. Bu formül ile Betz'e göre bir kanat elemanında elde edilebilecek maksimum güç hesaplanır. (2.92) ve (2.94) eşitlikleri bir kanat elemanı için yazıldığında ve B kanat sayısı dikkate alındığında, bir kanat elemanında üretilebilecek dP güç değeri için,

$$dP = B\ \omega\ r\ dF_y \tag{2.121}$$

eşitliği yazılabilir. (2.120) eşitliği ile ifade edilen Betz maksimum güç değeri ile (2.121) eşitliği ile iade edilen güç değeri birbirine eşitlenirse,

$$B\ \omega\ r\ dF_y = \frac{16}{27}\ \frac{1}{2}\rho\ V_1^3\ 2\pi r\ dr \tag{2.122}$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikteki dF_y terimi için (2.86) eşitliği kullanılır. (2.86) eşitliğinde C_y katsayısı için (2.87) eşitliği, $C_D \cos\varphi \approx 0$ alınarak ve C_L yerine $(C_L)_T$ tasarım katsayısı yazılırsa,

$$dF_y = \frac{1}{2}\rho\ W^2 c\ dr\ (C_L)_T \sin\varphi \tag{2.123}$$

eşitliği elde edilir. (2.121) eşitliğinde, (2.123) eşitliği ve Şekil 2.44 geometrisinden elde edilen

$$W^2 = (\frac{2}{3}V_1)^2 + (\omega\ r)^2 \tag{2.124}$$

ve

$$\sin\varphi = \frac{\frac{2}{3}V_1}{W} \tag{2.125}$$

eşitlikleri ile X uç hızı oranı tanımı ((2.43) eşitliği) kullanılırsa, optimum c(r) kanat kesit kiriş uzunluğu için,

$$C_{Betz}(r) = \frac{16\pi\ r}{9\ B\ X\ (c_L)_T\ \sqrt{\frac{4}{9}+\left(\frac{r}{R}X\right)^2}} \tag{2.126}$$

formülü elde edilir. Betz teoremine göre maksimum gücün elde edildiği c(r) kanat kesit kiriş uzunluğunun kanat boyunca değişen değerleri, bu eşitlik ile hesaplanır[38].

2.7.2. Açısal Momentum Teoremine (Schmitz) göre Optimum Geometri

Rüzgarın rotor sonrası dönme hareketleri Schmitz tarafından hesaba katılarak optimum kanat geometri ölçüleri için formüller elde edilmiştir. Açısal momentum teoremine göre bir kanat elemanında üretilen dP güç değerini elde etmek için önce dF_y teğetsel kuvvet elde edilmelidir. Çünkü, bir kanat elemanı için, (2.94) eşitliğine benzer şekilde

$$dP = \omega\ \mathrm{dT} \tag{2.127}$$

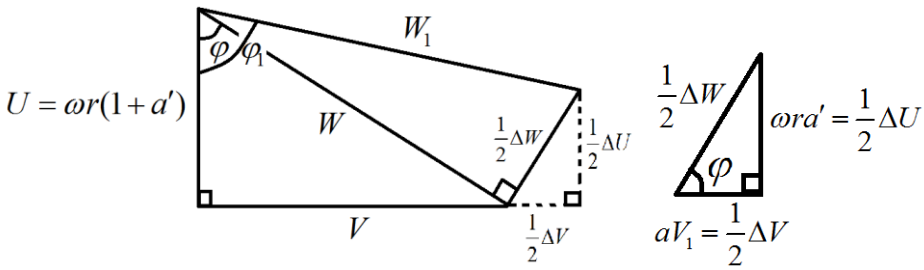
eşitliğini yazmak mümkündür. 2.107 eşitliğindeki dm kütlesel debi yerine

$$dm = \rho\ 2\pi r\ dr\ V \tag{2.128}$$

bağıntısı ve (2.105), (2.108) ve (2.127) eşitlikleri kullanılarak bir kanat elemanında üretilen dP güç değeri için,

$$dP = \omega\ r\ 2\pi r\ \rho\ dr\ V\ \Delta W\ \sin\varphi \tag{2.129}$$

formülü elde edilir. Rotor öncesinde (üst akım) ve rotor üzerinde (kanat elemanında) eksenel, teğetsel ve bağıl hızlardan oluşan hız diyagramı Şekil 2.45 te gösterilmiştir.



(a) Tüm hızlar (b) Hız değişimleri

Şekil 2.45. Üst akımda ve kanat elemanı üzerinde hız diyagramı[38]

Şekil 2.45 deki geometriden şu bağıntılar yazılabilir:

$$\sin(\varphi_1 - \varphi) = \frac{\frac{1}{2}\Delta W}{W_1} \tag{2.130}$$

$$\cos(\varphi_1 - \varphi) = \frac{W}{W_1} \tag{2.131}$$

$$\sin\varphi = \frac{V}{W} \tag{2.132}$$

Şekil 2.45 de verilen hız diyagramından elde edilen bu bağıntılar kullanılarak, (2.129) formülü,

$$dP = \omega\ r 2\pi r\ \rho\ dr\ 2W_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi)\cos(\varphi_1 - \varphi)\sin^2\varphi \tag{2.133}$$

veya

$$dP = \left[\omega r \; 2\pi r \; \rho \; dr \; \mathrm{W}_1^2 \right] \sin\left[2(\varphi_1 - \varphi)\right] \; \sin^2 \varphi \tag{2.134}$$

şeklinde yazılabilir. Kanat elemanında üretilebilecek dP maksimum güç değerini bulmak için (2.134) eşitliğinin sağ tarafının φ açısına göre türevi alınıp sıfıra eşitlenir:

$$\frac{d}{d\varphi}\left(dP\right) = 0 \tag{2.135}$$

Bu eşitlikten elde edilen

$$2\cos(2(\varphi_1 - \varphi)) \; \sin^2 \varphi = 2 \; \sin\varphi \cos\varphi \sin(2(\varphi_1 - \varphi)) \tag{2.136}$$

eşitliğinde gerekli cebirsel düzenlemeler yapılırsa

$$\tan\varphi = \tan(2(\varphi_1 - \varphi)) \tag{2.137}$$

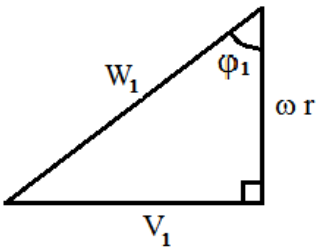
elde edilir. Bu eşitlikten

$$\varphi = \frac{2}{3}\varphi_1 \tag{2.138}$$

sonucuna ulaşılır. φ_1 açısını Şekil 2.46 da verilen hız diyagramından yararlanarak,

$$\tan\varphi_1 = \frac{V_1}{\omega \, \mathrm{r}} \tag{2.139}$$

şeklinde yazılır.



Şekil 2.46. Üst akımda hız diyagramı[38]

(2.139) eşitliğinde, (2.43) eşitliğindeki X uç hız oran tanımı kullanılarak,

$$\tan\varphi_1 = \frac{R}{r}\ \frac{1}{X} \tag{2.140}$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıdan φ_1 açısı için,

$$\varphi_1 = \arctan\left[\frac{R}{r}\ \frac{1}{X}\right] \tag{2.141}$$

sonucuna ulaşılır. Bu sonuç (2.115) eşitliğinde yerine yazılırsa, Açısal momentum (Schmitz) teoremine göre β_{opt} optimum bağlanma açısı için,

$$\beta_{opt} = \frac{2}{3}\arctan\left[\frac{R}{r}\ \frac{1}{X}\right] - \alpha_T \tag{2.142}$$

formülü elde edilir.

Açısal momentum teoremine göre optimum c(r) kanat kesit kiriş uzunluğunu bulmak için, açısal momentum teoremine göre elde edilen maksimum güç, kanat eleman teoremine göre elde edilen güce eşitlenir. Açısal momentum teoremine göre dP güç değerinin maksimum değeri, (2.134) eşitliğinde $\varphi = \frac{2}{3}\varphi_1$ bağıntısı kullanılırsa,

$$dP = \left(2\pi r\ \rho\ \omega\ r\ W_1^2\ dr\right)\sin^3\left(\frac{2\varphi_1}{3}\right) \tag{2.143}$$

eşitliği elde edilir. Kanat eleman teoreminde elde edilen güç için, (2.121) ve (2.123) eşitlikleri birlikte kullanılarak,

$$dP = B\ \frac{1}{2}\rho\ W^2 c\ dr\ \omega\ r\ \left(C_L\right)_T \sin\varphi \tag{2.144}$$

formülü elde edilir. Bu eşitlikte, $\varphi = \frac{2}{3}\varphi_1$ ğıntısı kullanılırsa

$$dP = B\ \frac{1}{2}\rho\ W^2 c\ dr\ \omega\ r\ \left(C_L\right)_T\ \sin(\frac{2}{3}\varphi_1) \tag{2.145}$$

elde edilir. 2.143 ve 2.145 eşitliklerindeki iki güç değeri birbirine eşitlenirse,

$$W^2 B\ c\ \left(C_L\right)_T = 4\pi r\ W_1^2 \sin^2\left(\frac{2}{3}\varphi_1\right) \tag{2.146}$$

eşitliği elde edilir. Şekil 2.45 deki hız diyagramından elde edilen (2.131) bağıntısında φ yerine $\frac{2}{3}\varphi_1$ yazılarak,

$$\cos\left(\frac{\varphi_1}{3}\right) = \frac{W}{W_1} \tag{2.147}$$

eşitliği elde edilir. $\sin(2x) = 2\ \sin x\ \cos x$ trigonometrik özdeşliğine göre

$$\sin(\frac{2}{3}\varphi_1) = 2\sin(\frac{\varphi_1}{3})\cos(\frac{\varphi_1}{3}) \tag{2.148}$$

eşitliği yazılabilir. (2.146) eşitliğinde (2.147), (2.148) ve (2.141) eşitlikleri kullanılırsa, c(r) kanat kesit kiriş uzunluğu için,

$$c(r) = \frac{16\pi r}{B\ (C_L)_T} \sin^2\left(\frac{1}{3}\arctan\left(\frac{R}{rX}\right)\right) \tag{2.149}$$

formülü elde edilir. Bu formül ile, Schmitz teoremine göre maksimum gücün elde edilmesi için kanat kesit kiriş uzunluğunun kanat boyunca değişen değerleri hesaplanır.

2.8. Kanat Eleman Momentum Teoremi

Kanat eleman ve momentum teoremlerinin birleştirilmesi ile oluşturulan teoreme kanat eleman momentum teoremi ismi verilir. Bu teoremde, güç hesabında kullanılan eksenel ve teğetsel hız değişim faktörlerinin hesaplanması için gerekli eşitlikler elde edilmiştir.

a eksenel hız değişim faktörünü hesaplamak için kanat eleman teoreminde elde edilen eksenel kuvvet ile lineer momentum teoreminde elde edilen eksenel kuvvet birbirine eşitlenir.

Kanat eleman teoreminde elde edilen dF_x eksenel kuvvet, (2.81) eşitliğinde B kanat sayısı dikkate alınarak,

$$dF_x = B\ \frac{1}{2}\ \rho\ W^2 c\ dr\ C_x \tag{2.150}$$

eşitliği yazılır. Lineer mometum teoreminde elde edilen (2.53), (2.55) eşitlikleri ile (2.128) eşitliğinden dF_x eksenel kuvvet,

$$dF_x = 2\pi r\ \rho\ dr\ V\ (V_1 - V_3) \tag{2.151}$$

Biçiminde yazılabilir. (2.150) ve (2.151) bağıntıları birbirine eşitlenirse,

$$B\ \frac{1}{2}\rho\ W^2 c\ dr\ C_x = 2\pi r\ \rho\ dr\ V\left(V_1 - V_3\right) \tag{2.152}$$

elde edilir. V eksenel rüzgar hızı, W bağıl rüzgar hızı ve φ akış açısı arasında bağıntı kurabilmek için kanat elemanı üzerindeki hız diyagramından (Şekil 2.47) elde edilen (2.132) eşitliği ile (2.47) ve (2.59) eşitlikleri, (2.152) formülünde yerlerine yazılırsa,

$$BV_1\ (1-a)\ c\ C_x = 8\pi r\ \sin^2\varphi\ V_1\ a \tag{2.153}$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikten,

$$\frac{a}{1-a} = \frac{c\ \mathrm{B}\ \mathrm{C}_x}{8\pi r\ \sin^2\varphi} \tag{2.154}$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıda, kanat eleman için tanımlanan σ katılık oranı için,

$$\sigma = \frac{B\ \mathrm{c}}{2\pi r} \tag{2.155}$$

tanımı kullanılırsa,

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma\ \mathrm{C}_x}{4\ \sin^2\varphi} \tag{2.156}$$

formülü elde edilir. Bu eşitlikten a çekilirse kanat eleman teoreminin en önemli birinci formülü elde edilir:

$$a = \frac{1}{\frac{4\ \sin^2\varphi}{\sigma\ \mathrm{C}_x} + 1} \tag{2.157}$$

a' teğetsel hız değişim faktörünü hesaplamak için açısal momentum teoreminden bulunan teğetsel kuvvet ile kanat eleman momentum teoreminden elde edilen teğetsel kuvvet birbirine eşitlenir. Açısal momentum teoreminde elde edilen dF_y teğetsel kuvvet için (2.110) ve (2.111) eşitliklerinden,

$$dF_y = dm\ \Delta W\ \sin\varphi \tag{2.158}$$

bağıntısı yazılabilir. Kanat eleman teoreminde elde edilen dF_y teğetsel kuvvet için (2.86) eşitliğinde B kanat sayısı hesaba katılarak,

$$dF_y = \left[\frac{1}{2}\ \rho\ W^2\ c\ dr\right] B\ C_y \tag{2.159}$$

formülü elde edilir. (2.158) ve (2.159) eşitliklerindeki bu iki kuvvet birbirlerine eşitlenerek,

$$dm\ \Delta W\ \sin\varphi = \left[\frac{1}{2}\ \rho\ W^2\ c\ dr\right] B\ C_y \tag{2.160}$$

eşitliği elde edilir. Şekil 2.45 de soldaki hız diyagramından,

$$\sin\varphi = \frac{\omega\ r\ a'}{\frac{1}{2}\Delta W} \tag{2.161}$$

ve aynı Şekil 2.45 de sağdaki hız diyagramdan,

$$\cos\varphi = \frac{\omega\ r(1+a')}{W} \tag{2.162}$$

eşitlikleri elde edilir. Bağıl hız terimlerini yok etmek için, (2.161) ve (2.162) eşitlikleri (2.160) bağıntısında yerlerine yazılırsa,

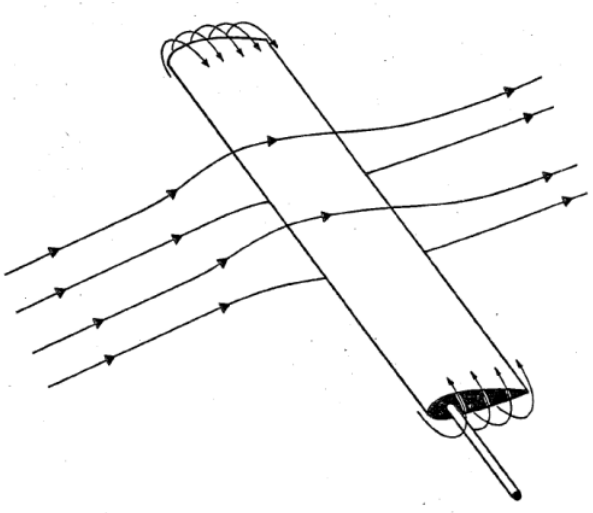
$$\left(8\pi r\right)\ a'\ \sin\varphi\ \cos\varphi = c\ (1+a')\ B\ C_y \tag{2.163}$$

eşitliği elde edilir. Buradan kanat eleman teoreminin ikinci önemli formülü elde edilir [38]:

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{c\ B\ C_y}{8\pi r\ \sin\varphi\ \cos\varphi} \tag{2.164}$$

2.8.1. Uç Kayıpları

Buraya kadar yapılan hesaplamalarda kanat ucunda oluşan güç kaybı dikkate alınmamıştır. Şekil 2.47 de gösterildiği gibi, kanadın altından geçen havanın basıncı, kanadın üstünden geçen havanın basıncına göre daha yüksek olduğundan kanadın ucunda yüksek basınçtan düşük basınca doğru dikey hava akışı oluşur.



Şekil 2.47. Kanat ucunda dikey hava akışı[39]

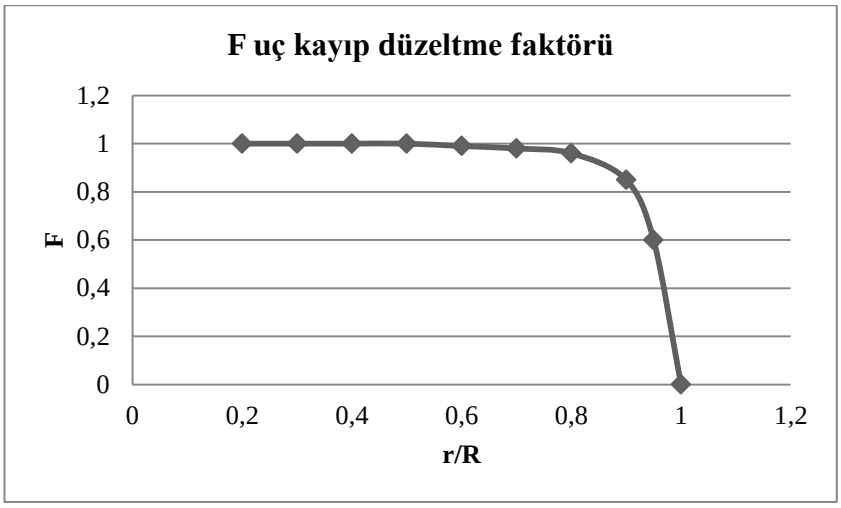
Kanat ucunda oluşan bu dikey hava akışı, kanat ucundaki torkun azalmasına ve dolayısıyla güç kaybına neden olur. Bu kayıp, Prandtl tarafından geliştirilen bir ampirik formül ile hesaplara dahil edilmiştir[39]. B kanat sayısı, R kanat uzunluğu, r kanat elemanının rotor eksenine uzaklığı olmak üzere F uç kayıp düzeltme faktörü

$$f = \frac{B}{2}\frac{R-r}{r\sin\varphi} \tag{2.165}$$

ve

$$F = \frac{2}{\pi}\cos^{-1}\left(e^{-f}\right) \tag{2.166}$$

ampirik formülleri ile verilmiştir. F uç kayıp faktörünün kanat boyunca değişimi Şekil 2.48 de verilmiştir.



Şekil 2.48. F uç kayıp faktörünün kanat boyunca değişimi

F uç kayıp faktörü, indüksiyon katsayı denklemlerinde,

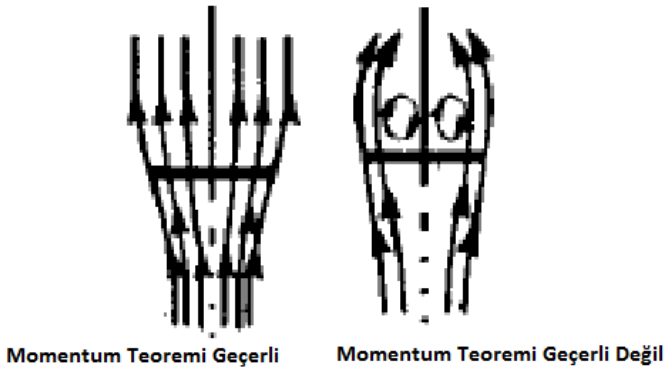
$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma\, C_x}{4\, F\, \sin^2\varphi} \tag{2.167}$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{1}{\dfrac{4\, F\, \sin\phi\, \cos\phi}{\sigma\, C_y} - 1} \tag{2.168}$$

şeklinde yazılarak uç kayıpların dikkate alındığı yeni eşitlikler elde edilir.

2.8.2. Glauert Düzeltmesi

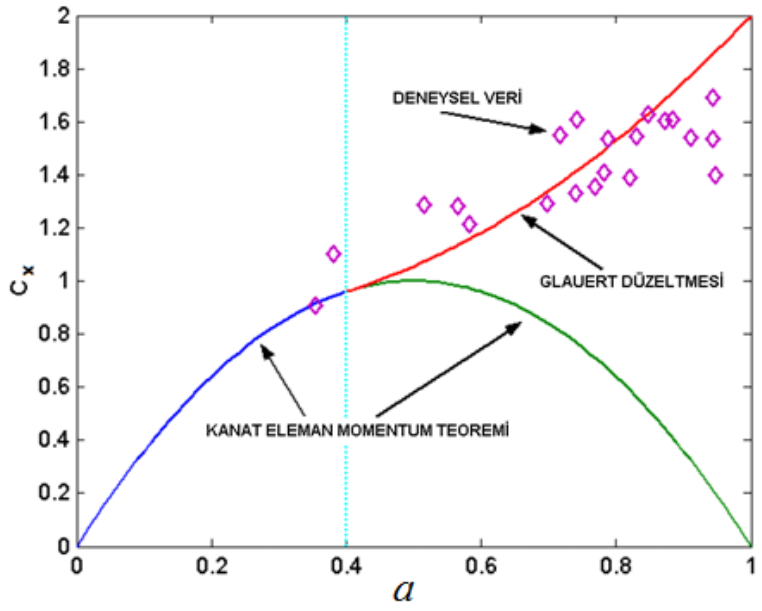
Momentum teoreminin kabullerinden biri de, rotor düzlemini geçen havanın herhangi bir geri dönüş hareketine (ters akış) sahip olmadığıdır. Oysa üst akım ile alt akım eksenel hızları arasındaki değişim büyük olduğunda bu kabul doğru olmamaktadır. Eksenel indüksiyon faktörü a nın özellikle 0,4 ten büyük olduğu durumlarda bu kabul tamamen hatalı olmaktadır. Şekil 2.49, a eksenel indüksiyon faktörünün farklı değer aralıkları için iki farklı hava akışını göstermiştir. $0 \le a \le a_{kritik}$ iken soldaki akış, $a_{kritik} \le a \le 1$ iken sağdaki akış oluşmaktadır.



Şekil 2.49. Mometum teoreminin geçerliliği ve iki farklı akış durumu[1]

Glauert (1935), helikopter rotorları üzerinde yaptığı deneysel çalışmalarla geliştirdiği ampirik formülle momentum teoremine bir düzeltme getirmiştir.

Şekil 2.50, $0 \le a \le a_{kritik}$ için kanat eleman momemtum teoremine göre ve $a_{kritik} \le a \le 1$ için momentum teoreminin geçerli olmadığı Glauert düzeltmesine göre değişen C_x değerlerini grafik olarak göstermektedir.



Şekil 2.50. Glauert Düzeltmesi[40]

$0 \le a \le a_{kritik}$ için momentum teoremine göre elde edilen 2.155 eşitliği kullanılırken, $a_{kritik} \le a \le 1$ için ampirik formül olan,

$$a = \frac{1}{2}\left[2 + K\left(1 - 2a_k\right)\right] \sqrt{\left[K\left(1 - 2a_k\right) + 2\right]^2 + 4\left(K\ a_k^2 - 1\right)} \qquad (2.169)$$

$$K = \frac{4\ F\ \sin^2 \varphi}{\sigma\ C_y} \qquad (2.170)$$

eşitlikleri ile Glauert düzeltmesi yapılır. a_{kritik} değeri 0,2 ile 0,4 aralığında seçilebilir. Bu çalışmada a_{kritik} değeri 0,2 olarak seçilmiştir [40].

2.9. Güç Hesabı Ve Algoritması

Geometrisi oluşturulmuş bir rotorun, belli bir rüzgar hızında üretebileceği maksimum güç değerinin hesaplanması için önce her bir kanat N tane elemana bölünür[38]. Sonra her bir kanat elemanı için φ akış açısı, α hücum açısı, C_y teğetsel kuvvet

katsayısı, C_x eksenel kuvvet katsayısı, F uç kayıp faktörü, σ katılık oranı, a eksenel ve a' teğetsel indüksiyon katsayı değerleri ($a > a_k$ için Glauert düzeltmesi yapılarak) iterasyonla hesaplanır. Bu değerler bulunduktan sonra dF_x eksenel kuvvet, dF_y teğetsel kuvvet, dP güç değerleri her bir kanat elemanı için ayrı ayrı bulunur. Her bir kanat elemanı için bulunan dF_x, dF_y, dP değerleri (kanat sayısını dikkate alarak) integre edilerek rotorun ürettiği toplam F_x, F_y, P değerleri elde edilir. Ayrıca C_P'nin rotor için değeri hesaplanır. Bu işlemler, aşağıdaki sırasıyla yapılır:

1. İndüksiyon katsayı (a ve a') değerleri, 1. ve 11. işlem aralığında iterasyonla hesaplanır. İterasyon başlangıcında bu değerler sıfır olarak alınabilir.

2. Aşağıda verilen eşitlik ile φ akış açısı hesaplanır.

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{(1-a)\ V_1}{(1+a')\ \omega\ r}\right)$$

3. Aşağıdaki eşitlik ile α hücum açısı bulunur. Burada β bağlama açısı tasarımı yapılan kanat geometrisinden bilinmektedir.

$$\alpha = \varphi - \beta$$

4. Seçilen kanat kesit geometrisinin bu α hücum açısındaki C_L ve C_D değerleri, stall öncesi için tanımlanan polinom fonksiyonu ve stall sonrası için Viterna eşitlikleri ile hesaplanır.

5. Aşağıdaki verilen eşitlik ile kanadı döndüren teğetsel kuvvet katsayısı bulunur.

$$C_y = C_L \sin\varphi - C_D \cos\varphi$$

6. Aşağıda verilen eşitlik ile kanada etkiyen eksenel kuvvet katsayısı elde edilir.

$$C_x = C_L \cos\varphi + C_D \sin\varphi$$

7. Aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak $F_{uç}$ kayıp faktörü hesaplanır.

$$F = \frac{2}{\pi}\cos^{-1}\left(e^{-f}\right)$$

$$f = \frac{B}{2}\frac{R-r}{r-\sin\varphi}$$

8. Aşağıda verilen formül ile kanat elemanı için katılık oranı bulunur.

$$\sigma = \frac{c\ B}{2\pi r}$$

9. Aşağıda verilen eşitlik ile a eksenel indüksiyon faktörünün değeri elde edilir.

$$a = \frac{1}{\frac{4F\sin^2\varphi}{\sigma\ C_x}+1}$$

10. Hesaplanan a değeri eğer a_{kritik} değerden küçük ise 10. işlem yapılmaz. Ancak, $a > a_{kritik}\ \left(a_{kritik} = 0,2 \text{ alınabilir}\right)$ ise aşağıdaki formüller kullanılarak Glauert düzeltmesi yapılır:

$$a = \frac{1}{2}\left[2+K\left(1-2a_k\right)\right]\sqrt{\left[K\left(1-2a_k\right)+2\right]^2+4\left(K\ a_k^2-1\right)}$$

$$K = \frac{4\ F\ \sin^2\varphi}{\sigma\ C_x}$$

11. Aşağıda verilen eşitlik ile a' teğetsel indüksiyon faktörünün değeri elde edilir.

$$a' = \frac{1}{\frac{4F\sin\varphi\cos\varphi}{\sigma\ C_y}-1}$$

12. Bulunan a ve a' değerleri, başlangıç değerleri olarak yerlerine yazılarak, yukarıdaki 1 ile 11 arasındaki işlemler

$$\left|a_{n+1}-a_n\right| < 0,001 \ ve\ \left|a'_{n+1}-a'_n\right| < 0,001$$

şartları sağlanana kadar iterasyona sokulur.

13. a ve a' değerleri bulunduktan sonra aşağıdaki eşitlik ile W bağıl hızı hesaplanır.

$$W = \sqrt{\left[(1-a)V_1\right]^2 + \left[(1+a')\ \omega\ r\right]^2}$$

14. Buraya kadar olan işlemlerde hesaplanan değerleri W, C_x , C_y kullanılarak

$$dF_x = \left(\frac{1}{2}\ \rho\ W^2 c\ dr\right) C_x$$

ile kanat elemanına etkiyen eksenel kuvvet,

$$dF_y = \left(\frac{1}{2}\rho\ W^2\ c\ dr\right) C_y$$

eşitliği ile kanat elemanına etkiyen teğetsel kuvvet,

$$\mathrm{dT} = \mathrm{r}\ \mathrm{dF_y}$$

eşitliği ile tork,

$$dP = \omega\ dT$$

eşitliği ile kanat elemanında oluşan güç hesaplanır.

15. Kanat sayısını (B) hesaba katarak aşağıdaki formüller ile rotordaki toplam F_y teğetsel kuvvet, toplam P güç ve toplam F_x eksenel kuvvet değerleri elde edilir.

$$F_y = B\sum_{i=1}^{N}\left(dF_y\right)_i$$

$$\mathrm{P} = B\sum_{i=1}^{N}\left(dP\right)_i$$

$$F_x = B\sum_{i=1}^{N}\left(dF_x\right)_i$$

16. Aşağıda verilen formül ile rotorun güç çarpan değeri hesaplanır. Burada P rotorda üretilen güç değeri, A rotorunun alanı, V_1 serbest rüzgar hızı, ρ havanın yoğunluğudur.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A V_1^3}$$

2.10. Küçük Boyut Rüzgar Türbin Kanat Tasarımı

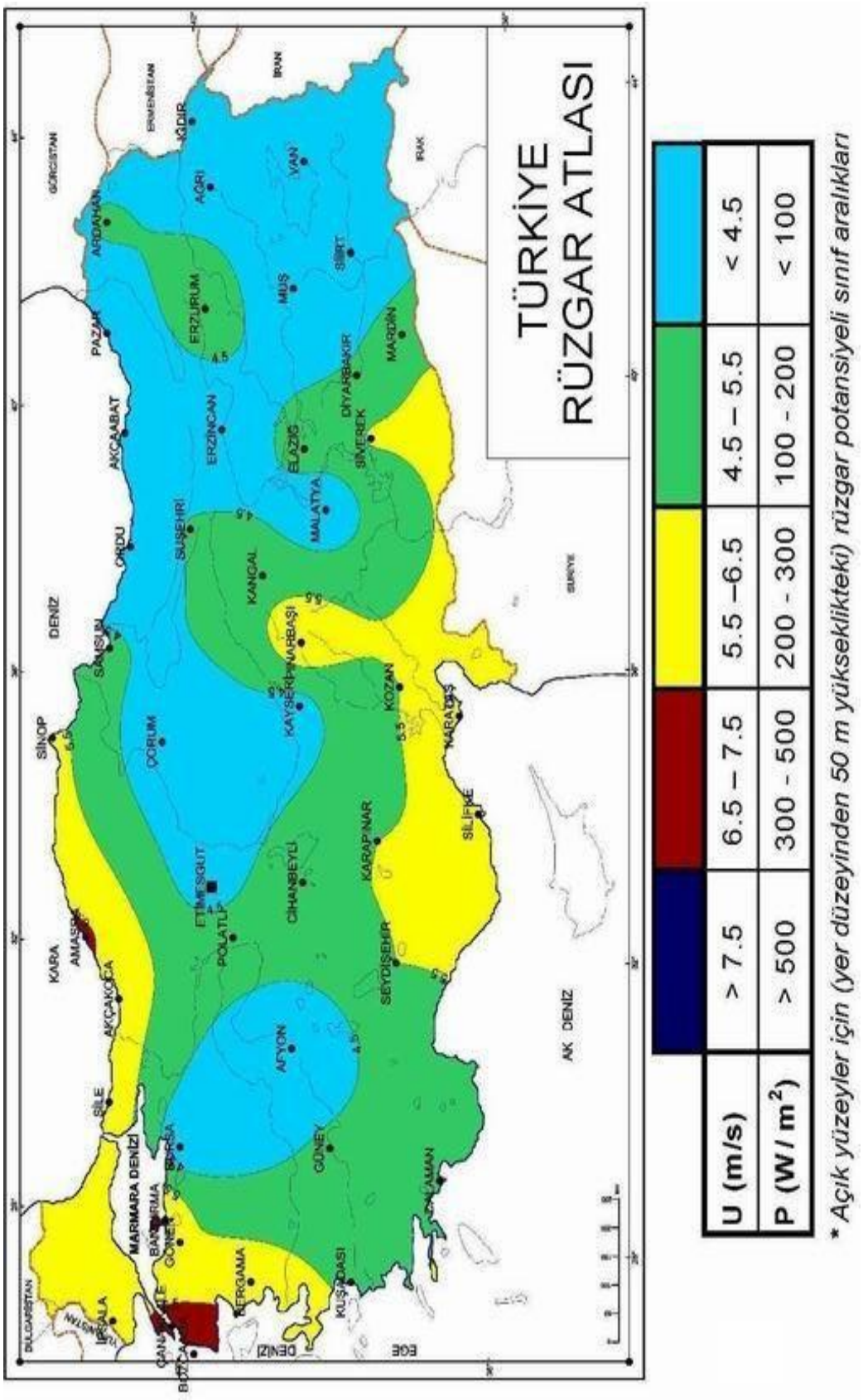
2.10.1. Amaç

Rüzgardan elde edilen enerjinin çok büyük bölümü geniş arazilerde kurulan ve şebekeye bağlı olan büyük ticari rüzgar türbinlerinden elde edilmektedir. Oysa, dünya nüfusunun yaklaşık % 80 i kırsal kesimlerde yaşamakta ve yaklaşık % 65 i şebekeden elektrik enerjisi temin edememektedir. Gelecek 30 yıl içinde şebekeden yararlanamayacak insan sayısının yaklaşık 2 milyar civarında olacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle küçük ve şebekesiz yerlerde rüzgar yardımıyla enerji temini yüksek bir potansiyele sahip olabilecektir.

Özellikle ülkemizin kırsal kesimlerde kendi elektriğini kendi arazisinde veya binasının üstünde üretmek isteyenler için verimi yüksek küçük rüzgar türbinlerine ihtiyaç vardır. Ayrıca, küçük rüzgar türbinlerinin kullanımı için, çiftlik evleri, telekomünikasyon aktarıcıları, radyo ve orman kuleleri, balık çiftlikleri, seralar vb. yerlerde söz konusudur.

2.10.2. Tasarım Rüzgar Hızı Ve Türbin Büyüklüğü

Türkiye Rüzgar Atlasına (Şekil 2.51) bakıldığında sarı renkte belirlenen bölgelerde 50 m yükseklilte rüzgar hızı, açık arazilerde 5,5 - 6,5 m/s aralığında olduğu anlaşılmaktadır. Kırsal kesimlerde kurulacak türbine gelen rüzgarın hızını etkileyen engellerin dikkate alınması, üretilmesi planlanan güce uygun türbin büyüklüğü, direk-türbin masraf ilişkisi ve türbin kanat ile yer arasındaki emniyet mesafesi açısından türbin göbek yüksekliği olarak 12 metreye karar verilmiştir.



Şekil 2.51. Türkiye Rüzgar Enerji Potansiyel Dağılımı [41]

Haritada verilen 50 metre yükseklikteki rüzgar hızının 12 metredeki karşılığını bulmak için ampirik olarak verilen [42]

$$V = V_R \left(\frac{h}{h_R} \right)^{\sigma} \tag{2.171}$$

formülü kullanılır. Burada,

h: rüzgar hızının hesaplandığı yükseklik

V : h yüksekliğinde hesaplanan rüzgar hızı

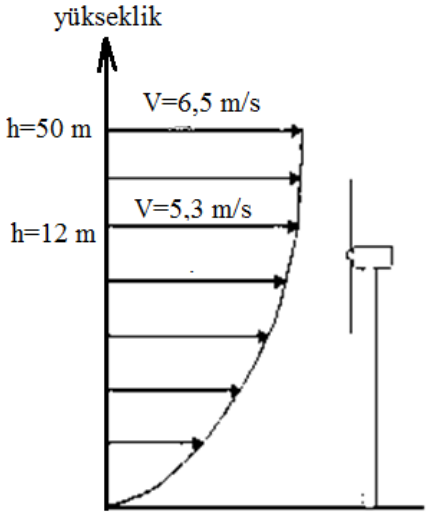
h_R: referans alınan seviye yüksekliği,

V_R : referans seviyedeki rüzgar hızı,

σ: yüzey pürüzlülüğüne bağlı üstel katsayıdır. Bu katsayı,

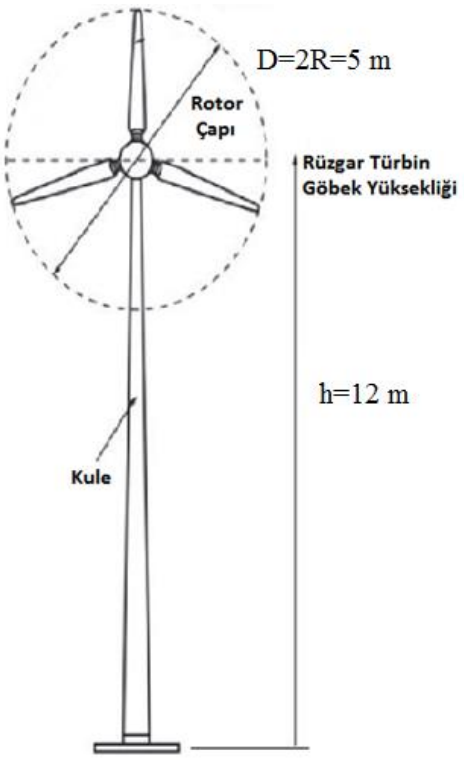
$$\sigma = 0,351 - 0,192 \ \log(V_R) \tag{2.172}$$

formülü ile hesaplanabilir. 50 m yükseklikteki rüzgar hızı 6,5 m/s alındığında, 12 m yüksekliğindeki V rüzgar hızı 5,3 m/s olarak bulunur. (Şekil 2.52)



Şekil 2.52. Tasarım rüzgar hızı ve rüzgar türbin göbek yüksekliği[42]

Türkiye'nin birçok bölgesinde kendi elektriğini üretmek isteyenler için tasarlanacak rüzgar türbinin yaklaşık 800 watt gücünde, kanat uzunluğu 2,5 m (rotor çapı 5 m), tasarım rüzgar hızı da 5 m/s ve göbek yüksekliğinin 12 m olmasına karar verilmiştir (Şekil 2.54).

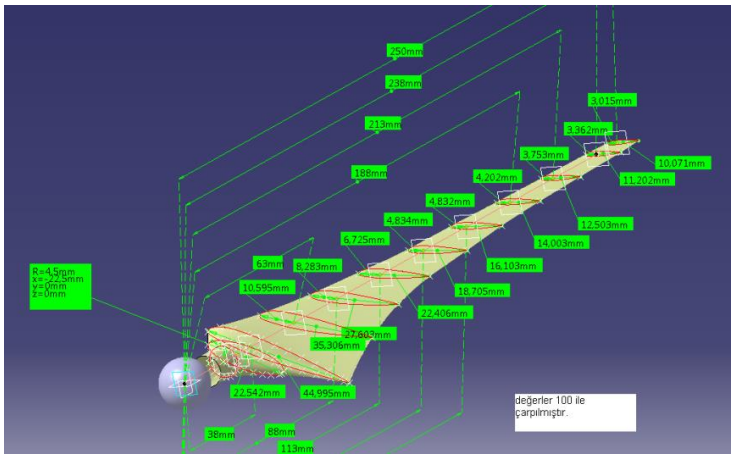


Şekil 2.53. Tasarımı yapılan rüzgar türbini

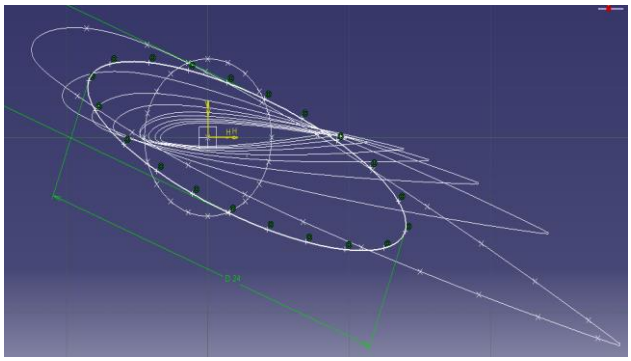
2.10.3. Tasarım Aşamaları

Önce tasarım X uç hız oranı 7 ve kanat kesiti olarak NACA 23012 alınıp kanat geometrisi oluşturulmuştur. Kanat on elemana ayrılıp, her bir eleman için optimum kanat kesit kiriş uzunlukları ve bağlanma açıları, Schmitz teoremine göre excel programında elde edilmiştir. NACA 23012 kanat kesiti ve X=7 uç hız oranı kullanılarak tasarlanan kanadın güç çarpan değerleri farklı uç hız oranlarına göre hesaplanmıştır. Bu hesapların yapıldığı program, excel de kanat eleman momentum

teoremine göre hazırlanmıştır. NACA 23012 kanat kesiti ve tasarım X=7 uç hız oranı kullanılarak 5 m çapında üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbin geometrisi catia programında çizilmiştir. Üç boyutlu kanat geometrisini oluştururken kanat göbek kısmında çember, kanat geçiş bölgesinde ise elips kesitler kullanılmıştır. Kanat elemanlarından birincisi için bu kesitler (bu elemanda hiç güç üretilmediği kabul edilmiştir) ve diğer elemanlar için ise NACA 23012 kesitleri hesaplanan kiriş uzunluk ve bağlanma açılarına göre yerleştirilmiştir. Kanat ekseni, kesitlerin hücum kenarlarından kiriş uzunluğunun %30 uzağından geçecek şekilde yerleştirilmiştir. Kanatlar güç kontrolü (yunuslama - pitching) için bu eksen etrafında döndürülecektir.



Şekil 2.54. Tasarımı yapılan kanat geometrisinin üç boyutlu görünümü



Şekil 2.55. Tasarımı yapılan RT'nin kanat kesit görünümü

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

İdeal disk (doğrusal momentum) teoremi, açısal momentum teoremi, kanat eleman teoremleri ile geliştirilen Betz ve Schmitz teoremleri kullanılarak optimum kanat geometrisi elde edilmiştir. Elde edilen bu geometrinin performansı ise, kanat eleman momentum teoremi ile hesaplanmıştır.

Küçük boyutlarda bir rüzgar türbin tasarımı yapılmıştır. Rüzgar hızı 5 m/s, kanat uzunluğu 2,5 m alınarak tasarlanan üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbin kanat geometrisi için önce NACA 23012 kanat kesiti kullanılmış ve X uç hız oranı 7 alınmıştır. Bu kanadı oluşturan tüm kanat elemanlarına ait eksenel ve teğetsel indüksiyon katsayıları, eksenel ve teğetsel kuvvetlerin değerleri ve elde edilen güç değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak türbinin güç çarpanı ve üretilen toplam güç miktarı elde edilmiştir. Betz ve Schmitz teoremlerine göre elde edilen kanat geometrileri ve bu kanatlarda oluşan performans sonuçları karşılaştırılmıştır.

Uç hız oranının güç çarpan değeri üzerindeki etkilerini görebilmek amacıyla, üç farklı standart kanat kesitinin üç farklı tasarım uç hız oranında elde edilen güç çarpan değerleri karşılaştırılmıştır. Tasarım uç hız oranına göre oluşturulan kanadın, farklı uç hız oranlarındaki çalışma durumunda elde edilen güç çarpan değerleri karşılaştırılarak maksimum güç eldesinin tasarım uç hız oranında olup olmadığı araştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan kanat kesitleri NACA 4412, NACA 23012 ve NREL S 809 olmuştur.

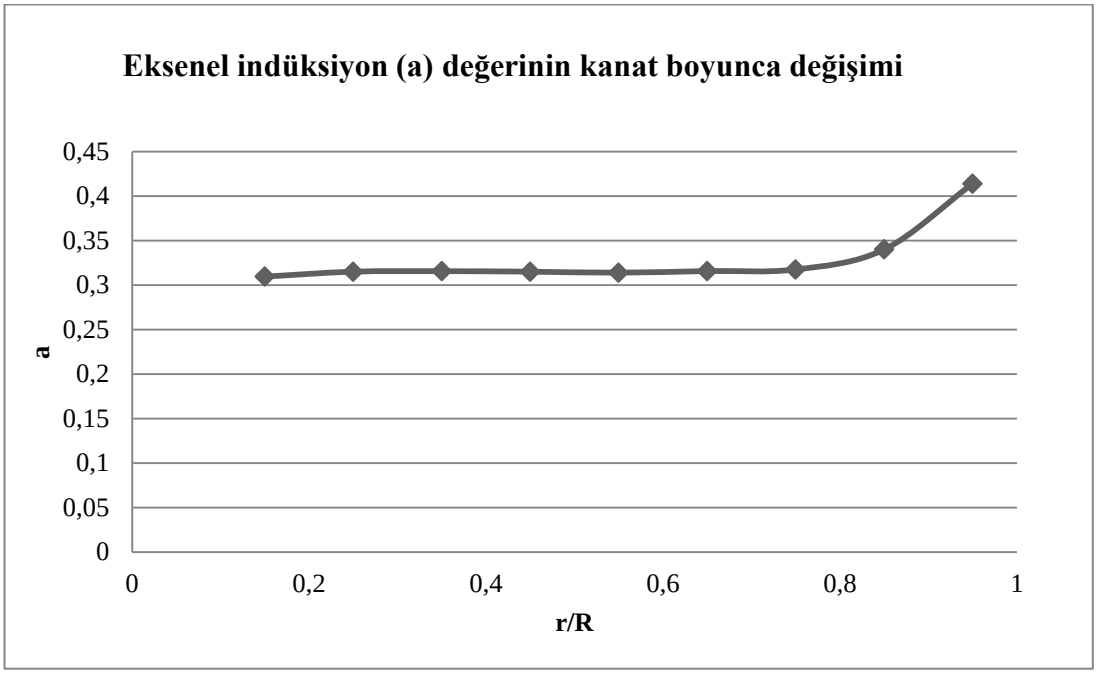
Dört farklı standart kanat kesiti (NACA 4412, NACA 23012, NREL S 809, FFA-W3-211) kullanılarak elde edilen optimum geometriler ve bu geometrilerin kanat boyunca yerleştirilen tüm kanat elemanlarında elde edilen performans değerleri için karşılaştırılmıştır.

8 farklı standart kanat kesitinin aerodinamik katsayıları karşılaştırılmış ve bu kesitler kullanılarak elde edilen kanatlar için, kanat eleman momentum teoremine göre hesaplanan güç çarpan değerleri karşılaştırılmıştır. Buradaki amaç, kanat kesitlerinin

aerodinamik özelliklerinin etkilerini incelemektir. Bu standart kanat kesitleri şunlardır: NACA 0012, NACA 4412, NACA 23012, NACA 63-215, NREL S 809, FFA-W3-211, DU 93-W-210, RIS0 A1-21. En son olarak da, standart kanat kesitlerinde (NACA 0012 ve NACA 4412) yapılan bazı değişikliklerle elde edilen üç yeni geometriye sahip kanat kesitlerinin (MB 01, MB02, MB 03) HAD ile aerodinamik analizi yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

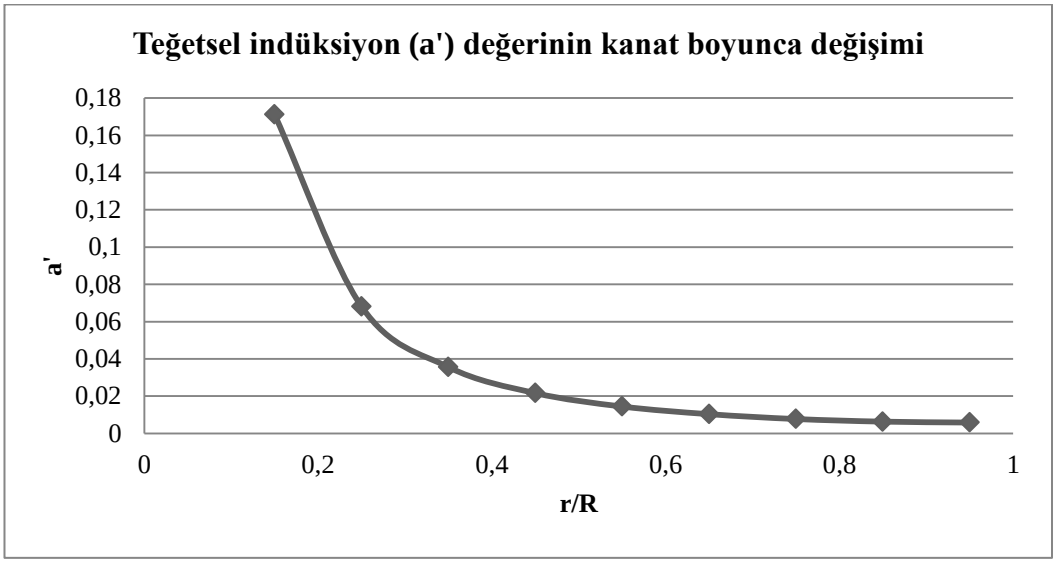
3.1. Kanat Boyunca Değişen Değerler

NACA 23012 standart kanat kesiti ve X=7 uç hız oranına göre tasarlanan kanat geometrisinde eksenel ve teğetsel indüksiyon katsayılarının, eksenel ile teğetsel kuvvetlerin ve gücün kanat elemanlarında oluşan değerleri Şekil 3.1, Şekil 3.2, şekil 3.3, Şekil 3.4, Şekil 3.5 de grafikler olarak verilmiştir.



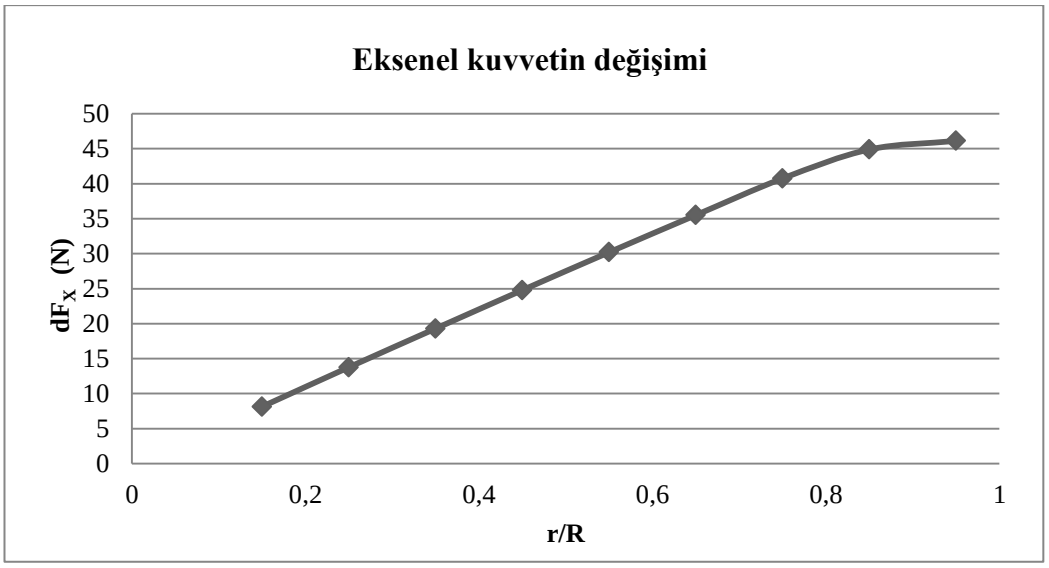
Şekil 3.1. Eksenel indüksiyon katsayısının kanat boyunca değişimi

Şekil 3.1 de görüldüğü gibi, eksenel indüksiyon değeri kanat boyunca pek fazla değişmemektedir. Sadece kanat uç kısmında biraz artmaktadır. Yani eksenel rüzgar hızı kanat uç kısmında daha çok değişim göstermekte diğer kısımlarda aynı oranda değişmektedir.



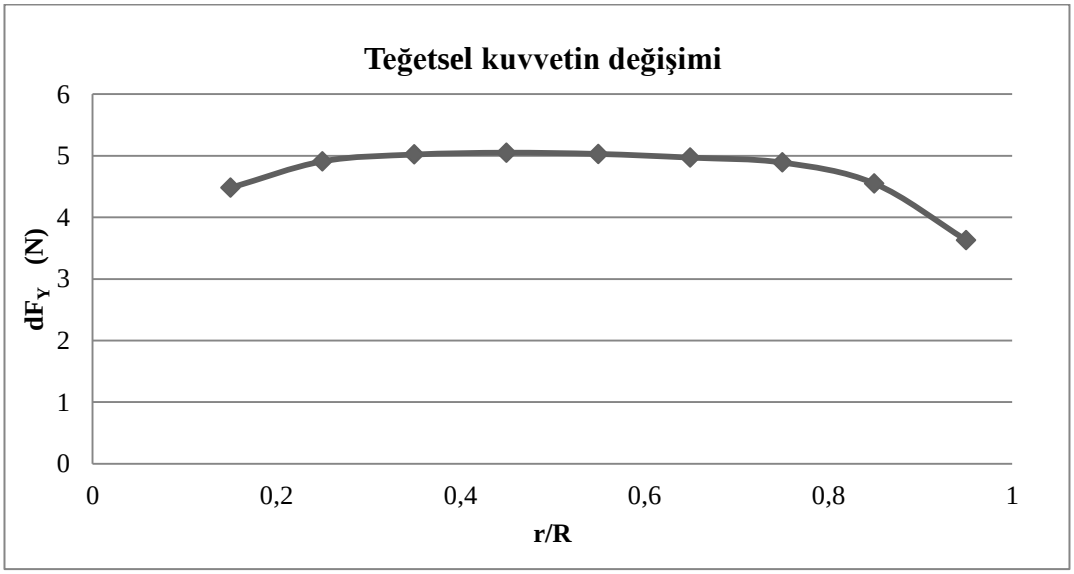
Şekil 3.2. Teğetsel indüksiyon katsayısının kanat boyunca değişimi

Şekil 3.2 de görüldüğü gibi kanat kök kısmında teğetsel indüksiyon katsayı değeri kanadın diğer kısımlarına göre çok daha büyük değerlere sahiptir. Yani, rüzgarın teğet hızı kanat kök kısmında daha çok değişmektedir.



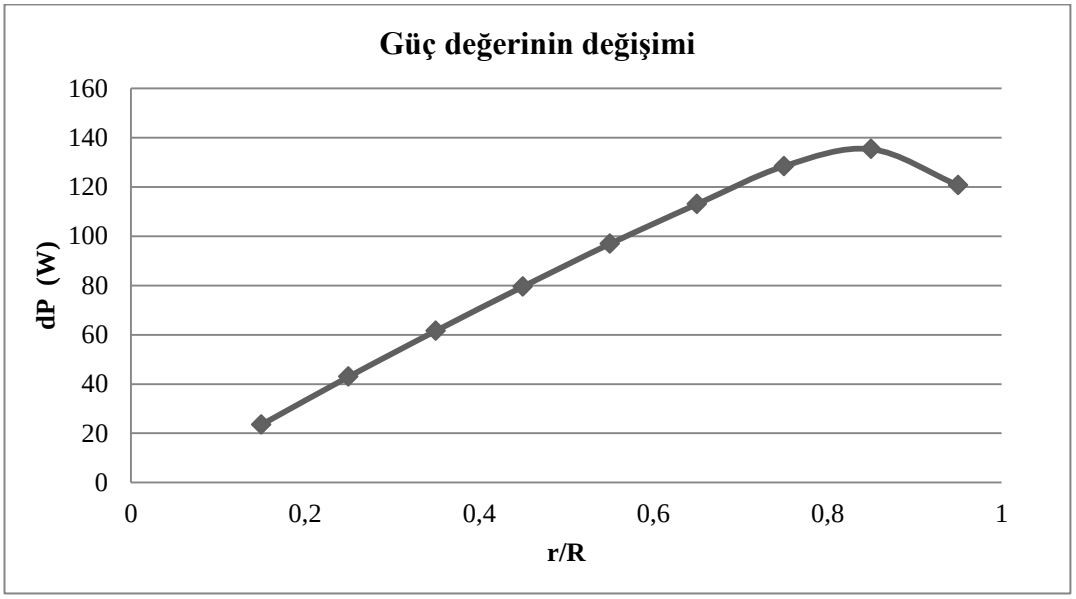
Şekil 3.3. Eksenel kuvvetin kanat boyunca değişimi

Şekil 3.3 de görüldüğü gibi eksenel kuvvet kanat ucuna doğru gidildikçe artmaktadır. Bu durum kanat uçlarının geriye doğru esnemesine neden olacaktır.



Şekil 3.4. Teğetsel kuvvetin kanat boyunca değişimi

Şekil 3.4 de görüldüğü gibi teğetsel kuvvet kanat boyunca pek fazla değişmemektedir. Kanat ucundaki uç kayıplarından dolayı azalma söz konusudur. Teğetsel kuvvet torkun oluşmasını sağladığından kanat uç kayıpları tork ve dolayısı ile güç kaybına neden olmaktadır.

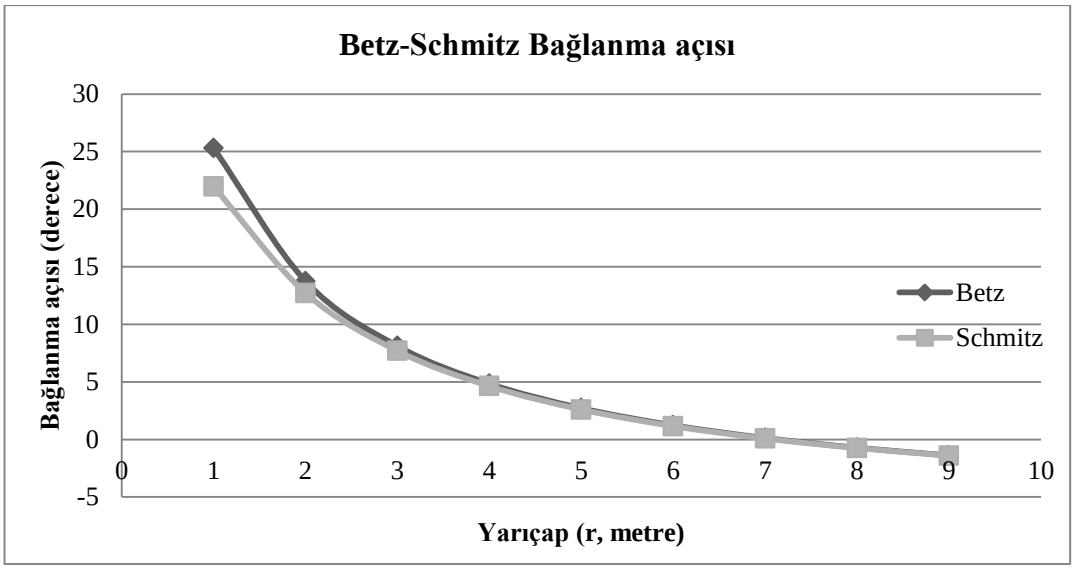


Şekil 3.5. Güç değerinin kanat boyunca değişimi

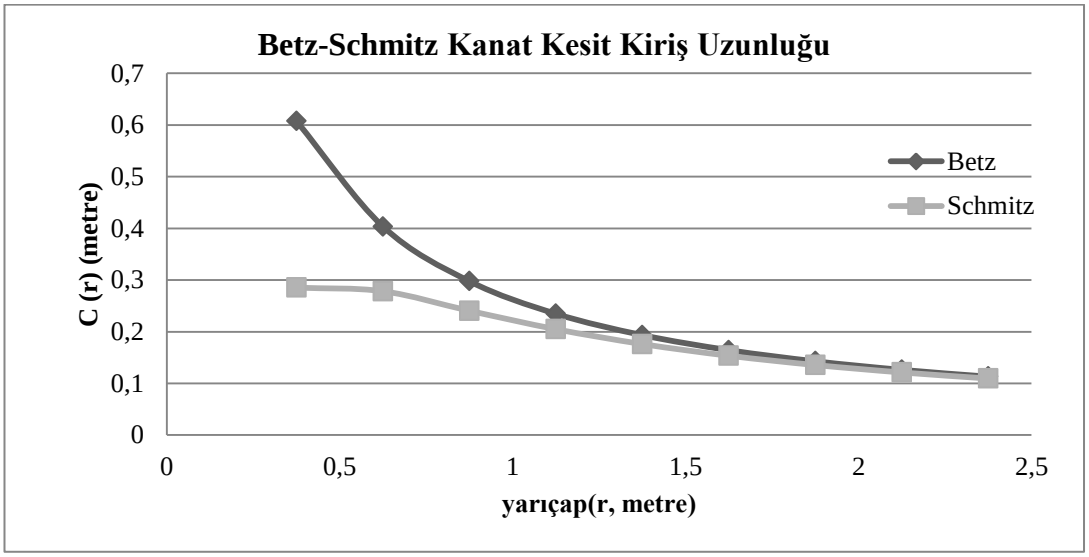
Şekil 3.5 de görüldüğü gibi kanat elemanlarında üretilen güç, kanat uç kısmına doğru artmaktadır. En uçta ise kanat uç kayıplarından dolayı tekrar azalmaktadır.

3.2. Betz ve Schmitz Karşılaştırması

Betz (eksenel momentum) ve Schmitz (açısal momentum) teoremlerine göre elde edilen optimum geometriler Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 3.6. Betz ve Schmitz'e göre bağlanma açısının kanat boyunca değişimi



Şekil 3.7. Betz ve Schmitz'e göre kanat kesit kiriş uzunlukları

Bu iki teoremle elde edilen optimum geometriler arasındaki fark, bağlanma açısında önemli oranda değil iken kanat kesit kiriş uzunluğu için özellikle kanat kök kısmında önemli oranda olduğu anlaşılmaktadır. Betz ve Schmitz Teoremlerine göre elde

edilen optimum geometrilerin PEM Teoremine göre kanat elemanlarında ve kanatta elde edilen performans sonuçları Çizelge 3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Betz - Schmitz performans karşılaştırması

NACA 23012			1	2	3	4	5	6	7	8	9	TOPLAM		
BETZ	dP	W	22,5	43,04	61,97	80,08	97,57	114,4	129,97	140,82	125,8	P	W	816,1
	dF y	N	4,29	4,92	5,06	5,08	5,07	5,03	4,95	4,73	3,78	Cp	-	0,54
	dF x	N	7,53	13,85	19,64	25,25	30,78	36,23	41,55	46,27	47,55			
SCHMİTZ	dP	W	23,5	42,96	61,55	79,5	96,86	112,99	128,41	135,34	120,66	P	W	801,7
	dF y	N	4,48	4,91	5,02	5,05	5,03	4,97	4,89	4,55	3,63	Cp	-	0,53
	dF x	N	8,14	13,77	19,3	24,79	30,2	35,51	40,75	44,89	46,12			

Çizelge 3.1 den, Betz optimum geometrisi daha iyi performans gösteriyor gibi anlaşılması yanıltıcıdır. Betz geometrisi oluşturulurken; rotor sonrası havanın dönme hareketinden kaynaklanan kayıplar dikkate alınmadığından, daha yüksek performans sonuçları elde ediliyor. Buradaki yaklaşık %2 lik fark bu kayıpları göstermektedir. Schmitz teoremi bu kayıpları göz önüne aldığından daha güvenilir sonuçlar vermiştir.

3.3. Uç Hız Oranının Performans Etkisi

Uç hız oranı, rüzgar türbinlerinin güç çarpan değerini etkileyen en önemli değişkendir. Eğer rüzgar türbin rotoru çok yavaş dönerse, rüzgarın önemli bir kısmı kanatlar arasından enerjisi alınmadan gider. Eğer, rotor çok hızlı dönerse kanatlar rüzgar karşısında katı bir duvar gibi davranır ve sadece itme oluşur; kanatlara dönme hareketi verecek tork oluşmaz. Diğer bir anlatımla; kanatlar hava içinde dönerken, izlerinde türbülans oluştururlar. Eğer bir sonraki kanat bu noktaya (önceki kanadın oluşturduğu türbülanslı havanın bulunduğu noktaya) geldiğinde hava hala türbülans durumunda ise yeni kanat rüzgardan gücü verimli bir şekilde alamayacaktır. Ancak rotor bu hızdan biraz daha yavaş dönerse bu durumda türbülanslı durumla karşılaşmayacak ve rüzgardan daha fazla güç alabilecek. Bu nedenle uç hız oranı

öyle seçilmelidir ki, kanatlar bir önceki kanadın oluşturduğu türbülansa yakalanmamalıdır. Yani, rüzgardan maksimum güç çekilebilmesi için optimum uç hız oranı belirlenmelidir. Herhangi bir rüzgar türbini için, en iyi verimi sağlayan uç hız oranını bulduran bir formül yoktur. Dolayısıyla önce uç hız oranı olarak uygun bir değer alınır, tasarım yapıldıktan sonra farklı uç hız oranlarında ölçülen performanslar karşılaştırılarak hangi uç hız oranında en yüksek güç ürettiği tesbit edilir. Tasarım uç hız oranı 7 alınıp, NACA 4412 kanat kesiti kullanılarak elde edilen optimum kanat geometrisinin farklı uç hız oranlarındaki çalışma durumlarında elde edilen performans değerleri Çizelge 3.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.2. X=7, NACA 4412; farklı uç hız oranlarındaki performans sonuçları

NACA 4412				
Tasarım Uç Hız Oranı; X=7				
X=6	Güç	P	W	831,78
	Verim	η	%	94,31
	Tork	T	Nm	69,32
	Güç çarpanı	C_P	-	0,55
X=7	Güç	P	W	872,63
	Verim	η	%	98,94
	Tork	T	Nm	62,33
	Güç çarpanı	C_P	-	0,5805
X=8	Güç	P	W	886,24
	Verim	η	%	99,643
	Tork	T	Nm	55,39
	Güç çarpanı	C_P	-	0,5895
X=9	Güç	P	W	892,72
	Verim	η	%	98,363
	Tork	T	Nm	49,595
	Güç çarpanı	C_P	-	0,582
X=10	Güç	P	W	838,12
	Verim	η	%	95,032
	Tork	T	Nm	41,906
	Güç çarpanı	C_P	-	0,5575

Çizelge 3.2 den anlaşılacağı gibi X=7 için tasarlanan kanat geometrisinde maksimum güç çarpanı uç hız oranının 7 değerinde değil; 8 değerindedir!

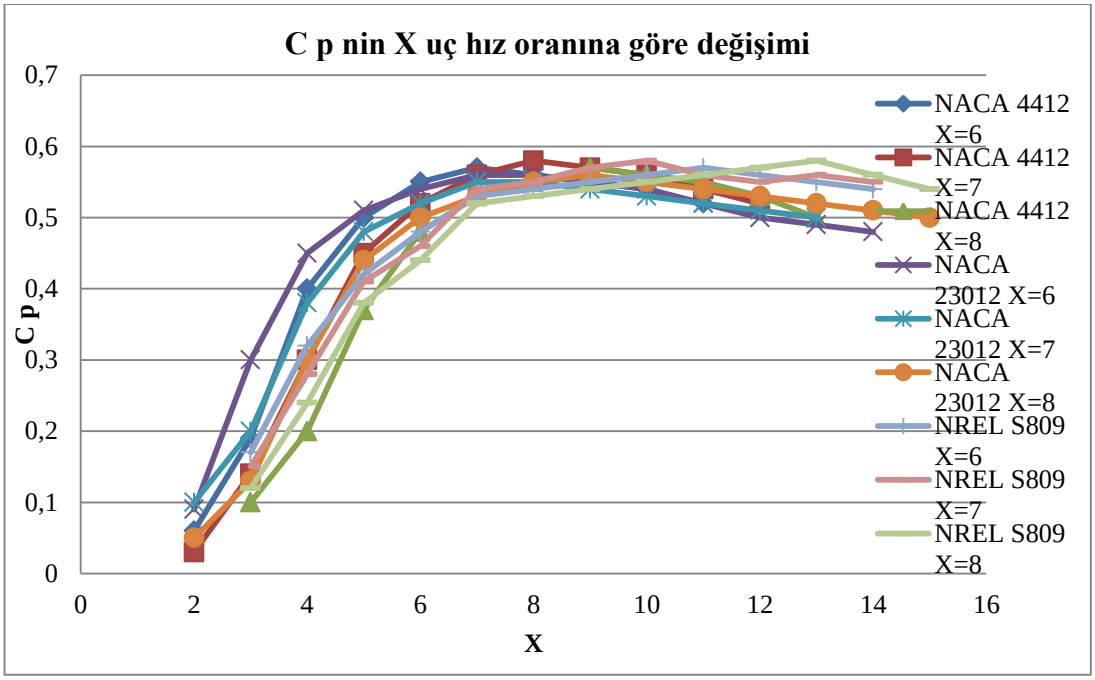
Diğer bir çalışma, optimum kanat geometrisini elde ederken alınan tasarım uç hız oranı 6, 7 ve 8 seçilmiştir. Böylece farklı tasarım uç hız oranlarının performansa etkileri daha iyi irdelenmiş olacaktır. NACA 4412, NACA 23012 ve NREL S 809 kanat kesitleri kullanılarak 9 farklı kanat geometrisi elde edilmiştir. Elde edilen bu tasarımların performans yani güç çarpan değerleri farklı çalışma hızlarında hesaplanmıştır. Sonuçlar hem grafik olarak Şekil 3.8 de ve hem de çizelge olarak Çizelge 3.3 de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Dokuz farklı kanat geometrisinin güç çarpan değerleri

	NACA 4412 C p Değerleri			NACA 23012 C p Değerleri			NREL S809 C p Değerleri		
Çalışma X değeri	Tasarım X=6	Tasarım X=7	Tasarım X=8	Tasarım X=6	Tasarım X=7	Tasarım X=8	Tasarım X=6	Tasarım X=7	Tasarım X=8
2	0,06	0,03	?	0,09	0,1	0,05	?	?	?
3	0,19	0,14	0,1	0,3	0,2	0,13	0,17	0,15	0,12
4	0,4	0,3	0,2	0,45	0,38	0,3	0,32	0,28	0,24
5	0,5	0,45	0,37	0,51	0,48	0,44	0,42	0,41	0,38
6	0,55	0,52	0,48	0,54	0,52	0,5	0,48	0,46	0,44
7	0,57	0,56	0,53	0,56	0,55	0,53	0,53	0,54	0,52
8	0,56	0,58	0,55	0,56	0,56	0,55	0,54	0,55	0,53
9	0,55	0,57	0,57	0,55	0,54	0,56	0,55	0,56	0,54
10	0,54	0,56	0,56	0,54	0,53	0,55	0,56	0,57	0,55
11	0,52	0,54	0,55	0,52	0,52	0,54	0,55	0,55	0,56
12	?	0,52	0,53	0,5	0,51	0,53	0,54	0,54	0,57
13	?	?	0,5	0,49	0,5	0,52	0,53	0,53	0,58
14	?	?	?	0,48	?	0,51	0,52	0,52	0,56
15	?	?	?	?	?	0,5	?	?	0,54

Üç farklı kanat kesiti için de şu sonuç elde edilmiştir: En yüksek güç çarpan değeri tasarım uç hız oranından 1 veya 2 daha yüksek değerlerde elde edilmektedir.

Çizelgedeki ‘?’ işaretleri, iterasyon işleminde yakınsama elde edilemeyen durumları göstermektedir.

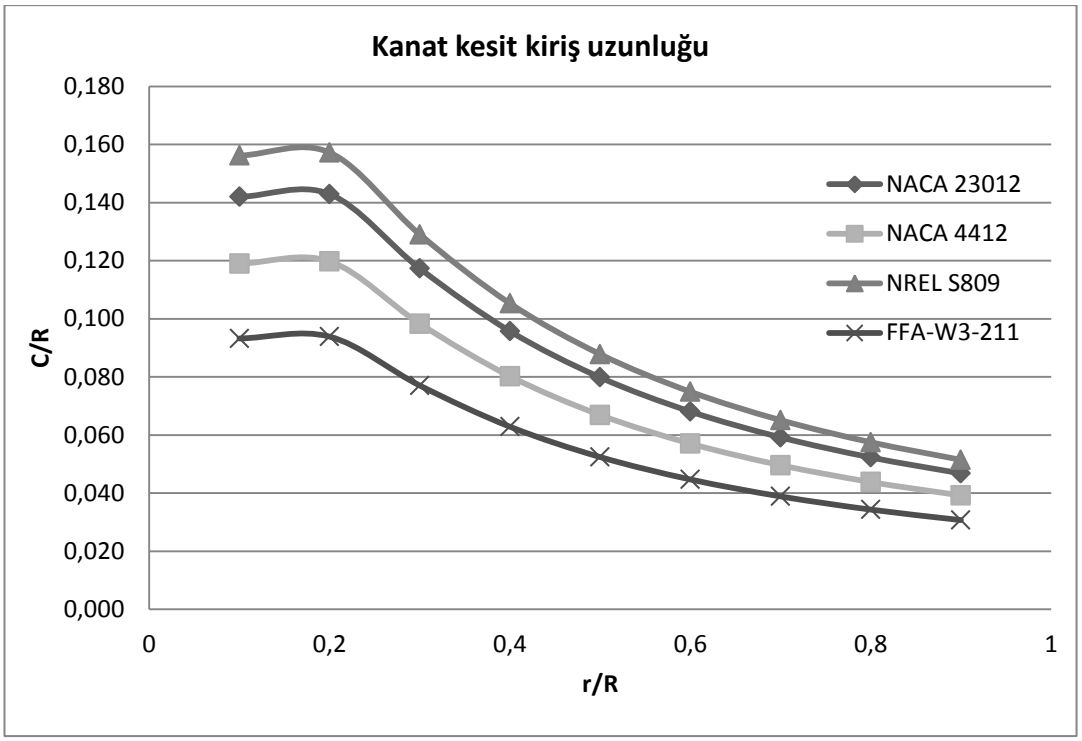


Şekil 3.8. Farklı kanat geometrilerin güç çarpan değerlerinin karşılaştırması

Çizelge 3.3 ve Şekil 3.8 den anlaşılacağı gibi, düşük uç hız oranlarında yapılan optimum tasarımlar için NACA 4412 kanat kesiti daha yüksek güç çarpan değeri üretirken, yüksek uç hız oranlarında yapılan tasarımlar için ise NREL S 809 kanat kesiti daha yüksek güç çarpan oluşturmaktadır.

3.4. Standart Kanat Kesitinin Geometriye ve Performansa Etkisi

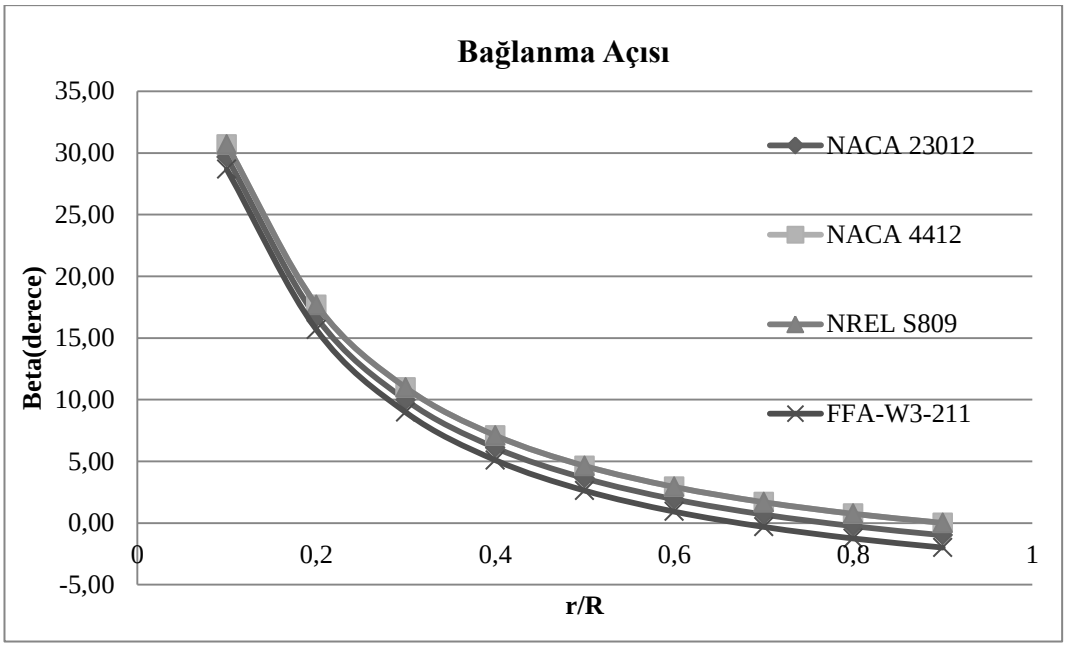
NACA 23012, NACA 4412, NREL S809 ve FFA-W3-211 kanat kesitleri kullanılarak, X uç hız oranının 7 değeri için, Schmitz teoremine göre elde edilen optimum kanat kesit kiriş uzunluklarının kanat boyunca değişen değerleri Şekil 3.9 da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Kanat kesit kiriş uzunluklarının karşılaştırılması

Şekil 3.9 da görüldüğü gibi, bu dört standart kanat kesiti için en az malzeme gerektiren kesit FFA-W3-211 olmuştur. Bununla birlikte, mukavemet gereksinimleri dikkate alınması gerekir.

NACA 23012, NACA 4412, NREL S809 ve FFA-W3-211 kanat kesitleri kullanılarak, X uç hız oranının 7 değeri için, Schmitz Teoremine göre elde edilen optimum bağlanma açılarının kanat boyunca değişen değerleri Şekil 3.9 da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Bağlanma açılarının karşılaştırılması

Şekil 3.10 da görüldüğü gibi, optimum bağlanma açısı bu dört kanat kesiti için pek fazla değişmemektedir. NACA 4412, NACA 23012 ve FFA-W3-211 kanat kesitleri kullanılarak kanat elemanlarında meydana gelen dP güç, dF_x eksenel ve dF_y teğetsel kuvvetlerin kanat boyunca değişim değerleri çizelge 3.4 de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Üç kanat kesitinin kanat elemanlarındaki performans sonuçları

	Kanat Elemanı		1	2	3	4	5	6	7	8	9
NACA 4412	dP	Watt	24,28	44,93	65,02	84,58	103,72	122,24	139,73	152,52	135,61
	dF_y	Newton	4,62	5,14	5,31	5,37	5,39	5,37	5,32	5,13	4,08
	dF_x	Newton	9,01	15,58	22,26	29,00	35,78	42,60	49,33	55,61	58,40
FFA-W3-211	dP	Watt	24,35	45,14	65,42	85,20	104,55	122,41	139,54	145,00	120,39
	dF_y	Newton	4,64	5,16	5,34	5,41	5,43	5,38	5,32	4,87	3,62
	dF_x	Newton	9,13	15,86	22,75	29,73	36,77	43,72	50,67	56,24	58,04
NACA 23012	dP	Watt	23,51	42,96	61,55	79,50	96,86	112,99	128,41	135,34	120,66
	dF_y	Newton	4,48	4,91	5,02	5,05	5,03	4,97	4,89	4,55	3,63
	dF_x	Newton	8,14	13,77	19,30	24,79	30,20	35,51	40,75	44,89	46,12

Çizelge 3.4 den anlaşılacağı gibi, kanat elemanlarında oluşan güç değerleri her üç kanat kesiti için de kanat ucuna gidildikçe artmakta ancak son kanat elemanında azalmaktadır. Kanat elemanlarında oluşan teğetsel kuvvet ise güç değişimi gibi olmaktadır. Kanat elemanlarında elde edilen eksenel kuvvet ise kanat ucuna doğru gidildikçe doğru orantılı olarak artmaktadır. Kanat ucunda en büyük güç NACA 4412 kesiti ile elde edilirken, kanadın diğer kısımlarında en büyük güç FFA-W3-211 kanat kesiti ile elde edilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan 8 farklı standart kanat kesitinin aerodinamik katsayıları ve bu kesitler kullanılarak X=7 uç hız oranında tasarlanan optimum kanat geometrilerinin kanat eleman momentum (PEM) Teoremine göre elde edilen performans sonuçları Çizelge 3.5 de özetlenmiştir.

Çizelge 3.5. Sekiz farklı standart kanat kesitlerinin aerodinamik özellikleri ve güç çarpan değerleri

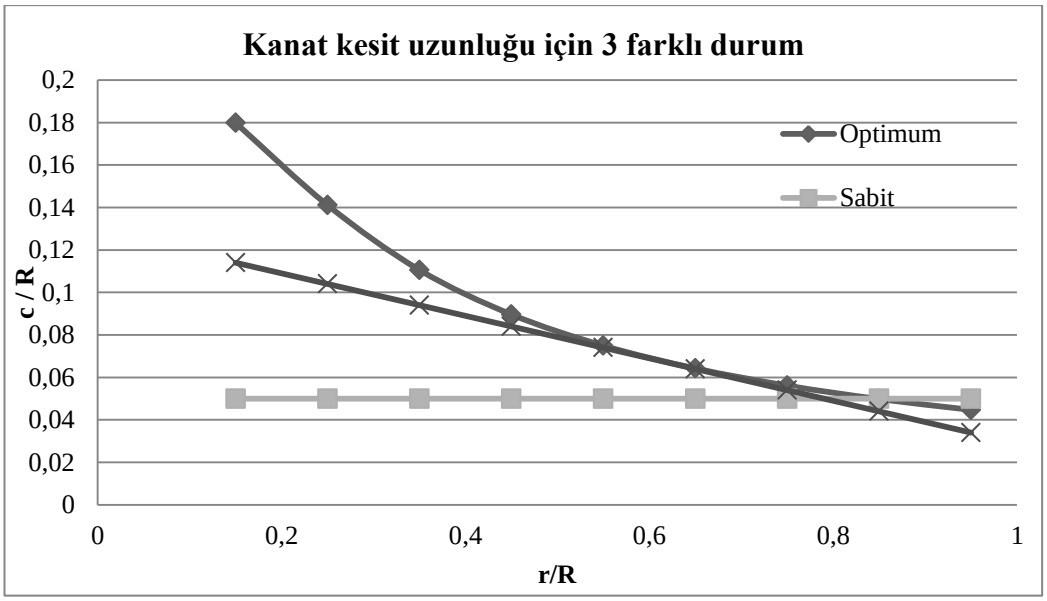
	NACA 0012	NACA 4412	NACA 23012	NACA 63-215	NREL S809	FFA-W3-211	DU 93-W-210	RISO A1-21
Stall açısı	16	14	18	13	12	13	10	12
C_L-stall	1,35	1,65	1,75	1,5	1,05	1,62	1,4	1,65
C_D-stall	0,028	0,0185	0,0225	0,024	0,033	0,035	0,018	0,018
Tasarım açısı(der)	9	6	7	6	7	5	6	7
Tasarım C_L	0,87	1,05	0,88	0,82	0,8	0,85	1,1	1,05
Tasarım C_D	0,012	0,0075	0,0072	0,012	0,012	0,01	0,015	0,015
Max. C_P	0,55	0,58	0,57	0,54	0,53	0,56	0,55	0,54

3.5. Optimum Kanat Geometrisinde Basitleştirmeler

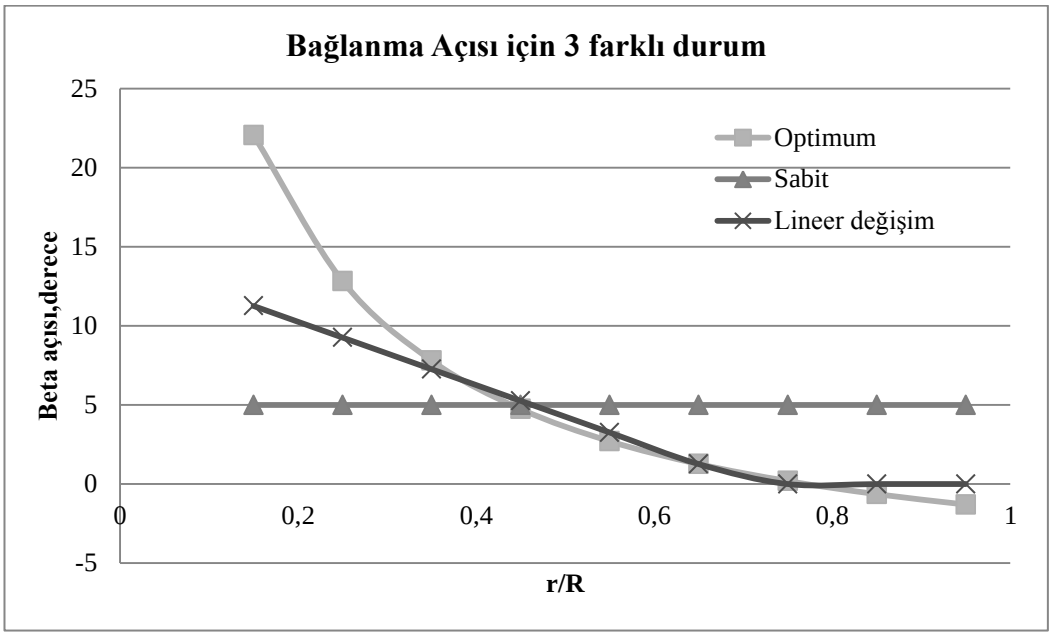
Kanat geometrisinde yapılan değişikliklerin, güç çarpan ve güç değerindeki etkileri, PEM teoremi ile incelenmiştir. Üretim zorlukları, mukavemet sorunları veya maliyet nedenleriyle optimum hesaba göre elde edilen kanat kiriş uzunluğu ve bağlanma açı değerlerinde değişiklikler yapılıp optimum değerlerden tavizler verilmesi gerekebilir. Bu düzenlemeler yapılırken, güç çarpan değerinin kabul edilebilir ölçüde azaldığına dikkat etmek gerekir. Kanat kiriş uzunluğu sabit ve lineer değişimli olarak iki farklı şekilde değiştirilmiştir. Bağlanma açısı sabit ve lineer değişim olarak iki farklı şekilde yeniden düzenlenmiştir (Şekil 3.11 ve Şekil 3.12). Bu değişikliklerle elde edilen üç yeni geometrinin PEM Teoremine göre performansları ayrı ayrı hesaplanmış ve optimum geometrinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

NACA 23012 kanat kesitine sahip ve X=7 uç hız oranına göre tasarlanan rüzgar türbin kanadında, yukarıdaki değişikliklere göre üç farklı geometri elde edilmiştir. Bağlanma açısı optimum değerlerde tutulurken, kanat kesit kiriş uzunluğu kanat uzunluğunun %5 i olacak şekilde yeniden düzenlenerek elde edilen tasarıma Geometri 1 denilmiştir. Kanat kesit kiriş uzunluğunu ve bağlanma açısını kanat boyunca sabit tutarak elde edilen tasarıma Geometri 2 denilmiştir. Bağlanma açısı 5 derece, kanat kesit kiriş uzunluğu ise kanat uzunluğunun %5 i olarak alınmıştır.

Kanat kesit kiriş uzunluğu kanat kökünden ucuna kadar lineer olarak azaltılmış ve bağlanma açısı kanadın %75 noktasına kadar lineer azaltılıp sonra sıfır derece tutulmuştur. Kanat kesit kiriş uzunluğu kanadın kökten itibaren %75 inde optimum kanat kesit kiriş uzunluğuna eşit ve optimum kanat kesit kiriş uzunluk grafiğine bu noktada teğet olacak şekilde düzenlenmiştir. Elde edilen bu yeni geometriye Geometri 3 denilmiştir.



Şekil 3.11. Üç farklı geometrinin kanat kiriş uzunluk değişimleri



Şekil 3.12. Üç farklı geometrinin bağlanma açıları

Bu üç farklı kanat geometri ile optimum geometrinin kanat kesit kiriş uzunluk ve bağlanma açısı değerleri ile PEM teoremine göre elde edilen performans neticeleri Çizelge 3.6 da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Dört farklı geometrinin karşılaştırması

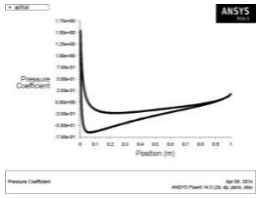
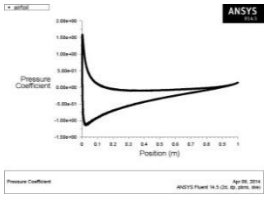
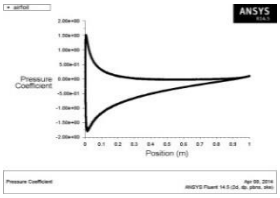
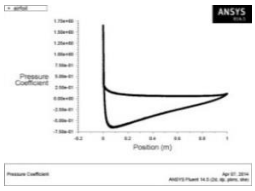
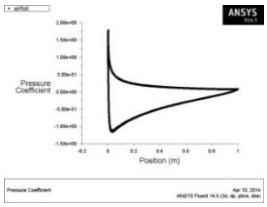
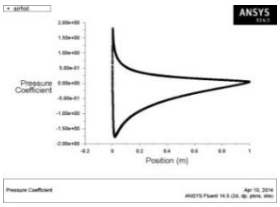
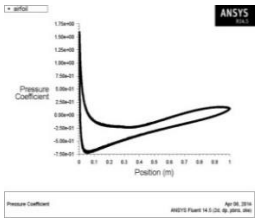
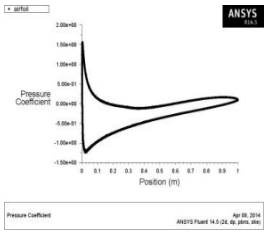
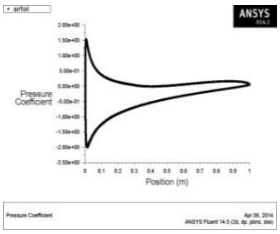
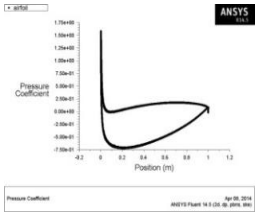
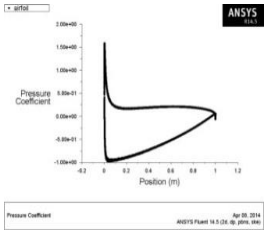
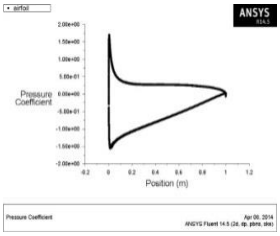
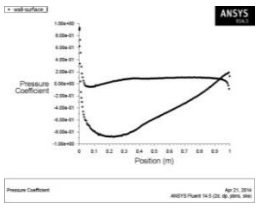
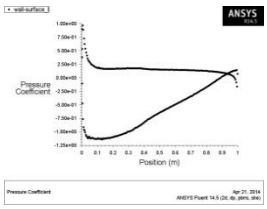
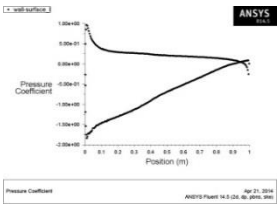
NACA 23012	Kanat Kesit No:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	C p
X=7	r/R	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	
Optimum Geometri	Beta	22,069	12,83	7,802	4,742	2,707	1,264	0,1895	-0,64	-1,299	
	c/R	0,1799	0,1411	0,110	0,09	0,075	0,064	0,0561	0,0498	0,045	0,563
Geometri 1	Beta	22,069	12,83	7,802	4,742	2,707	1,264	0,1895	-0,64	-1,299	
	c/R	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,51
Geometri 2	Beta	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	c/R	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,394
Geometri 3	Beta	11,26	9,26	7,26	5,26	3,26	1,26	0	0	0	
	c/R	0,0544	0,0497	0,045	0,04	0,035	0,031	0,0258	0,021	0,016	0,546

Çizelge 3.6 dan şu sonuçlar çıkarılabilir: Optimum geometri için güç çarpan değeri 0,56 iken Geometri 1 için güç çarpan değeri 0,51 olmuştur. Yani önemli oranda güç kaybı söz konusudur. Geometri 2 tasarımının PEM teoremi sonuçlarına bakıldığında, güç çarpan değeri 0,39 olduğunu görülür. Geometri 3 tasarımının PEM Teoerem sonuçlarına göre güç çarpan değeri yaklaşık 0,547 dir. Bu değer optimum güç çarpan değeri 0,56 değerine yakındır. Optimum geometri için %56 olan güç çarpan değeri bağlanma açısı ve kanat kesit kiriş uzunluğu kanat boyunca sabit değerde alındığında Geometri 2 için bu değer ancak %39 olmaktadır. Yani yaklaşık % 30 gibi yüksek bir verim düşmesi gerçekleşmektedir.

3.6. HAD (CFD) Sonuçları

NACA 0012, MB 01, MB 02, NACA 4412 ve MB 03 kanat kesitlerinin HAD ile elde edilen basınç katsayı grafikleri Çizelge 3.7 de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

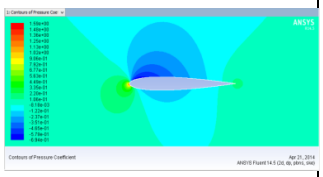
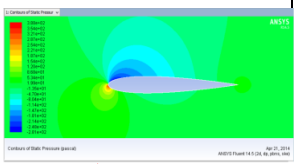
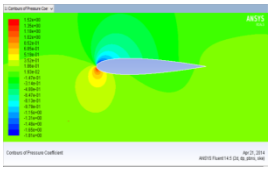
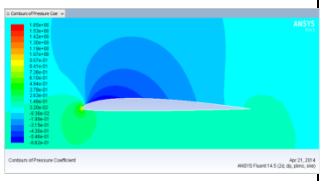
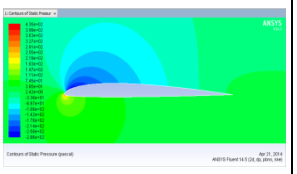
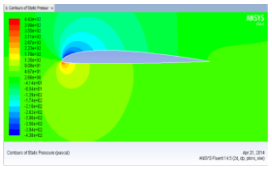
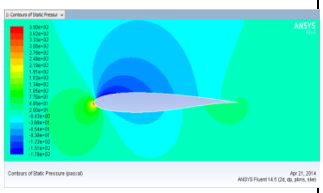
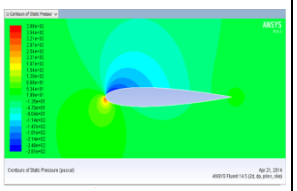
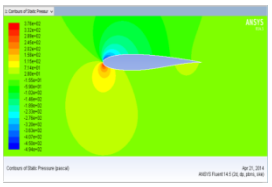
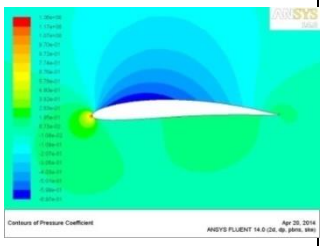
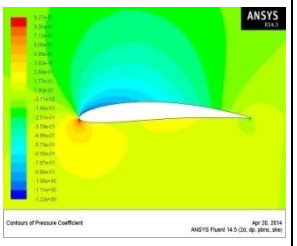
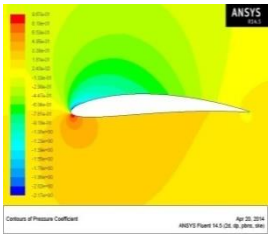
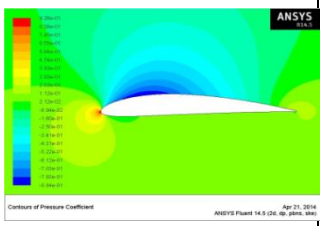
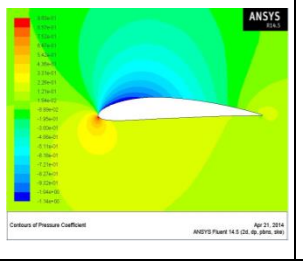
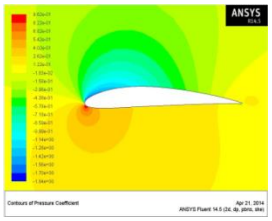
Çizelge 3.7. Basınç katsayı grafiklerinin karşılaştırılması

Hücum açısı	4 derece	8 derece	12 derece
NACA 0012			
MB 01			
MB 02			
MB 03			
NACA 4412			

Kanat kesitinin alt ve üst yüzeylerinde elde edilen basınç katsayı grafikleri arasındaki kapalı bölgenin alanı arttıkça kaldırma kuvveti de artmaktadır. Çizelge 3.7 den görüldüğü gibi, MB 03 kanat kesitinde bu alan daha büyük ve sonuçta kaldırma

kuvvet değeri de daha büyük olmuştur. Aynı durum hücum açısının artmasında da görülmektedir. NACA 0012, MB 01, MB 02, MB 03 kanat kesitlerinin HAD ile elde edilen statik basınç görüntüleri Çizelge 3.13 de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3.8. Statik basınç konturları

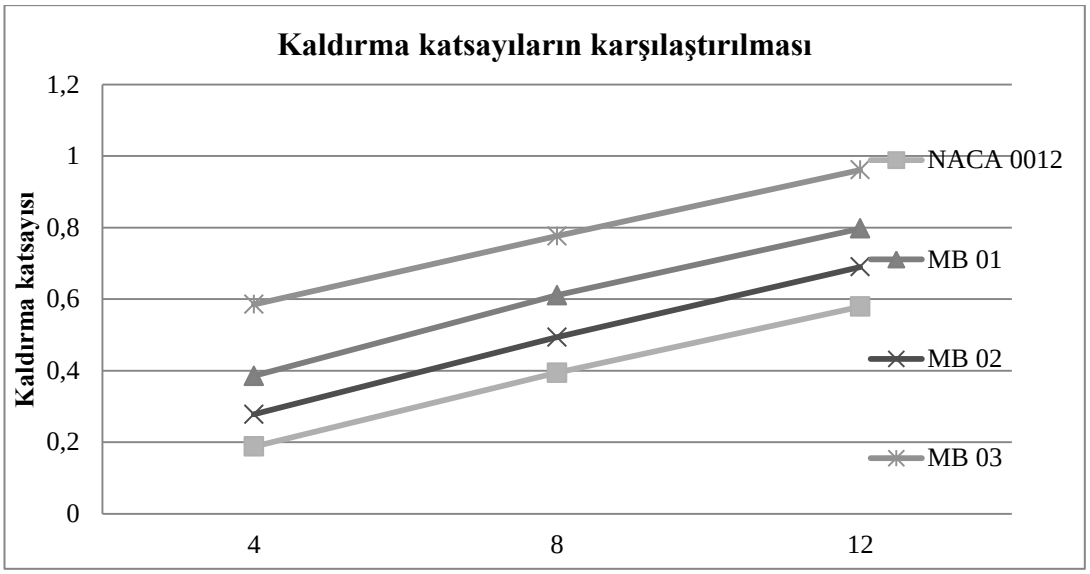
Hücum açısı	4 DERECE	8 DERECE	12 DERECE
NACA 0012			
MB 01			
MB 02			
MB 03			
NACA 4412			

Kanat kesitinin üst kısmında statik basınç değeri, alt kısmındaki statik basınç değerinden daha küçüktür. Böylece oluşan basınç farkı nedeniyle bir kaldırma kuvveti oluşmaktadır. Üst kısımdaki basınç ne kadar az ve alt kısımdaki basınç ne kadar yüksek olursa o oranda da yüksek kaldırma kuvveti oluşur. Çizelge 3.8 de verilen renkli resimlerde mavi bölgeler, statik basınç değerinin düşük, kırmızı, sarı veya yeşil bölgelerde statik basıncın mavi bölgeler göre daha yüksek olduğunu yerleri göstermektedir. Kanat kesitlerinin ön ucunda, statik basınç kırmızı ile görülmektedir çünkü bu noktada akış hızı sıfır ve statik basınç en büyük değerine ulaşmıştır. Hücum açısı arttıkça kanat kesit alt kısmındaki bölgenin rengi sarıya doğru değişmektedir. Bu değişim, statik basınç değerinin artması (ve dolayısı ile basınç farkının ve kaldırma kuvvetinin artması) olarak değerlendirilir. Bu dört kanat kesitinin kaldırma ve sürükleme katsayı değerleri Çizelge 3.9 da verilmiştir.

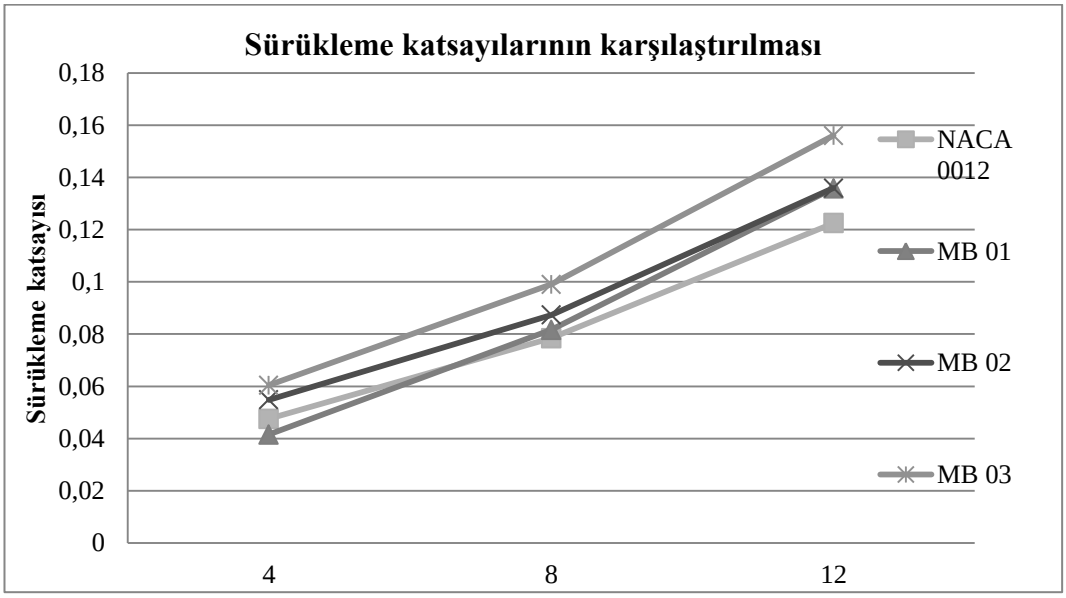
Çizelge 3.9. MB 01, MB 02, MB 03, NACA 0012, NACA 4412 kanat kesitlerinin kaldırma ve sürükleme katsayıları

	MB 01		MB 02		NACA 0012		MB 03		NACA 4412	
Hücum Açısı	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D
4 derece	0,385	0,042	0,278	0,055	0,188	0,048	0,585	0,0604	0,5572	0,027
8 derece	0,6108	0,082	0,493	0,087	0,394	0,078	0,78	0,099	0,7726	0,056
12 derece	0,797	0,136	0,69	0,136	0,579	0,123	0,96	0,156	0,966	0,096

NACA 0012, MB 01, MB02 ve MB03 kanat kesitlerinin hücum açısının 4, 8, 12 derecelerinde elde edilen kaldırma ve sürükleme katsayı değerleri Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 de grafik olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.13. NACA 0012, MB 01, MB 02, MB 03 kanat kesit kaldırma katsayıları



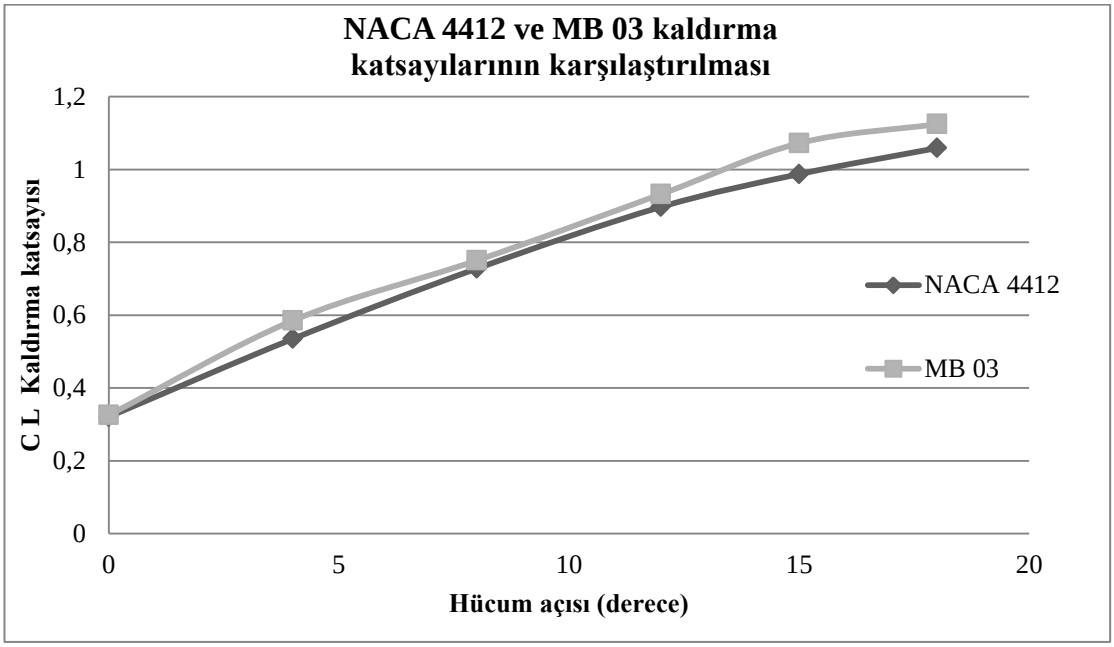
Şekil 3.14. NACA 0012, MB 01, MB 02, MB 03 kanat kesit sürükleme katsayıları

Elde edilen yeni kanat kesitlerinin tümünün her üç hücum açısında da kaldırma katsayı değerleri NACA 0012 kanat kesitinin kaldırma katsayı değerinden daha yüksek çıkmıştır. Maksimum kamburluk oranının en yüksek olduğu MB 03 kanat

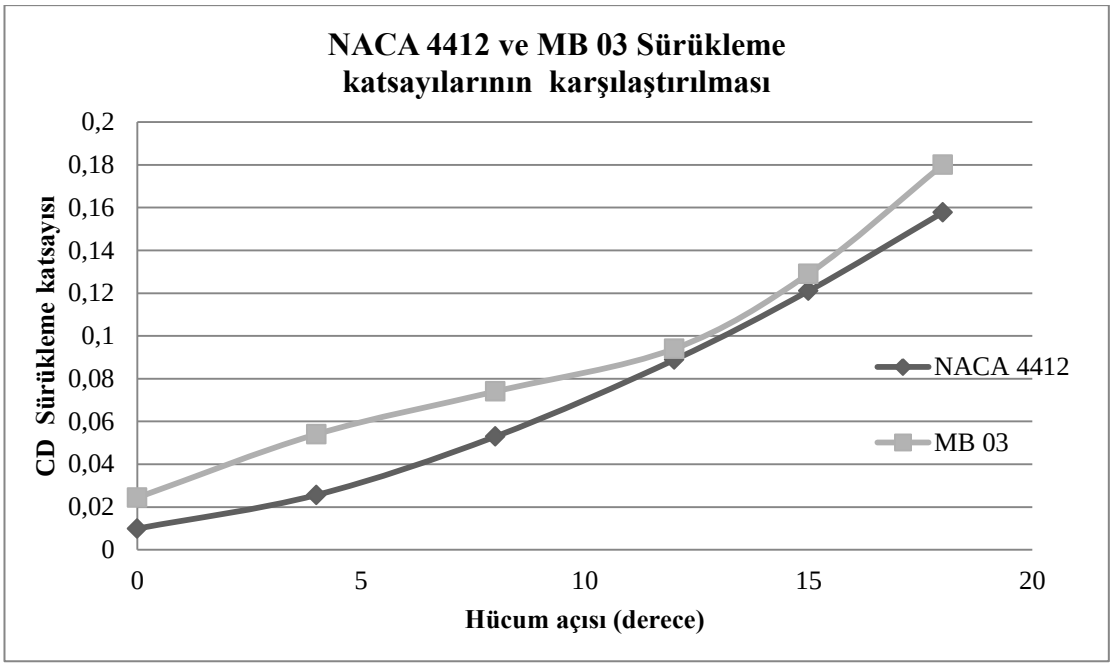
kesitinde ise en iyi kaldırma katsayı değerleri elde edilmiştir. Ancak bu kesitin sürükleme katsayı değerleri diğer kesitlerin sürükleme katsayılarından daha yüksek olması olumsuz yanı olarak değerlendirilebilir.

NACA 4412 ve MB 03 kesit geometrileri birbirine çok yakın olacak şekilde MB 03 geometrisi geliştirilmiştir. NACA 4412 ve MB 03 kanat kesitlerinin hücum açısının 0, 4, 8, 12, 18 derecelerinde elde edilen kaldırma ve sürükleme katsayı değerleri Şekil 3.15 ve Şekil 3.16 da grafik olarak karşılaştırılmıştır.

MB 03 ile daha yüksek kaldırma elde edilmesi iyi performans anlamına gelirken sürükleme katsayı değerlerinin de daha yüksek çıkması istenmeyen bir durumdur. Bu çalışmada elde edilen değerlerin deney sonuçlarından[44] biraz farklı olmasının nedeni, kanat kesiti üzerindeki akışın ilk kısmı laminer ve sonraki kısmı türbülans olmasına rağmen bu çalışmada tüm akışın türbülans kabul edilmesidir.



Şekil 3.15. NACA 4412 ve MB 03 kanat kesitlerinin kaldırma katsayı grafikleri



Şekil 3.16. NACA 4412 ve MB 03 kanat kesitlerinin sürükleme katsayı grafikleri

3. SONUÇLAR

En yüksek güç oluşturabilecek bir rüzgar türbin kanat geometrisinin ölçülerini bulabilmek için hem kanat eleman momentum teoremi hem de kanat kesit aerodinamik bilgilerine ihtiyaç vardır. Kanat eleman teoremine göre elde edilen eksenel kuvvet ile momentum teoremine göre elde edilen eksenel kuvvet birbirine eşitlenerek her bir kanat elemanı için ayrı ayrı eksenel hız değişim faktörü (eksenel indüksiyon) olan a nın değeri hesaplanmıştır. Kanat eleman teoremine göre elde edilen teğetsel kuvvet ile açısal momentum teoremine göre elde edilen teğetsel kuvvet birbirine eşitlenerek her bir kanat elemanı için ayrı ayrı teğetsel hız değişim faktörü olan a' değerleri hesaplanmıştır. a ve a' değerleri iterasyonla bulunup daha sonra rüzgar türbin kanadında üretilen güç hesaplanmıştır. Bu metod kullanılarak kanat tasarımındaki değişkenlerin farklı değerleri için C_p güç çarpan değerlerinin karşılaştırılması ile seçilen hangi değerin en yüksek C_p güç çarpanını verdiği tespit edilmiştir.

Elde edilmesi planlanan maksimum güç değeri, tasarımı yapılacak rüzgar türbin kanadının boyutlarını belirler. Bu çalışmada, kırsal kesimlerde kendi elektriğini üretecekler için uygun olacağı düşünülen küçük rüzgar türbininin kanat uzunluğu ve rotor göbek yüksekliğinin yerden yüksekliği ve bu yükseklikteki rüzgar hızı tasarım girdileri olarak alınmıştır.

Kanat eleman momentum teoremine göre yapılan hesaplar sonucunda, kanat uzunluğunun ve rüzgar hızının güç çarpan değerini etkilemediği ancak elde edilecek güç değerini bu değerlerle (kanat uzunluğunun karesi ve rüzgar hızının küpü ile) orantılı olarak etkilediği anlaşılmıştır. Kanat uzunluğu ile göbek yüksekliği arasındaki ilişki ise türbin maliyeti ile elde edilecek gücün mali değeri arasındaki optimum hesaplara dayalıdır. Bu tasarım kısıtlamaları dışında, türbin kanatlarında oluşan gürültü seviyesi de dikkate alınmıştır. Kanat uçlarındaki teğet hız, oluşacak gürültü seviyesinin kabul edilebilir sınırlar içinde kalacak şekilde sınırlandırılmalıdır. Bu çalışmada tasarımı yapılan rüzgar türbin kanadında oluşan maksimum bağıl hız 35 m/s dir ve bu hızın ürettiği gürültü, izin verilen gürültü seviyesine uygundur.

Maksimum gücün elde edilmesini sağlayan kanat geometrisini oluşturan (kanat kesit kiriş uzunluğunun ve bu kesitlerin rotor düzlemine bağlanma açılarının) optimum değerleri analitik metodla hesaplanmıştır. Bağlanma açısı ve kanat kesit kiriş uzunluğu önce Lineer Momentum (Betz) ve Kanat Eleman Teoremlerine göre daha sonra da açısal momentum (Schmitz) ve Kanat Eleman Teoremlerine göre hesaplanmıştır. Kanat tasarımı için, birincisine (Betz) göre daha doğru sonuçlar veren ikincisi (Schmitz teoremi) kullanılmıştır. Kanat boyunca değişen değerler hesaplanırken, tasarım hücum açısı, seçilen kanat kesitinin C_L/C_D oranının en yüksek olduğu hücum açısı olarak seçilmiştir. C_L ve C_D değerleri olarak, bu açıdaki değerler alınmıştır.

En iyi kanat geometrisini belirlerken ve tasarımı yapılan kanat geometrisinin ürettiği güç hesabı yaparken, en önemli değişkenlerde biri de uç hız oranıdır. Uç hız oranının en iyi değerlerini bulduran bir formül olmadığından farklı uç hız oranı değerlerine göre kanat geometrileri ve bu geometrilerin güç çarpan değerleri elde edilmiştir. Bulunan sonuçlar karşılaştırılarak farklı kanat kesitlerine göre en yüksek güç çarpan değerini veren uç hız oranları tespit edilmiştir. Bu çalışmada görülmüştür ki; maksimum güç çarpan değerinin yakalandığı uç hız oran değeri kanat geometrisini oluştururken kullanılan uç hız oranı değerinden bir veya iki değer daha büyüktür. Örneğin, tasarım uç hız oranı 8 alındığında maksimum güç çarpan değeri, uç hız oranının 10 değerinde elde edilmektedir.

Üç farklı kanat kesiti (NACA 4412, NACA 23012, NREL S 809) ile elde edilen kanat geometrilerinin maksimum güç çarpanları, farklı uç hız oranlarında ve farklı değerlerde olduğu görülmüştür. Uç hız oranı 7 den büyük iken NACA 4412 kanat kesiti ile elde edilecek güç, NACA 23012 ile elde edilecek değerden daha fazla olmaktadır. Uç hız oranı 10 dan büyük iken ise NREL S 809 kanat kesiti ile elde edilen güç çarpan değeri, NACA 4412 ile elde edilecek değerden daha yüksek çıkmaktadır. 7 den küçük uç hız oranlarında ise durum tam tersidir.
Hesaplar yapılırken kullanılan standart kanat kesitlerinin aerodinamik özellikleri kaynaklardan alınmıştır. Ancak özellikle stall sonrası için deney, HAD (CFD), XFOİL gibi farklı yollarla elde edilen değerler arasında ciddi farklar görülmüştür. Reynold sayısının C_L ve C_D değerleri üzerindeki etkileri yeterince dikkate

alınmadığında, yapılan hesaplarda hatalar oluştuğu görülmüştür. Standart kanat kesit geometrilerinde bazı değişiklikler yapılarak üç tane yeni kanat kesit geometrisi elde edilmiş ve bu kesitlerin HAD sonuçları elde edilmiştir. Yapılan geometri değişikliklerin aerodinamik performans etkilerine irdelendiğinde mevcut kesitlerden daha iyi bir performans elde edilmiştir.

Yeni çalışmalar için şu öneriler yapılabilir: Bu çalışmada kullanılmayan diğer standart kanat kesitlerinin rüzgar türbin kanat performansları üzerine çalışmalar devam ettirilebilir. Kanat kesitleri için tek bir geometri yerine kanadın farklı yerlerinde farklı kesitler kullanılarak maksimum güç çarpan değerinin arttırılması üzerine çalışmalar yapılabilir. Kanat kesitlerinin aerodinamik özelliklerinin belirlenmesinde HAD türbülans modeli olarak bu çalışmada k-epsilon seçilmiştir. Başka bir çalışmada Spalart Almaras, k-omega gibi diğer türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir. Kanadın açısal dönme hızının kanat kesitlerinin aerodinamik karakterlerine olan etkisi üzerine çalışmalar yapılabilir. HAD (Ansys-fluent) paket programları kullanılarak daha iyi aerodinamik performansa sahip yeni kanat kesitleri geliştirilebilir. Kanat kesit geometrisindeki akışın kontrolü ile aerodinamik performans geliştirilebilir. Bunun için kanat kesit geometrisinde slat, slot, vortex üretici, üfleme (blowing), emme (suction) geometrilerinin eklenmesi, kanat kesit arka kenarının kalınlaştırılması, kanat kesitinin yüzey pürüzlülüğüne hassasiyetinin azaltılması ve dolayısı ile rotor güç çarpan üzerindeki etkileri üzerine çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Glauert, H., 'The Analysis of Experimental Results in Windmill Brake and Vortex Ring States of an Airscrew,' Reports and Memoranda, No. 1026 AE. 222, 1926.

[2] Parezanovic V., Rasuo B. and Adzic M., 'Design of Airfoils for Wind Turbine Blades', The French-Serbian European Summer University: Renewable Energy Sources and Environment-Multidisciplnary Aspect, Rnjacka Banja, Serbia, 2006.

[3] Tangler, J.L., Somers, D.M., 'NREL Airfoil Families for HAWT's'. Proc. Windpower'95, Washington D.C., 117–123, 1995.

[4] Bekka N., Bessaih R., Sellam M. and Chpoun A. 'Numerical Study of Heat Transation Round the Small Scale Airfoil Using Various Turbulence Models', Num. Heat Transfer, Part A: Applications, 56(12), 946-969, 2010.

[5] Özdamar, A. and M.G. Kavas, 'A research about wind turbine propeller design'Sun Day Symposium Presentations Book, 151-160, 1999.

[6] Önen, B., Çınar, A.,'Düz flaplı pozitifkambura sahip naca 4412 kanat kestinin aerodinamik performansının bilgisayar desteklianalizi',2. Uluslar Arası Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi,Balıkesir,11-12 kasım 2010.

[7] S.Sarada, M.Shiva Shankar and Rudresh.G'Numerical Simulation of Viscous, Incompressible Flow Around NACA 64618 Subsonic Airfoil Using Computational Fluid Dynamic', Proceedings of National conference on Advances in Mechanical Engineering, Allied Publishers Pvt Ltd, 2012.

[8] Ravi.H.C1, Madhukeshwara.N, S.Kumarappa, 'Numerical Investigation Of Flow Transition For NACA4412 Airfoil Using Computational Fluid

Dynamics', International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology Vol. 2, Issue 7, ISSN: 2319-8753, July 2013.

[9] Mr Kerryn Newey and Dr Ruussell Philips, 'Optimising Performance of Small Hawt's Through İmproved Rotor/Alternator Matching', Centre for Renewable and SustainableEnergy Studies, http://www.crses.sun.ac.za/files/services/conferences/annual-student-symposium-2012/22_November/2_Newey.pdf (Erişim Tarihi:24.09.2013)

[10] U. Aguirre Lıona, J. J. Pérez Rambla and G. Aguirre Zamalloa,'Overall Design of a Wind Turbine Blade' pdf, internet (Erişim Tarih:17.02.2014)

[11] Vermeer,N-J,'Local circulation on rotating wind turbine blades from vilocity measurements in the wake of a model rotor', Proc. Of the Fourteenth BWEA Conference, Wind Energy Conversion 1992, Editor B.r. Clayton, London, Mechanical Engineering Publications, 117-121, 1992.

[12] K.R.Ajao and J.S.O.Adeniyi, 'Comparison of Theoretical and Experimental Power Output of ASmall 3-Bladed Horizontal-Axis Wind Turbine', journal of American Science, 5(4):79-90, 2009.

[13] Hiroharu Suzuki,Kenichi Rinoie, Asei Tezuka, 'Laminar Airfoil Modification Attaining OptimumDrag Reduction by Use of Airfoil Morphing' University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan,25th international congres of the aeronautical sciences, 2006.

[14] Wang Xudong, Wen Zhong Shen, Wei Jun Zhu and Sørensen, J.K., Chen Jin "Shape Optimization of Wind Turbine Blades", Wind Energy, 12, 781-803,2009.

[15] Xavier Mauclere, 'Automatic 2D Airfoil Generation, Evaluation and Optimisation Using Matlab and XFoil' Mastır Tezi, Vestas, 2009.

[16] Kulunk, E., and Yılmaz, N.,'Hawt Rotor Design and Performance Analsis', Proceedings of ASME 2009 3rd international conference of energy sustainablity, ES 2009, july 19-23, San Fancisco, Californa, USA, 2009.

[17] Alireza Maheri, Siamak Noroozi, Chris Toomer, John Vinney, 'Dampingthe fluctuating behaviour and improving the convergence rate of the axial induction factor in the BEMT base rotor aerodynamic codes'University of the West of England, Bristol, BS16 1QY, UK, 2012.

[18] Duran, Serhat,'Computer-Aided Design of Horizantal-Axis Wind Turbine,Yüksek lisans tezi, ODTÜ, 2005.

[19] Han Cao, 'Aerodynamics Analysis of Small Horizontal Axis Wind Turbine Blades by Using 2D and 3D CFD Modelling',Master Thesis, University of the Central Lancashire, 2011.

[20] Horia Dumitrescu, Vladimir Cardoş; 'The turbulent boundary layer on wind turbine blades', proceedings of the Romanian Academy, series of the romanıan academy volume 11, 125–136, 02.2010.

[21] Tetsuya Kogakı, Hhikaru Matsumıya, Kaori Kıeda, Naofumi YoshımızuandYuusuke Yamamoto; 'Performance improvement of airfoils for wind turbines by the modified vortex generator', European Wind Energy Conference Proceedings, 2004.

[22] Global Wind Energy Council, Global Wind 2013Report, http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/GWEC-Global-Wind-Report_9-April-2014.pdf (Erişim Tarihi: 17.03.2014)

[23] Betz, A. 'Wind Energy and Their Utilization by Windmills' Bandenhoeck & Ruprect, Göttingen, Germany,1926.

[24] MBTConsult.Web:(Erişim Tarihi: 07. 08. 2013) http://www.navigantresearch.com/?s=the+wind+power+sector

[25] NACA mirror site. http://naca.central.cranfield.ac.uk/citations/cit.html NACA Report No: 563, 646, 824 (Erişim tarihi: 10.04.2013)

[26] Türkiye Teknoloji Gelistirme Vakfı İnternet Sitesi, Yenilenebilir Enerji,http://www.ttgv.org.tr/UserFiles/File/yenilenebilirenerji.pdf s. 2-3(Erişim tarihi: 08.02.2013)

[27] http://ec.europa.eu/energy/renewables/studies/wind_energy_en.htm (Erişim tarihi: 17. 08.2013)

[28] Hau,E., 'Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics' 2.basım, Springer, 2006.

[29] James L. Tangler 'Presented at the American Wind Energy Association WindPower',Palm Springs, California, 2000.

[30] Habali, S.M.; Saleh, I.A. 'Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics' Part I: Design of the blade and root. Energy Convers. Manag.,41, 249–280, 2000.

[31] Gasch, R, Twele, J., 'Wind Power Plants: Fundamentals,Design,Construction and Operation', Solarpraxis AG, Germany, 2002.

[32] Viterna, L., Janetzke, D. "Theoretial and Experimental Power from Large HorizontalAxis Wind Turbines". U.S. Department of Energy, Wind Energy Technology Division, 1982.

[33] Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi, http://alternaturk.org/turkiyede-ruzgar-enerjisi.php(Erişim tarihi: 18.03.2013)

[34] http://www.mgm.gov.tr/arastirma/yenilenebilir-enerji.aspx?s=ruzgaratlasi (Erişim tarihi:07.05.2013)

[35] Energies 2012, 5, 3425-3449; doi:10.3390/en5093425-Gasch, R.; Twele, J. Wind Power Plants; Solarpraxis: Berlin, Germany, 2002.

[36] Vick. B. "Using Rotor and Tip Speed in the Acoustical Analysis of Small Wind Turbines". USDA, Agricultural Research Service. 2000.

[37] U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy,http://energy.gov/eere/renewables/wind(Erişim tarihi: 18.04.2013)

[38] Gundtoft, Soren, University of Aarhus. "Wind Turbines". Copyright 2009.

[39] Wilson, R., Lissaman, P., Walker, S. "Aerodynamic Performance of Wind Turbines". 1976.

[40] Van Bussel, G, Zaaijer, M.B., 'Multi MegaWatt Wind Turbines for Offshore Application', Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series 05.2007.

[41] Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi' nin Tarihi, http://www.alternaturk.org/turkiyede-ruzgar-enerjisi.php (Erişim tarihi:17.04.2013)

[42] Spera, D., Richards, T. "Modified Power Law Equations for Vertical Wind Profiles". U.S. Department of Energy. 1979. (Erişim tarihi: 17.02.2013) http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19800005367.pdf

[43] Martin O. L. Hansen, Aerodynamics of Wind Turbines, Earthscan, London, sterling, VA, 2008.

[44] "Theory of Wing Sections, Including a Summary of Airfoil Data" by Ira H Abbott and Albert E. Von Doenhoff, 1959.

[45] Franck Bertagnolio, Nicis Sorenson, Jeppe Johansen and Peter Fuglsang Riso-R-1280(EN), Wind Turbine Airfoil Catalogue

[46] W.A. Timmer, The Design and Testing of Airfoil DU 91-W2-250, Sixth IEASymposium on the Aerodynamics of Wind Turbines, Petten, The Netherlands,November 1992.

[47] A. Björck, A Guide to Data Files from Wind Tunnel Test of a FFA-W3-211Airfoil at FFA, FFA-V-019, Flygtekniska Försöksanstalten, Sweden, 1996.

[48] The European Wind Energy Association (EWEA), Basic Cost of Wind Energy, http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Economics_of_Wind_Energy.pdf(Erişim tarihi:28.04.2013)

[49] http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_turbin.html (Erişim Tarihi: 07.08.2013)

[50] The European Wind Energy Association (EWEA), Wind Directions, A Closer Look At Turkey By Isabelle Valentiny,March 2009.http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WD/2009_february/Country_focus_Turkey__February_March_.pdf (Erişim Tarihi: 26.04.2013)

[51] The International Energy Agency (IEA), 'Global Renewable Energy Policies and Measures, OECD/IEA',http://www.iea.org/policiesandmeasures/ (Erişim tarihi: 22.07.2013)

[52] Global Wind Energy Council, Wind is a Global Power Source, http://www.carbonfairgo.com.au/forum_post.php?i=46 (Erişimtarihi:20.04.2013)

[53] Duran, S.,"Computer-Aided Design of Horizontal-Axis Wind Turbine Blades",Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 26-66, 2005.

[54] Onat, C., "Rüzgar Türbini Pervanesi Dizaynı", Yüksek Lisans Tezi, İnönüÜniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 2001.

[55] UIUC Airfoil Coordinates Database http://aerospace.illinois.edu/m-selig/ads/coord_database.html (Erişim tarihi:12.08.2013)

[56] Fluent Inc, 2006, "12.5 Standard and SST – k-epsilon Models Theory" FLUENT User's GuideFluent Inc.

[57] M. Drela, XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils, Conference on Low Reynolds Number Airfoil Aerodynamics, University of Notre Dame, June 1989.

[58] F.M.White,"Fluid Mechanics", McGraw-Hill, 2005.

[59] Eppler, R., "Airfoil Design and Data", Spring Verlag, Berlin-Heidelberg, 1990.

[60] John Anderson, Jr.," Introduction to Flight", McGraw –Hill, 2000.

[61] Yükselen, A.,Aerodinamik Ders Notları, İTÜ, 2006-2007 http://web.itu.edu.tr/~yukselen/UZB362/UZB362_Index.htm (Erişim tarihi: 05.06.2013)

[62] Bhaskaran, R.,Flow over an airfoil, Cornell University. https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+-+Flow+over+an+Airfoil(Erişim tarihi: 02.01.2014)

[63] Shan, H., Jiang, L. And Liu, C., "Direct numerical simulation of flow separation around a NACA 0012 airfoil", Computers and Fluids, 34: 1096-1114, 2005.

[64] Anderson J.D., "Fundamentals of aerodynamics", McGraw Hill Book Company, New York, 1986.

[65] Anderson John D., "Computational Fluid Dynamics", McGraw-Hill, 1995.

[66] Kristian S. Dahl, Peter Fuglsang, Design of the Wind Turbine Airfoil Family RISØ-AXX, RisØ National Laboratory, Roskilde, Denmark, December 1998.

[67] Davis, W.H., 'Technique for Developing Design Tools from the Analysis Methods of Computational Aerodynamics,' AIAA Journal, Vol. 18, No.9, September, pp. 1080-1087,1980.

[68] De Boor, C., 'On calculating with B-Splines,' Journel of Approximation Theory, vol.6, pp.50-62,1972.

[69] Martin O.L. Hansen, 'Aerodynamics of wind turbine'Chapter 2: 2-D Aerodynamics, Second Edition, Earthscan, UK and USA, 2008.

[70] American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) and American Society of Mechanical Engineers (ASME), "A Collection of the 2004 ASME Wind Energy Symposium Technical Papers," 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno Nevada, 5-8 January, 2004.

[71] G.Schmitz, “Theorie und Entwurf von Windrädern optimaler Leistung”, Wiss. Zeitschrift der Universität Rostock, 1955.

[72] A. Betz and L. Prandtl, “Schraubenpropeller mit geringstem Energieverlust”, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, 193-217,1919.

[73] Çetin, N. S., M. A Yurdusev, R. Ata and A. Özdemir, “Assessment of Optimum Tip Speed Ratio of Wind Turbines,” Mathematical and Computational Applications, Vol. 10, No.1, pp.147-154, 2005.

[74] Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi http://www.gyte.edu.tr/icerik/1500/616/yenilenebilir-enerji-arastirma-merkezi.aspx (Erişim Tarihi: 09.04.2013)

[75] MBT Consult. http://www.navigantresearch.com/?s=the+wind+power+sector (Erişim Tarihi: 05.07.2013)

[76] Glauert, H., “The Analysis of Experimental Results in Windmill Brake and Vortex Ring States of an Airscrew,” Reports and Memoranda, No. 1026 AE. 222, 1926.

[77] Viterna, L., Janetzke, D. “Theoretial and Experimental Power from Large Horizontal-Axis Wind Turbines”. U.S. Department of Energy- Wind Energy Technology Division, 1982.

[78] J. Méndez and D. Greiner, “Wind blade chord and twist angle optimization using genetic algorithms”, Proceedings of the Fifth International Conference on Engineering Computational Technology, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 2006, Paper 59.

[79] Tangler, J. “The Evolution of Rotor and Blade Design”. National RenewableEnergyLaboratory. www.nrel.gov/docs/fy00osti/28410.pdf, 2000.

(Erişim tarihi: 03.05.2014)

[80] Vick. B. “Using Rotor and Tip Speed in the Acoustical Analysis of Small Wind Turbines”. USDA- Agricultural Research Service. 2000.

[81] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, Wind energy explained: Wiley Online Library, 2002.

[82] Betz, A.: Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen(Wind energy and its utilization through windmills), Vadenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1926, reprint:Öko-Buchverlag Kassel 1982.

[83] Schmitz, G.: Theorie und Entwurf von Windradern optimaler Lesitung (Theory and design of windwheels with an optimum performance), Wiss. Zeitchrift der Universitat Rostock, 5. Jahrgang 1955-1956.

[84] Glauert, H.: Section ‘Airplane Propellers’ in: Durand W.F.:Aerodynamics Theory, Springer Verlag, Berlin 1935, Rprint Verlag Peter Smith.Mass.us.1976.

[85] PrandtL, L. Tragflächen-Auftrieb und Widerstand in der Theorie, Jahrbuch der wissenschaftlichen Gesellschaft für Luftfahrt, 5, pp 37-65, 1920.

[86] Glauert, H. The Elements of Aerofoil and Airscrew Theory, Cambridge University Press, 1926.

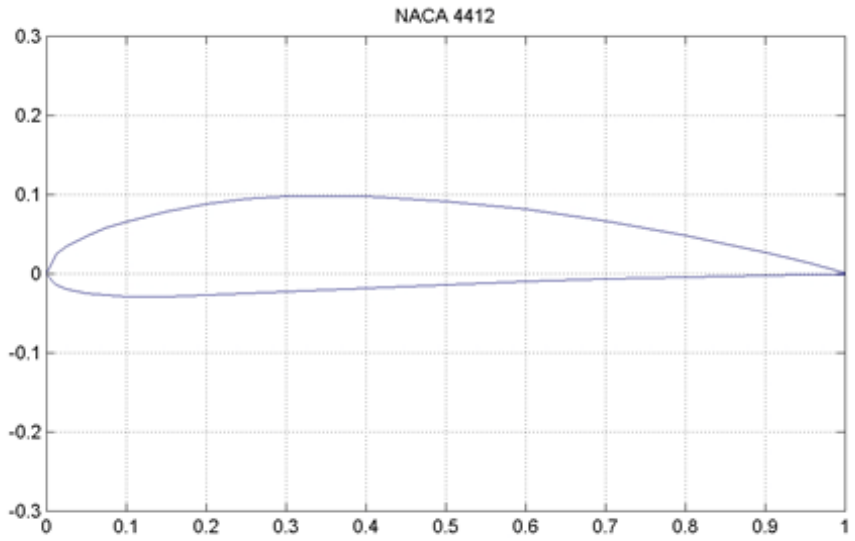
[87] Glauert, H. Theoretical relationships for the lift and drag of an aerofoil structure, JRAeS, 27, pp 512-518, 1923.

[88] Atılgan, M. ‘Yenilenebilir Enerji Kaynakları’, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ders Notları, Denizli, 1923.

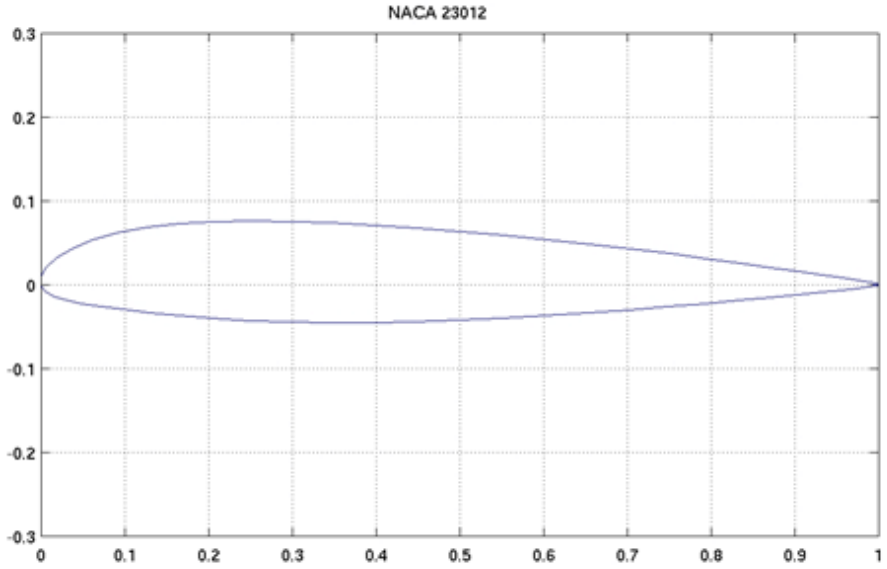
EKLER

EK-1. Standart Kanat Kesitlerinin Şekilleri

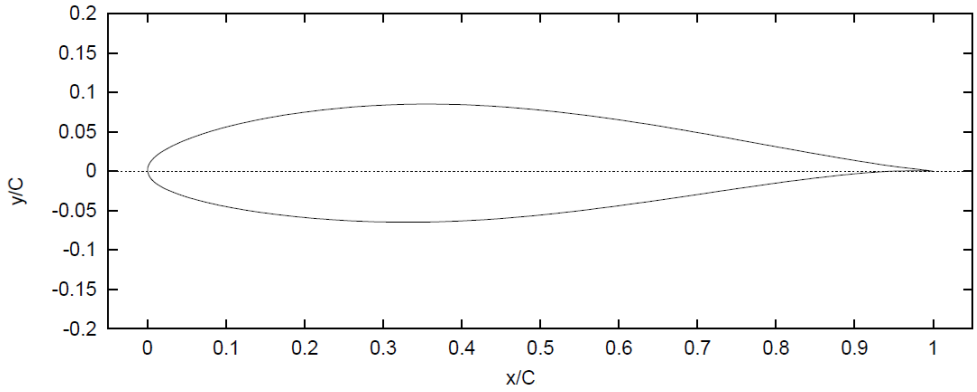
Aşağıda NACA 4412, NACA 23012, NACA 63-215, DU93-W-210, FFA-W3-211, NREL S 809, RISO-A1-21, NACA 0012 standart kanat kesitlerinin geometrik şekilleri verilmiştir.



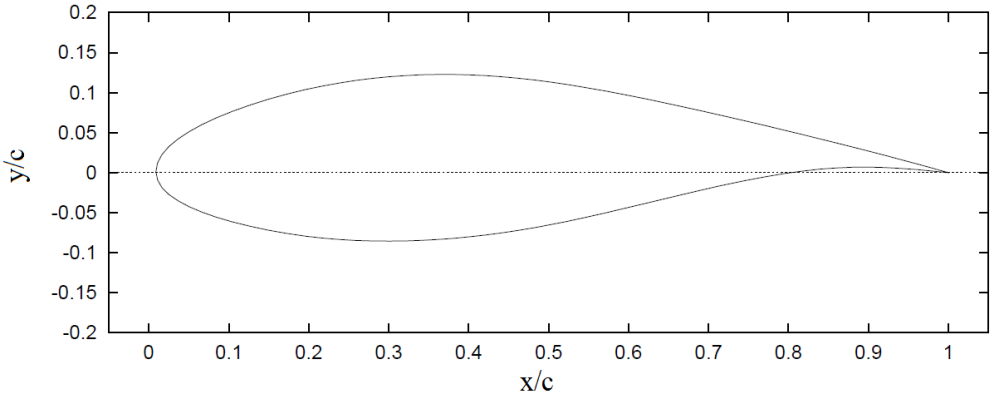
Şekil Ek-1.1. NACA 4412 kanat kesiti[1]



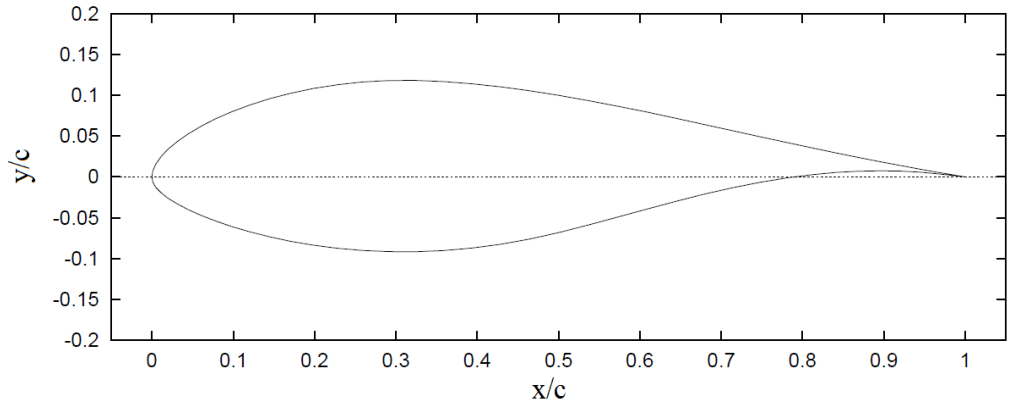
Şekil Ek-1.2.NACA 23012 kanat kesiti[1]



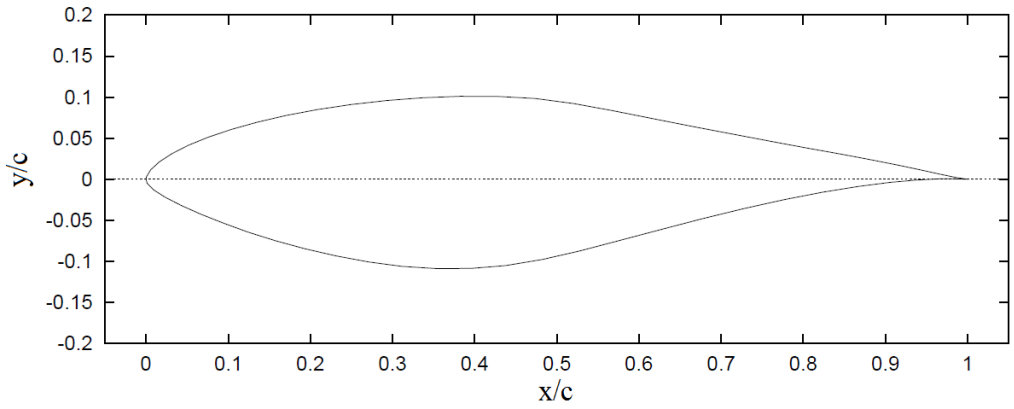
Şekil Ek-1.3.NACA 63-215 kanat kesiti[1]



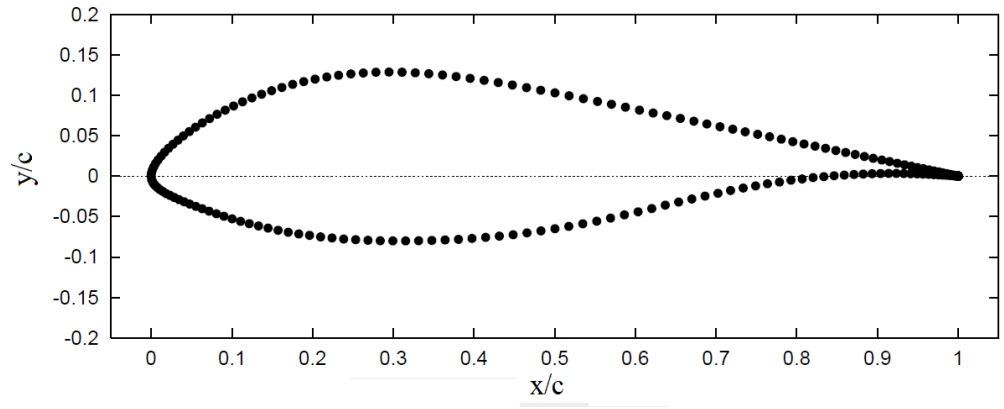
Şekil Ek-1.4.DU 93 -W-210 kanat kesiti[]



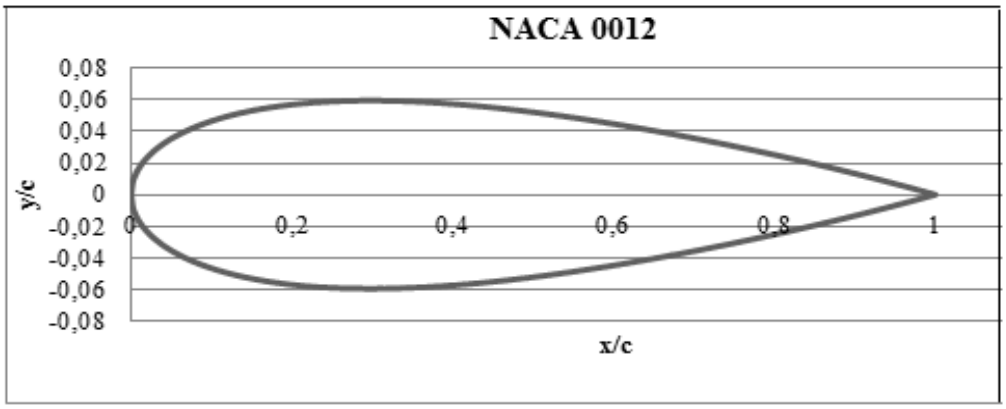
Şekil Ek-1.5.FFA-W3-211kanat kesiti[]



Şekil Ek-1.6.NREL S 809 kanat kesiti[]



Şekil Ek-1.7.RISO-A1-21 kanat kesiti[]



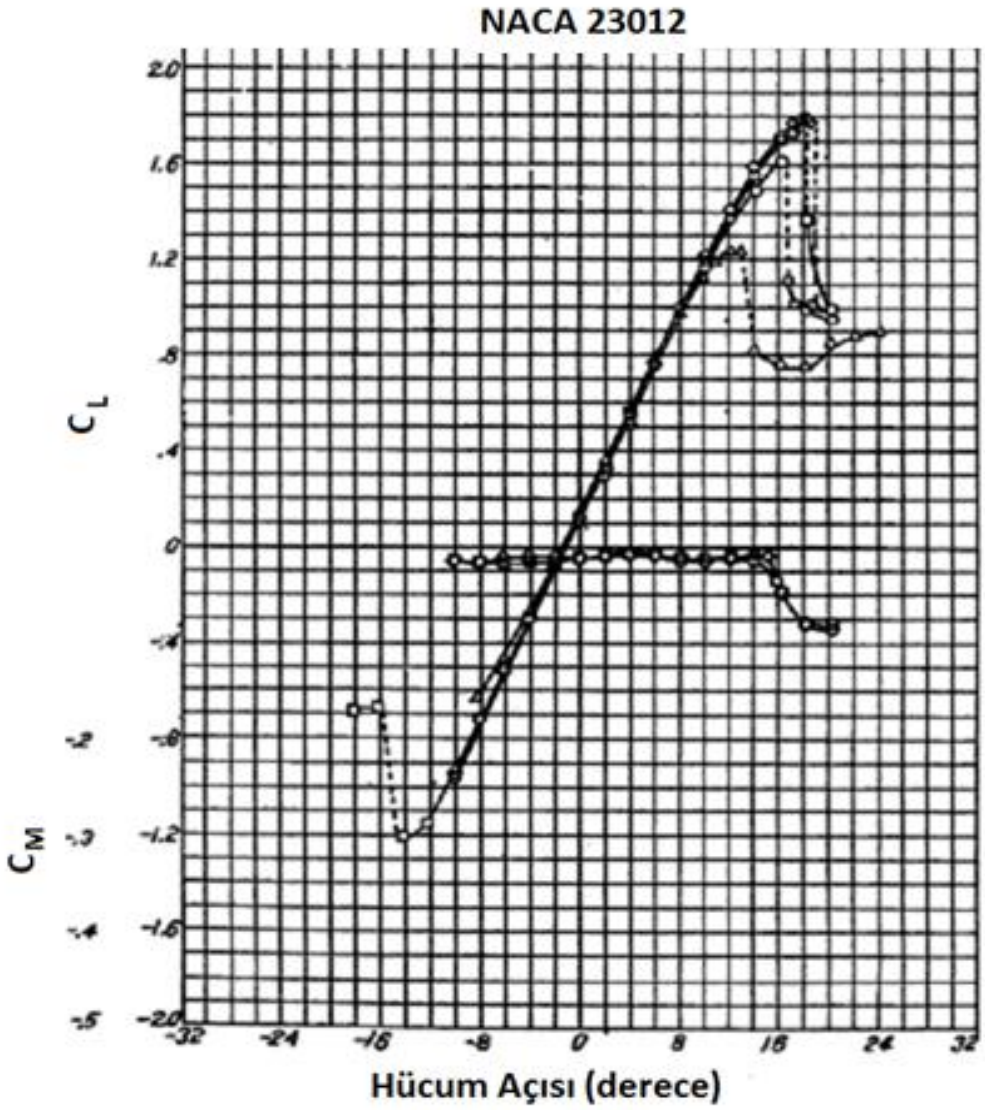
Şekil Ek-1.8.NACA 0012 kanat kesiti[]

EK-2. Standart Kanat Kesitlerinin Aerodinamik Özellikleri

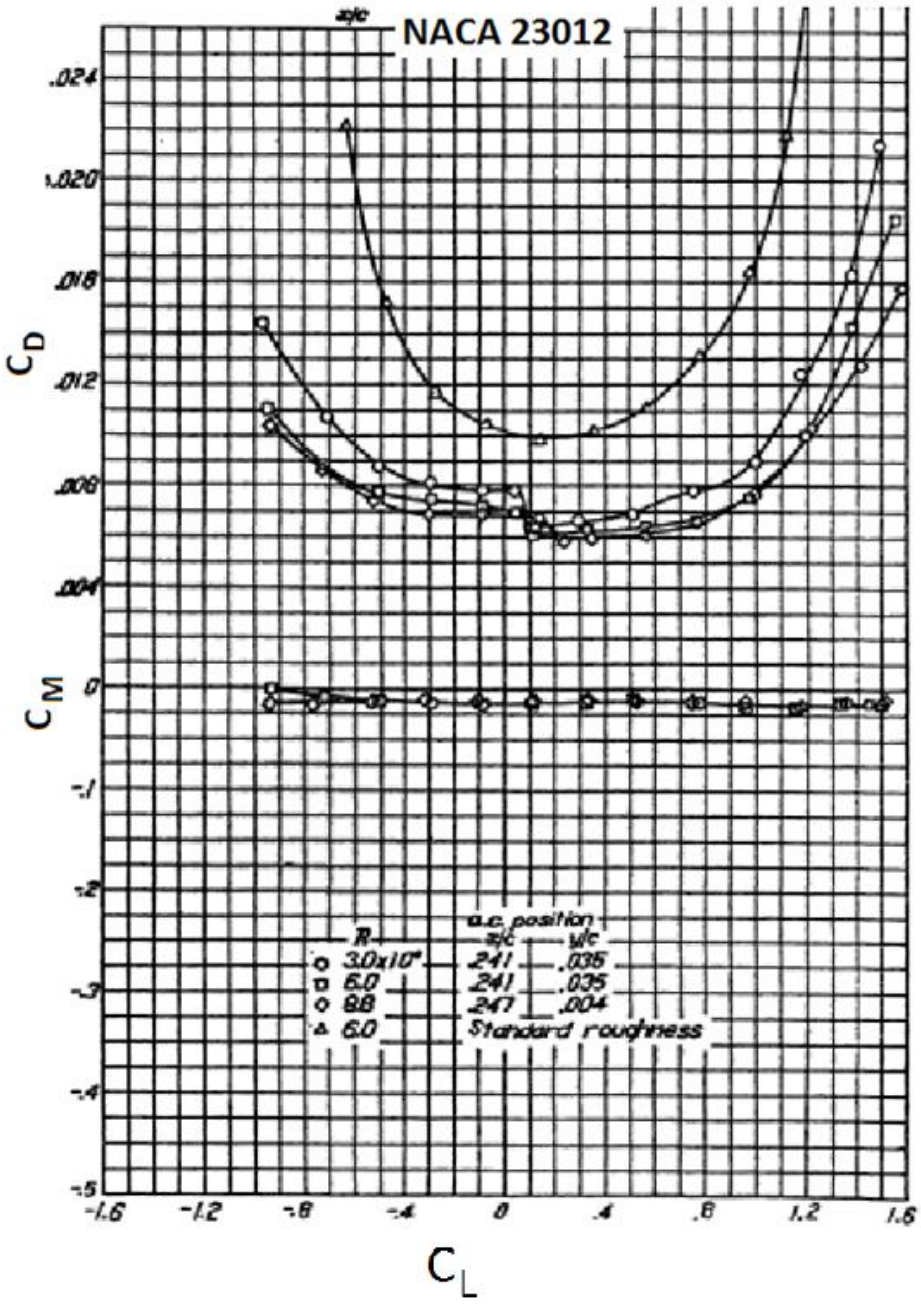
EK-2.1 NACA 23012

NACA 23012 kesitinin kaldırma, sürükleme ve moment katsayı grafikleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir

Kaynak 1: "Theory of Wing Sections, Including a Summary of Airfoil Data" by Ira H Abbott and Albert E. Von Doenhoff, 1959.



ŞekilEk-2.1. NACA 23012 kaldırma ve moment katsayı grafikleri[1]



ŞekilEk-2.2. NACA 23012 sürükleme ve moment -kaldırma katsayı grafikleri[1]

NACA 23012 için stall öncesi hücum açılarındaki kaldırma ve sürükleme değerleri Çizelge Ek-2..1 de verilmiştir.

ÇizelgeEk-2.1. NACA 23012 Kaldırma ve sürükleme katsayı değerleri

Hücum açısı	**C_L**	**C_D**	**C_L/ C_D**
0	0.12	0.006	20
2	0.3	0.0062	48.3871
4	0.55	0.0065	84.61538
6	0.77	0.0067	114.9254
8	1	0.0077	129.8701
10	1.15	0.0095	121.0526
12	1.38	0.0142	97.1831
14	1.56	0.0185	84.32432
16	1.7	0.02	85
18	1.75	0.021	83.33333
20	1.38	0.022	62.72727

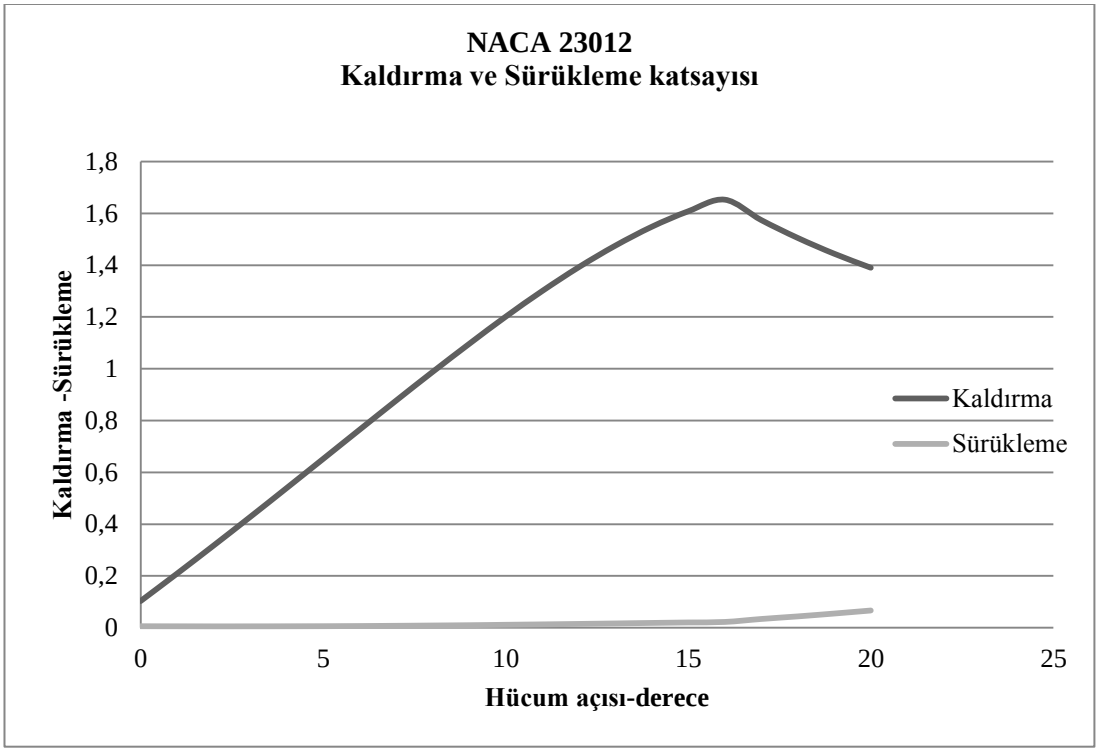
Stall öncesi hücum açılarından en uygun olan beş tanesi ve bunlara ait kaldırma ve sürükleme katsayı değerleri alınarak oluşturulan beş bilinmeyenli denklem sistemi çözülerek 'k' katsayı değerleri hesaplanmıştır.

NACA 23012 stall öncesi hücum açılarında kaldırma ve sürükleme katsayı değerlerini veren 4. dereceden polinom fonksiyonun katsayı değerleri Çizelge Ek-2..2 de verilmiştir.

ÇizelgeEk-2.2. NACA 23012 (C_L,C_D)polinom fonksiyonunun katsayıları

Katsayılar	**C_L**	**C_D**
k_0	0.1031	0.0061
k_1	0.1051	-0.0004
k_2	0.0011	5.43E-05
k_3	7.35E-06	6.53E-06
k_4	-6.58E-06	-2.80E-07

Kaldırma ve sürükleme katsayıları için elde edilen polinom fonksiyon grafikleri Şekil Ek-2.10 da verilmiştir. (hücum açısı 0 ile 20 derece aralığında)

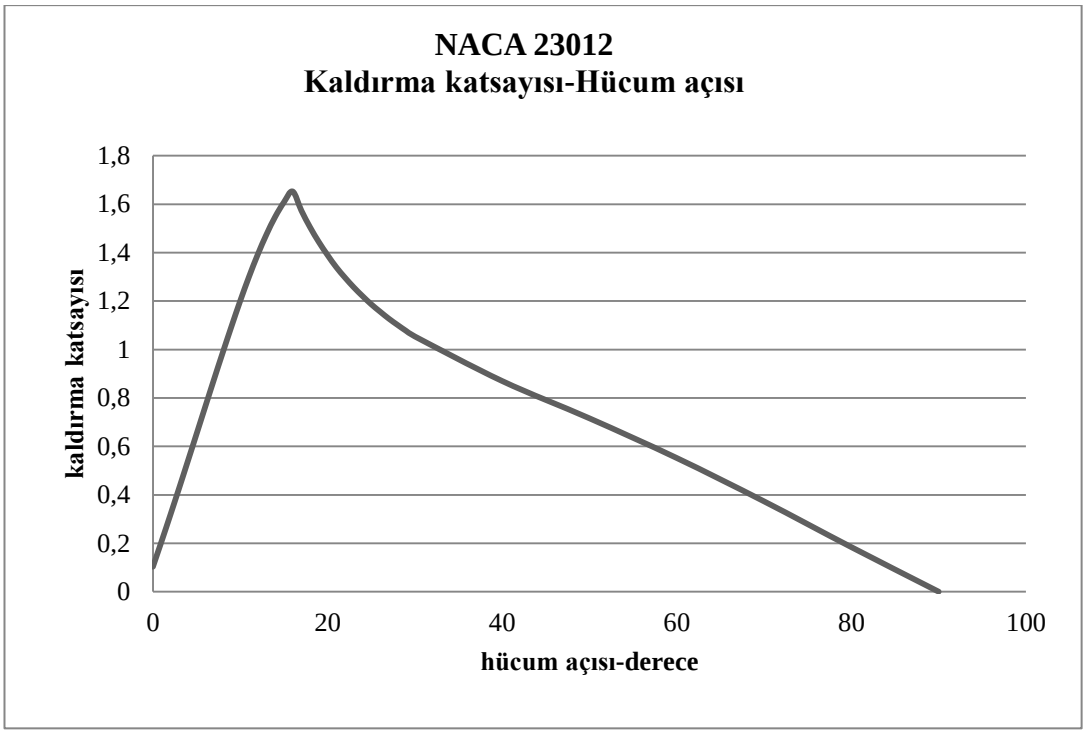


Şekil Ek -2.3. NACA 23012 kaldırma ve sürükleme katsayı grafikleri

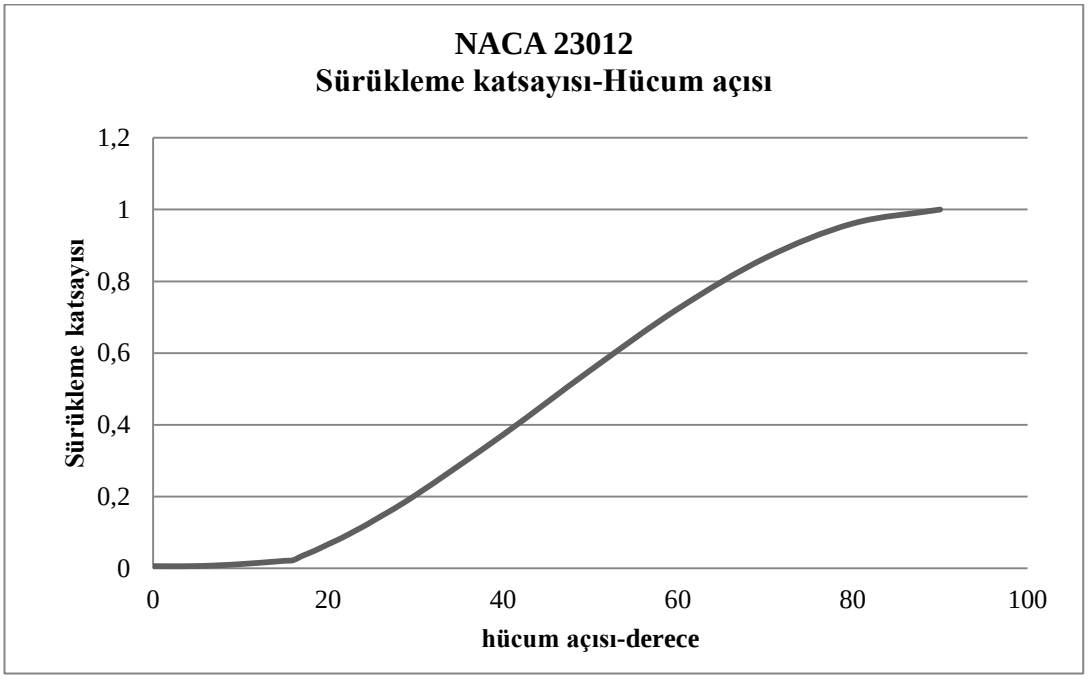
Stall sonrası hücum açılarındaki kaldırma ve sürükleme kuvvet katsayılarının Viterna eşitlikleri ile hesaplanmasında kullanılacak katsayılar çizelge de verilmiştir.

ÇizelgeEk-2.3. NACA 23012 stall sonrası için değerler

stall açısı	16 derece
stall C_L	1,652801
stall C_D	0,0225
B_1	1
B_2	-0,0556
A_1	0,5
A_2	0,414



Şekil Ek -2.4. NACA 23012 0-90 derece aralığında C_L grafiği

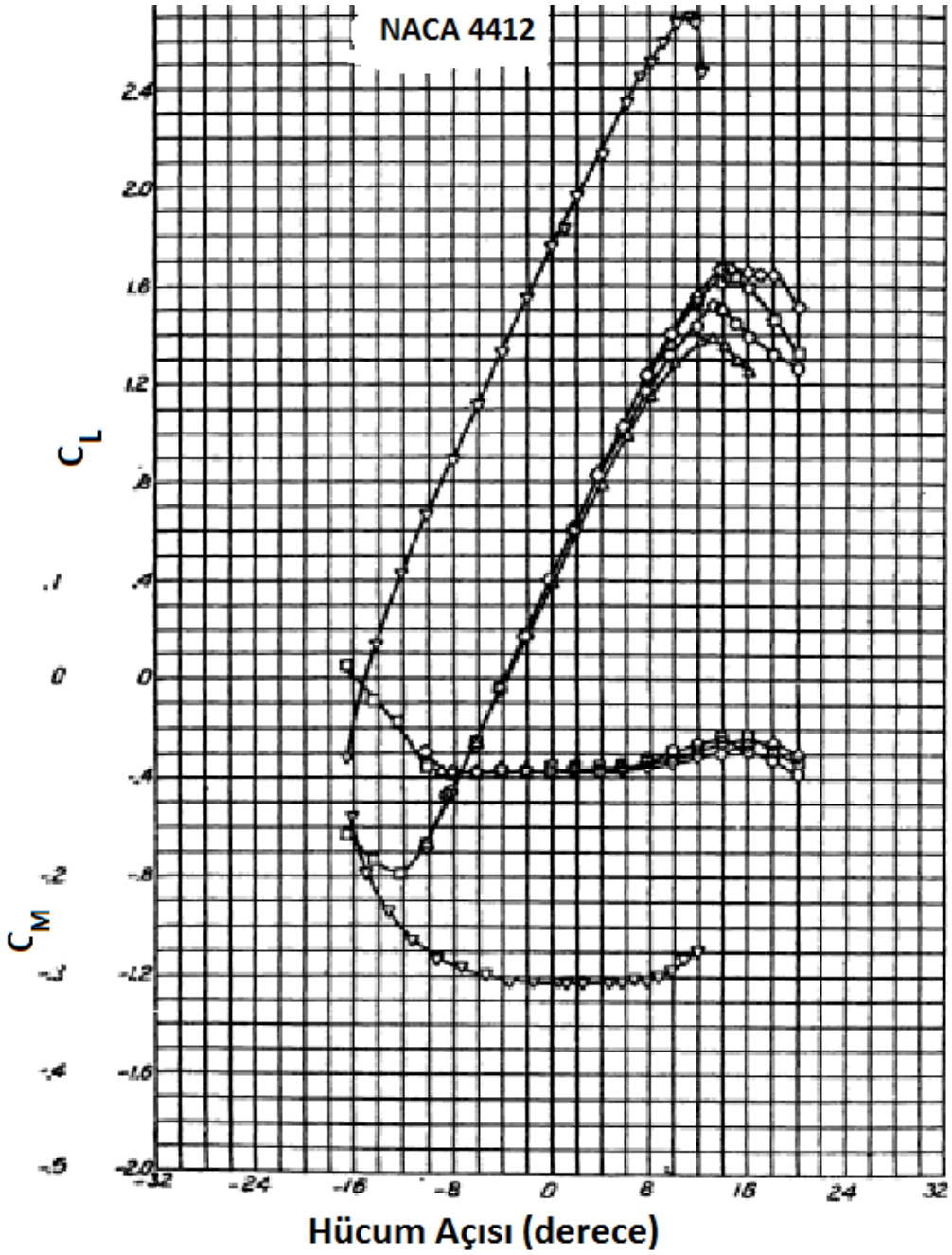


Şekil Ek-2.5. NACA 23012 0-90 derece aralığı için C_D grafiği

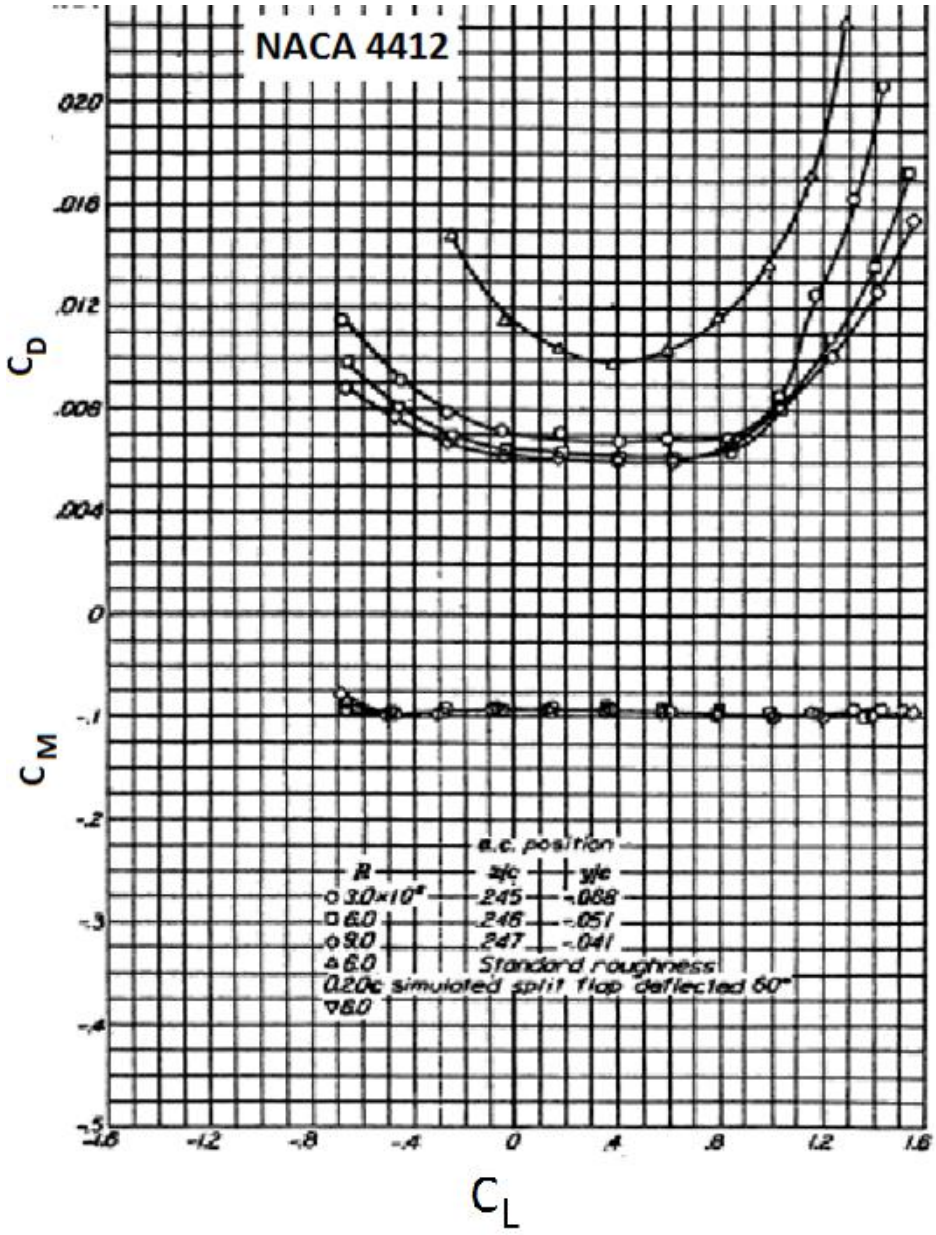
EK-2.2. NACA 4412

NACA 4412 kesitinin kaldırma, sürükleme ve moment katsayı grafikleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

Kaynak 1: "Theory of Wing Sections, Including a Summary of Airfoil Data" by Ira H Abbott and Albert E. Von Doenhoff, 1959.



Şekil Ek-2.6. NACA 4412 kanat kesitine ait kaldırma ve moment katsayıları[1]



ŞekilEk -2.7. NACA 4412 Sürükleme ve moment-kaldırma katsayısı grafikleri[1]

NACA 4412 için stall öncesi hücum açılarındaki kaldırma ve sürükleme değerleri çizlegeEk-2.5 de verilmiştir.

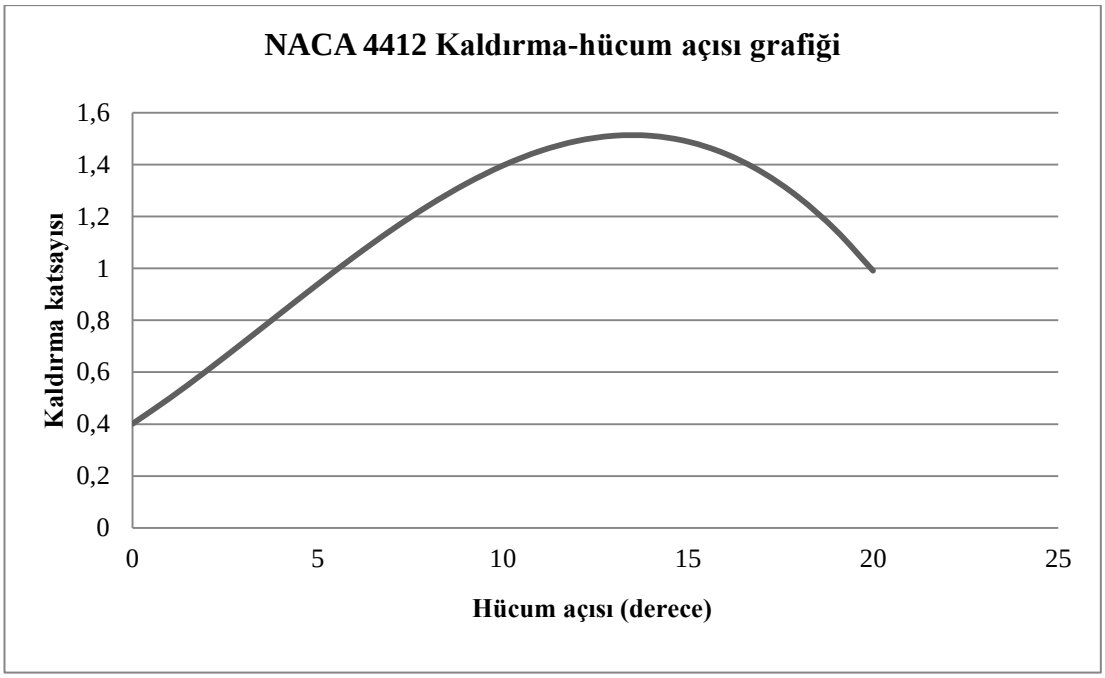
Çizelge Ek -2.4. NACA 4412 (C_L,C_D)polinom fonksiyonunun katsayıları

Katsayılar	**C_L**	**C_D**
k_0	0.4013	0.0064
k_1	0.0935	-0.0009
k_2	0.0052	0.0002
k_3	-0.0005	-5.00E-06
k_4	4.00E-06	-2.00E-07

ÇizelgeEk -2.5. NACA 4412 kaldırma ve sürükleme katsayıları

Hücum açısı(derece)	**C_L**	**C_D**	**C_L/ C_D**
0	0.4	0.0061	65.57377
2	0.6	0.0061	98.36066
4	0.85	0.0065	130.7692
6	1.05	0.0075	140
8	1.25	0.011	113.6364
10	1.43	0.0135	105.9259
12	1.55	0.0175	88.57143
14	1.65	0.02	82.5
16	1.6	0.0185	86.48649
18	1.47	0.0162	90.74074
20	1.31	0.0115	113.913

NACA 4412 stall öncesi hücum açılarında kaldırma ve sürükleme katsayı değerlerini veren polinom fonksiyonunun katsayıları Çizelge Ek-2..6 da verilmiştir.



Şekil Ek-2.8. NACA 4412 kaldırma katsayısının hücum açısına göre değişim grafiği

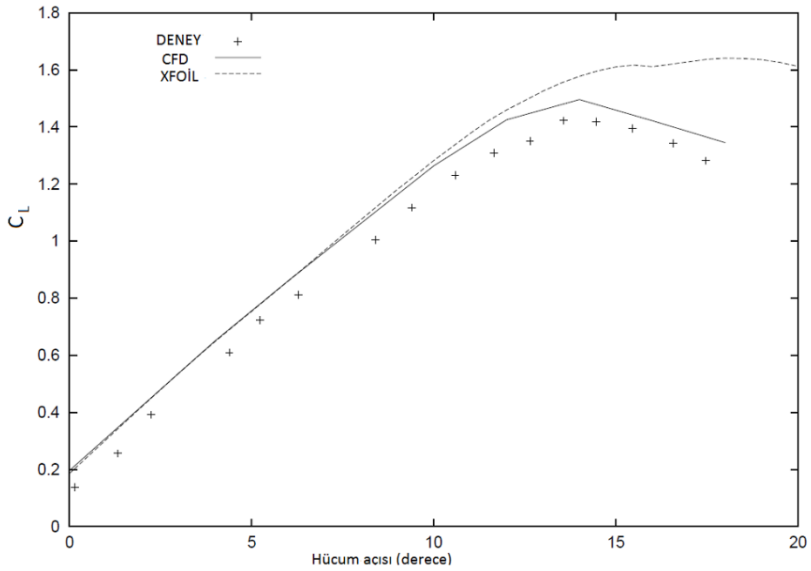
Stall sonrası hücum açılarındaki kaldırma ve sürükleme katsayılarının Viterna eşitlikleri ile hesaplanmasında kullanılacak değerler Çizelge Ek-2..7 de verilmiştir.

ÇizelgeEk-2.6. NACA 4412 stall sonrası için değerler

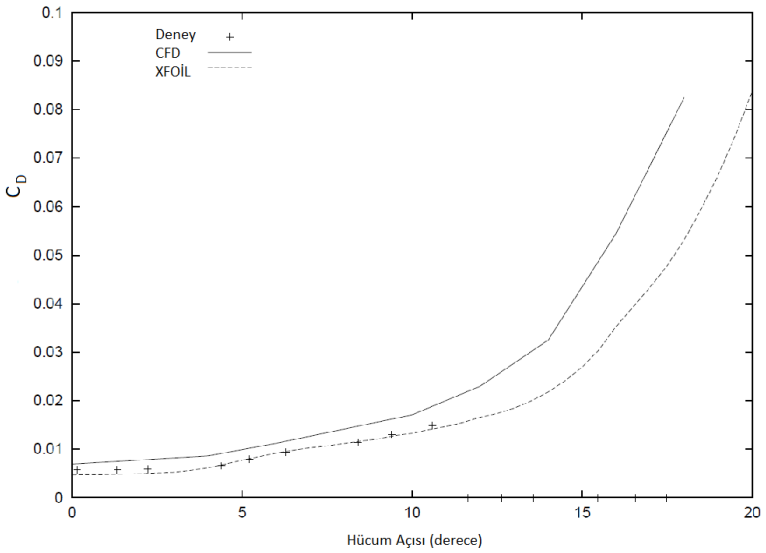
stall hücum açısı	13 derece
stall $\mathbf{C_D}$	0,0185
B_1	1,1
B_2	-0,038627447
A_1	0,55
A_2	0,313725831
stall C_L	1,3

EK-2.3 NACA 63-215

NACA 63-215 kanat kesitinin polar grafikleri Şekil Ek-2.14 de gösterilmiştir.



Şekil Ek-2.9. NACA 63-215 kaldırma katsayısının hücum açısına göre değişim grafiği[1]



Şekil Ek-2.10. NACA 63-215 sürükleme katsayısının hücum açısına göre değişim grafiği

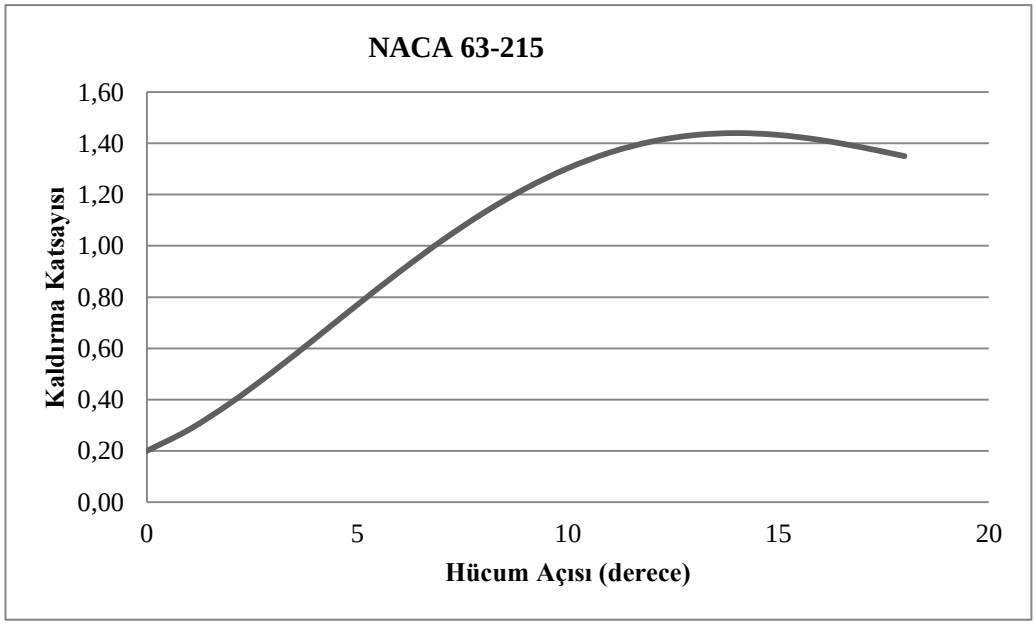
Kaynak 1: I.H. Abbott and A.E. von Doenho, Theory of Wing Sections, Dover Publications, Inc., New York, 1959.

ÇizelgeEk-2.7. NACA 63-215 kanat kesitinin aerodianamik katsayıları

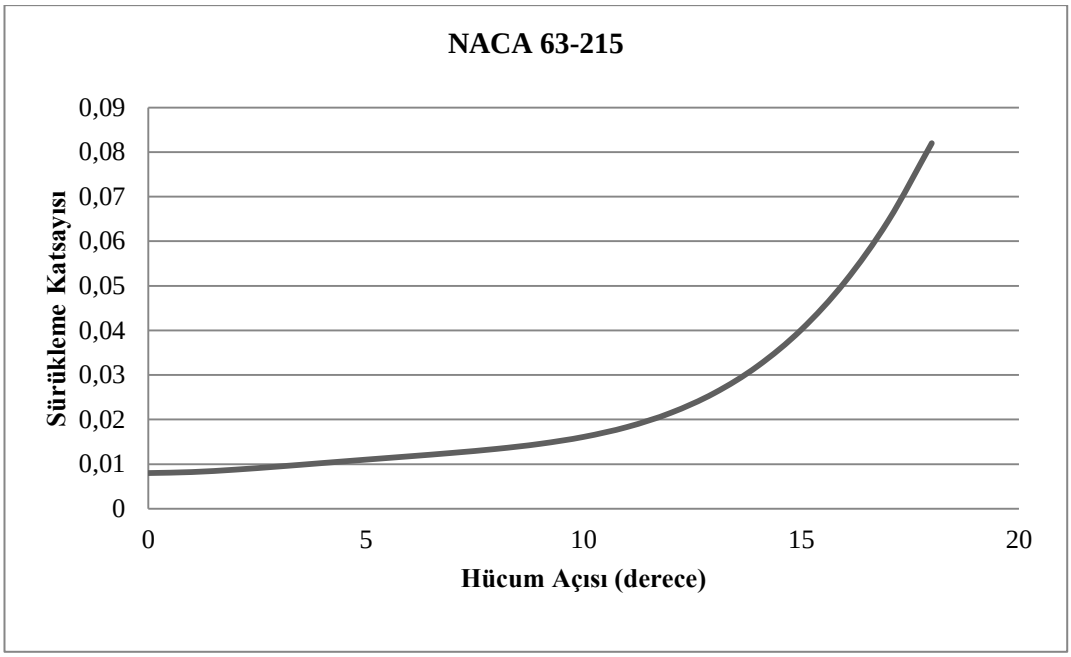
NACA63-215				
CFD	AÇI	C_L	C_D	C_L/C_D
	0	0,20	0,0080	25,00
	1	0,28	0,0082	34,39
	2	0,39	0,0088	44,30
	3	0,51	0,0095	53,73
	4	0,64	0,0102	62,32
	5	0,77	0,0110	69,94
	6	0,90	0,0118	76,39
	7	1,02	0,0125	81,30
	8	1,13	0,0134	84,09
TASARIM	9	1,22	0,0146	84,10
	10	1,30	0,0161	80,85
	11	1,36	0,0183	74,40
	12	1,41	0,0215	65,46
	13	1,43	0,0259	55,24
STALL	14	1,44	0,0320	45,00
	15	1,43	0,0401	35,69
	16	1,41	0,0508	27,79
	17	1,38	0,0646	21,42
	18	1,35	0,0820	16,46

Çizelge Ek-2.8. NACA 63-215 kanat kesitinin polinom fonksiyon katsayıları

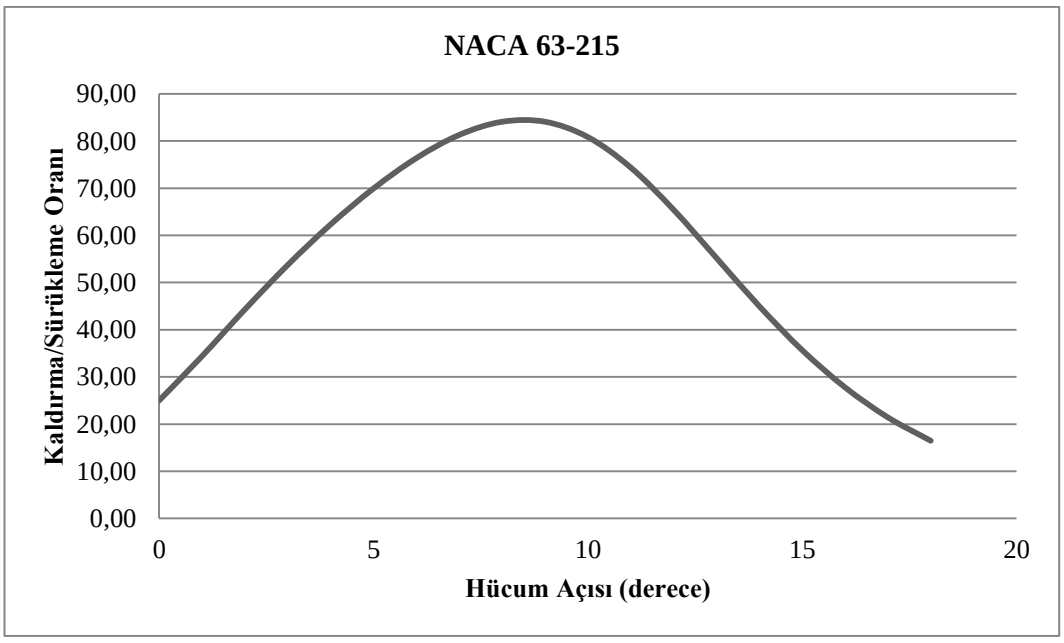
	NACA63-215	
	C_L	C_D
k_0	2,00E-01	8,00E-03
k_1	6,86E-02	2,74E-18
k_2	1,56E-02	2,61E-04
k_3	-1,48E-03	-3,82E-05
k_4	3,29E-05	2,02E-06



Şekil Ek-2.11.NACA 63-215 kaldırma katsayısı

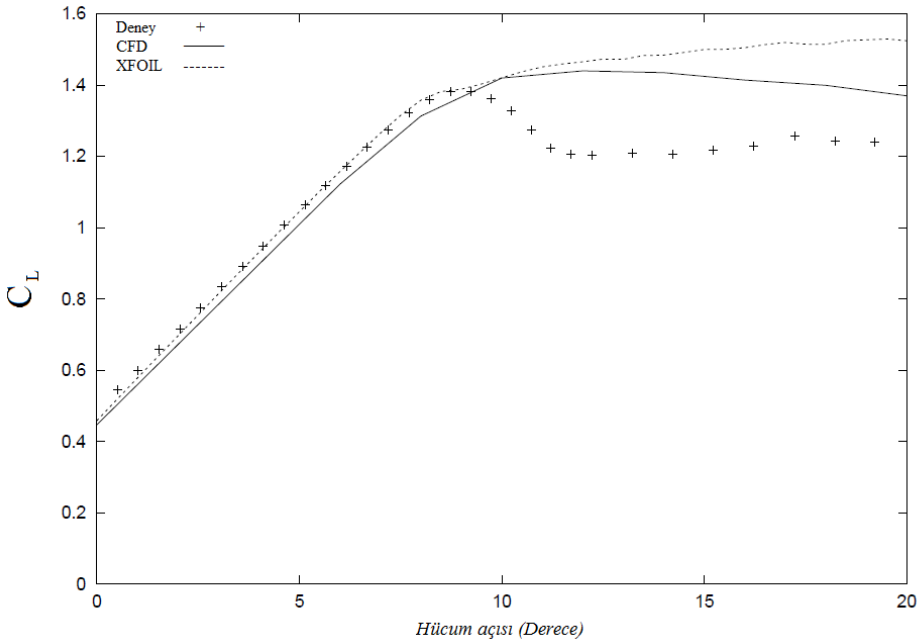


Şekil Ek-2.12.NACA 63-215 sürükleme katsayısı

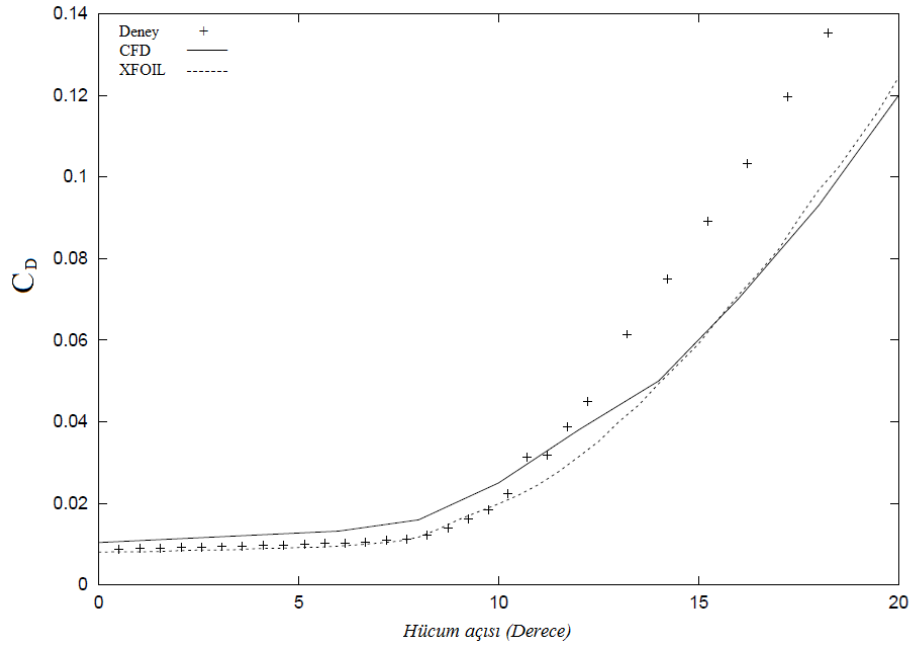


Şekil Ek-2.13.NACA 63-215 kaldırma/sürükleme oranı

EK-2.4 DU 93-W-210



Şekil Ek-2.14. DU 93-W-210 kaldırma katsayısının hücum açısına göre değişim grafiği[2]



Şekil Ek-2.15. DU 93-W-210 Sürükleme katsayısının hücum açısına göre değişim grafiği(Experiment Delft University of Technology)[2]

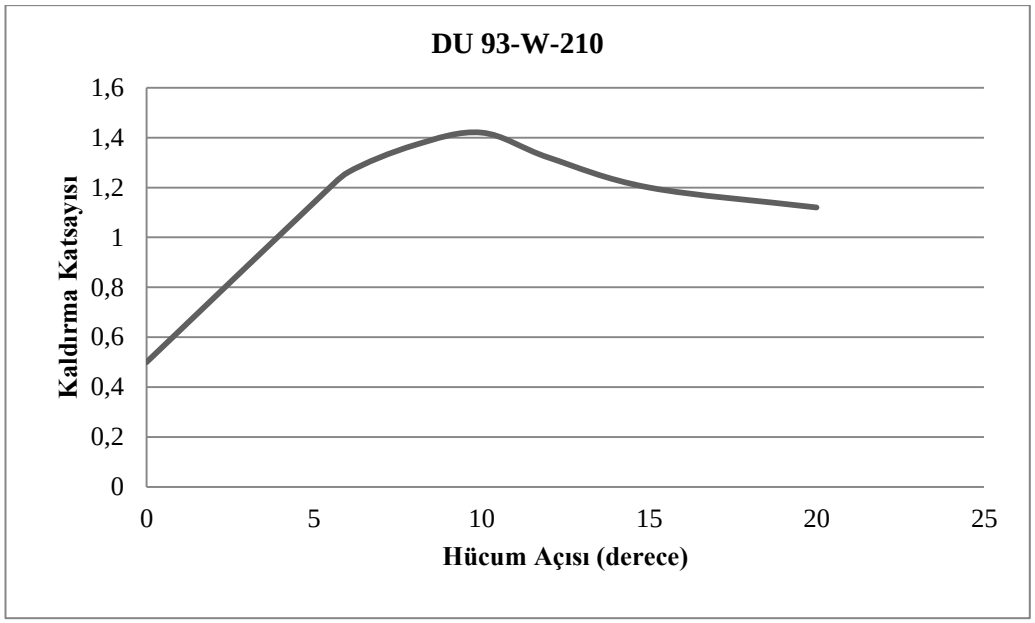
Kaynak 2: W.A. Timmer, The Design and Testing of Airfoil DU 91-W2-250, Sixth IEASymposium on the Aerodynamics of Wind Turbines, Petten, The Netherlands, November 1992.

Çizelge Ek-2.9. DU 93-W-210 aerodinamik katsayıları

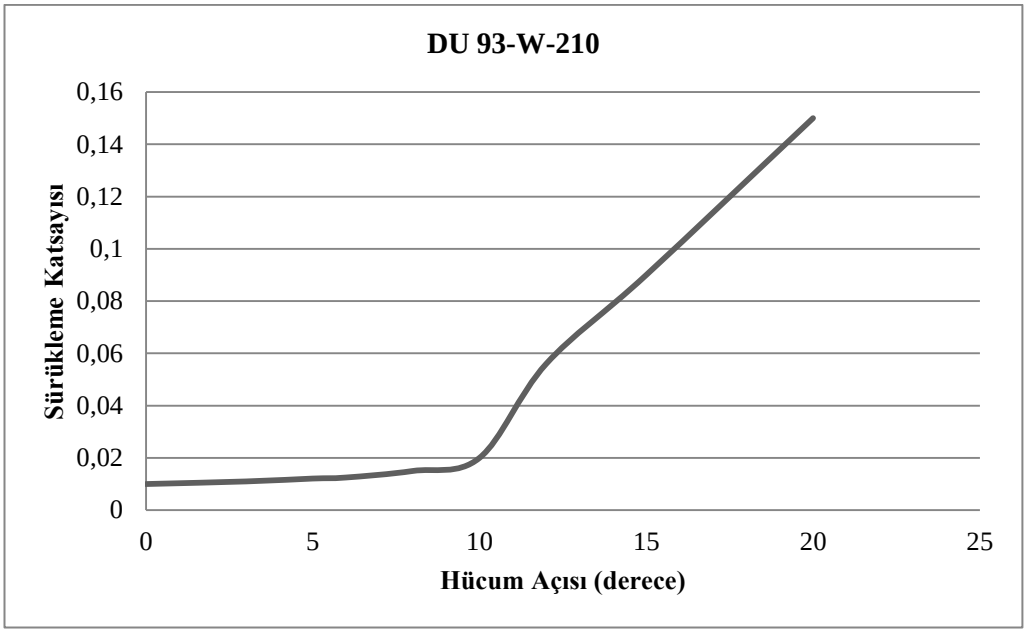
DU93-W-210			
Re=1.E06			
DENEYSEL			
AÇI	C_L	C_D	C_L/C_D
0	0,5	0,01	50
5	1,14	0,0121	94,21488
6	1,28	0,0125	102,4
10	1,42	0,02	71
12	1,32	0,056	23,57143
15	1,2	0,09	13,33333
20	1,12	0,15	7,466667

Çizelge Ek-2.10. DU 93-W-210 polinom fonksiyon katsayıları

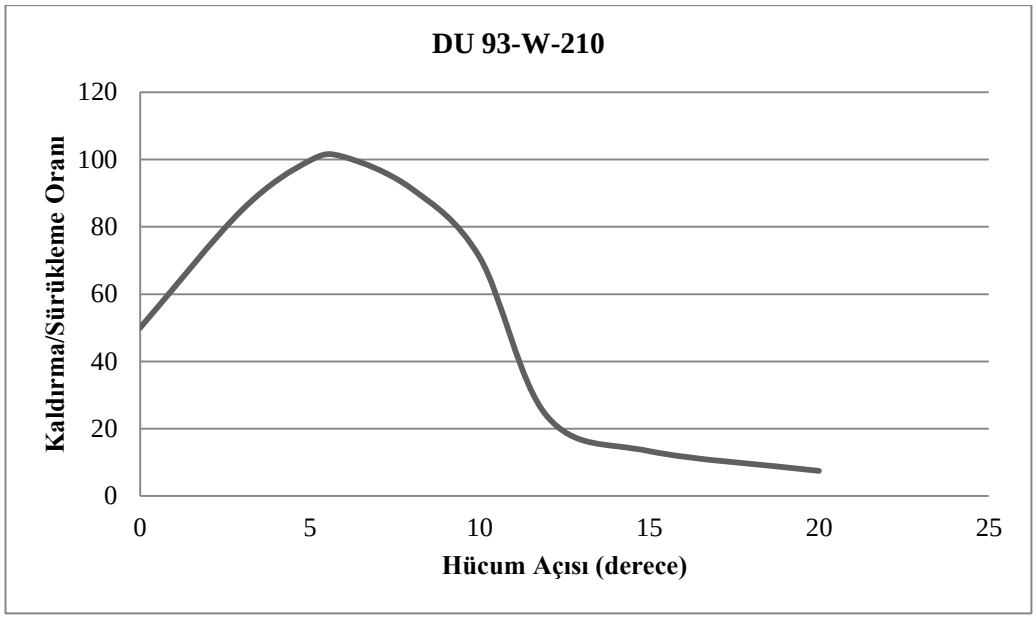
DU93-W-210		
	C_L	C_D
k_0	0,45	0,009
k_1	-0,103675	1,24E-18
k_2	0,0781814	0,000166
k_3	-0,0083212	-1,85E-05
k_4	2,46E-04	1,39E-06



Şekil Ek-2.16.DU 93-W-210 kaldırma katsayısı



Şekil Ek-2.17. DU 93-W-210 sürükleme katsayısı

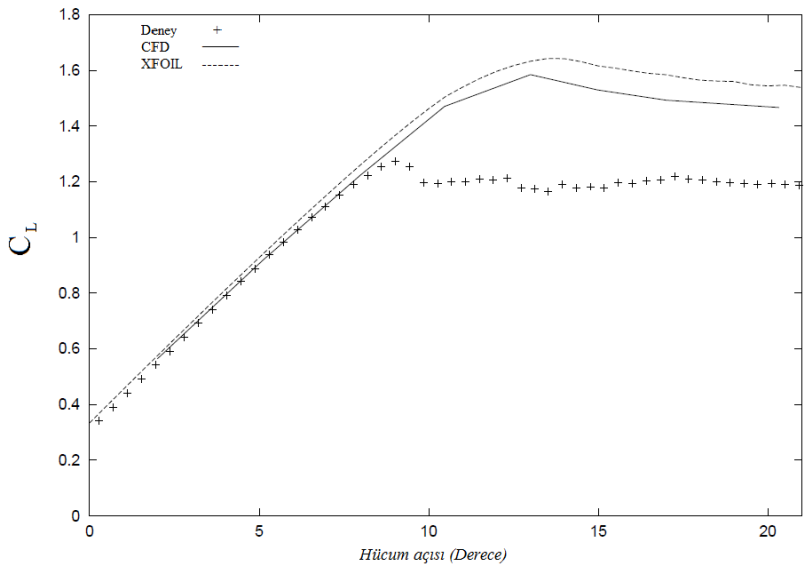


Şekil Ek-2.18. DU 93-W-210 kaldırma/sürükleme oranı

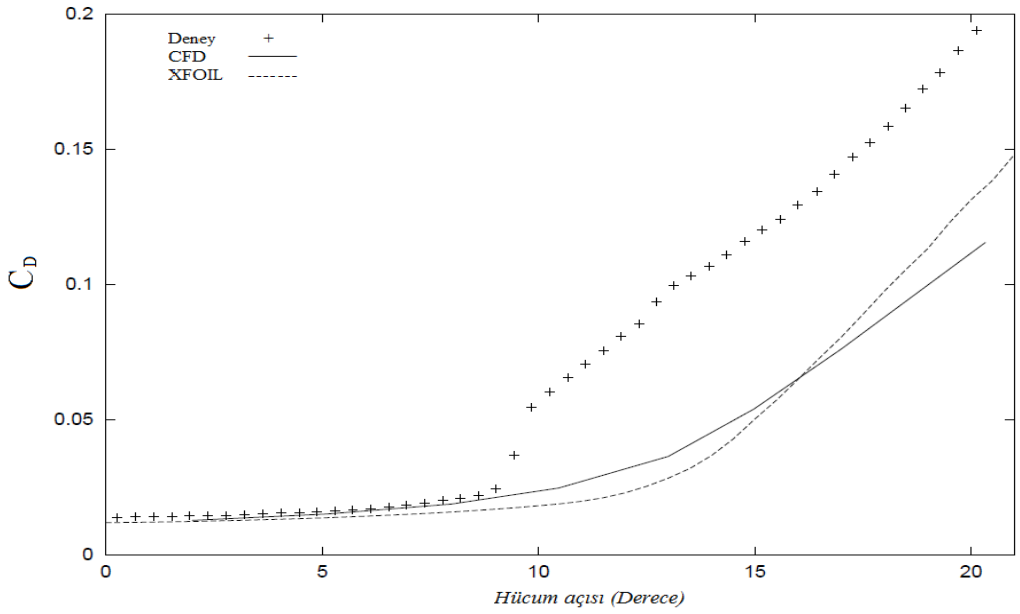
EK-2.5 FFA-W3-211

FFA-W3-211 kesitinin kaldırma, sürükleme katsayı grafikleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Kalınlık oranı % 21 dir (maksimum kalınlık/veter uzunluğu, t_{max}/c)

Kaynak 3:A. Björck, A Guide to Data Files from Wind Tunnel Test of a FFA-W3-211Airfoil at FFA, FFA-V-019, Flygtekniska Försöksanstalten, Sweden, 199Ek-2.



Şekil Ek-2.19.FFA-W3-211 Kaldırma katsayısının hücum açısına göre değişim grafiği[3]



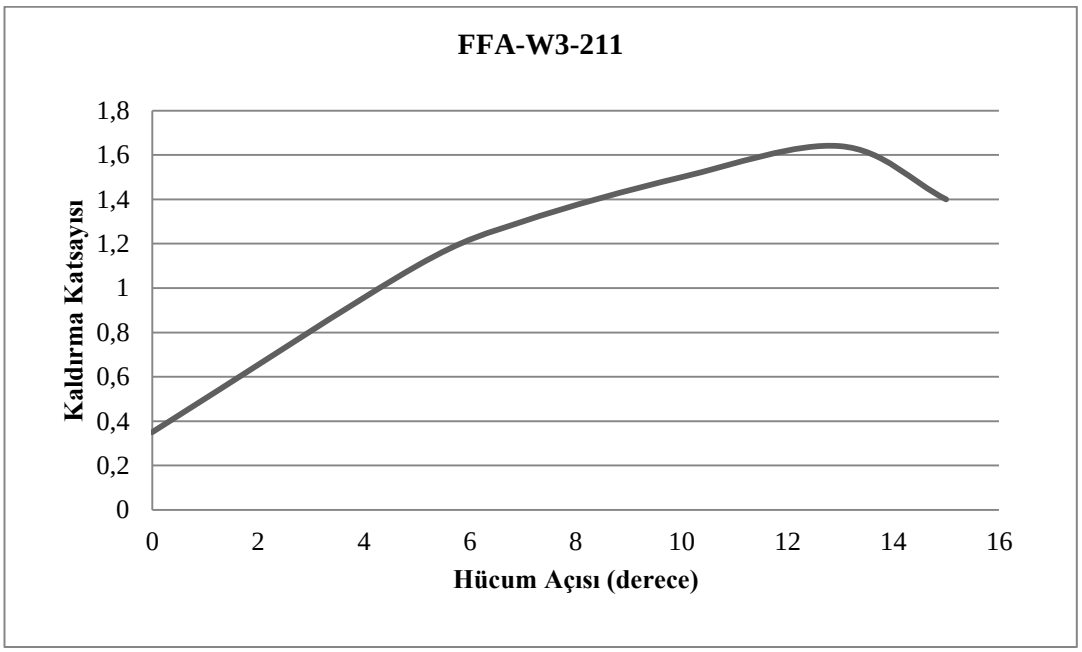
Şekil Ek-2.20.FFA-W3-211 Sürükleme katsayısının hücum açısına göre değişim grafiği[3]

Çizelge Ek-2.11.FFA-W3-211 için Kaldırma ve Sürükleme Katsayıları

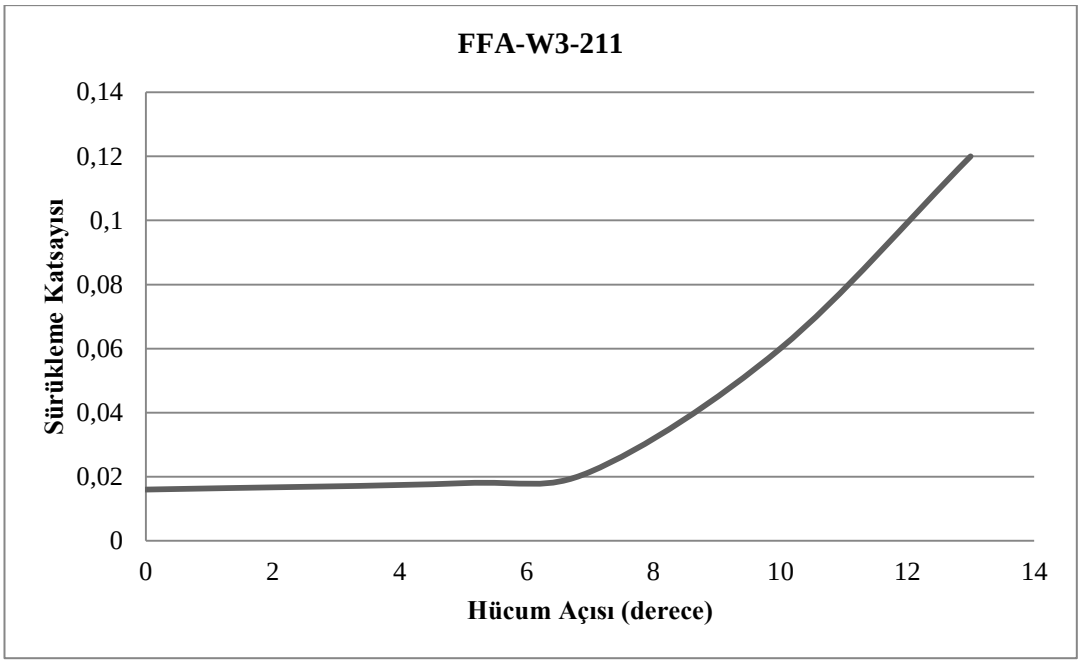
Hücum açısı	**C_L**	**C_D**	**C_L / C_D**
0	0,35	0,017	20,58824
2	0,6	0,0172	34,88372
4	0,9	0,0175	51,42857
6	1,1	0,0183	60,10929
8	1,34	0,019	70,52632
10	1,45	0,021	69,04762
12	1,61	0,03	53,66667
14	1,59	0,045	35,33333
16	1,52	0,07	21,71429
18	1,51	0,087	17,35632
20	1,5	0,12	12,5

Çizelge Ek-2.12. FFA-W3-211 için C_L ve C_D Polinom Fonksiyon Katsayıları

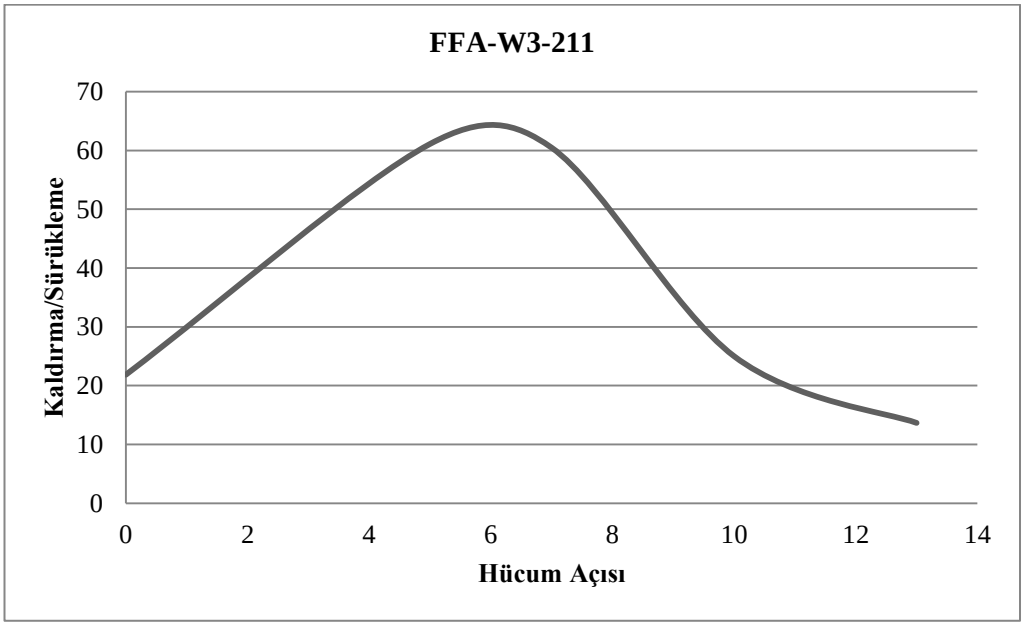
Katsayılar	**C_L**	**C_D**
k_0	0,3635	0,0052
k_1	0,1221	0,0003
k_2	0,0002	2E-05
k_3	4E-05	-1E-05
k_4	-E-05	7E-07
k_5	-9E-07	5E-08
k_6	5E-08	-2E-09



Şekil Ek-2.21. FFA-W3-212 kaldırma katsayısı



Şekil Ek-2.22. FFA-W3-211 sürükleme katsayısı



Şekil Ek-2.23. FFA-W3-211 kaldırma/sürükleme oranı

EK-2.6 NREL S 809

NREL S 809 için stall öncesi hücum açılarındaki kaldırma ve sürükleme katsayı değerleri Çizelge de verilmiştir.

Çizelge Ek-2.13. NREL S 809 için kaldırma ve sürükleme (C_L,C_D)Katsayıları

Hücum açısı	**C_L**	**C_D**	**C_L / C_D**
0	0,08	0,007	11,42857
2	0,36	0,008	45
4	0,58	0,011	52,72727
6	0,8	0,012	66,66667
8	0,9	0,03	30
10	0,95	0,04	23,75
12	0,98	0,055	17,81818
14	1,05	0,07	15
16	1,08	0,09	12
18	0,8	0,17	4,705882
20	0,63	0,4	1,575

Hücum açısı stall açısından küçük iken, C_L ve C_D hesabı için aşağıdaki iki eşitlik önerilmektedir.[4]

Kaynak 4: Tangler, J.L and Somers, D.M.1995. *NREL Airfoil Families for HAWTs.* National Renewable Energy Laboratory.

$$C_L = \sum_{i=0}^{5} a_i[\ln(\alpha + 10)]^i,$$

$$C_D = \sum_{i=0}^{5} b_i[\ln(\alpha + 10)]^i.$$

NREL S 809 stall öncesi hücum açılarında kaldırma ve sürükleme katsayı değerlerini veren logaritmik polinom fonksiyon katsayıları Çizlege de verilmiştir.

Çizelge Ek-2.14. NREL S 809 için C_L ve $C_D$polinom fonksiyon katsayıları

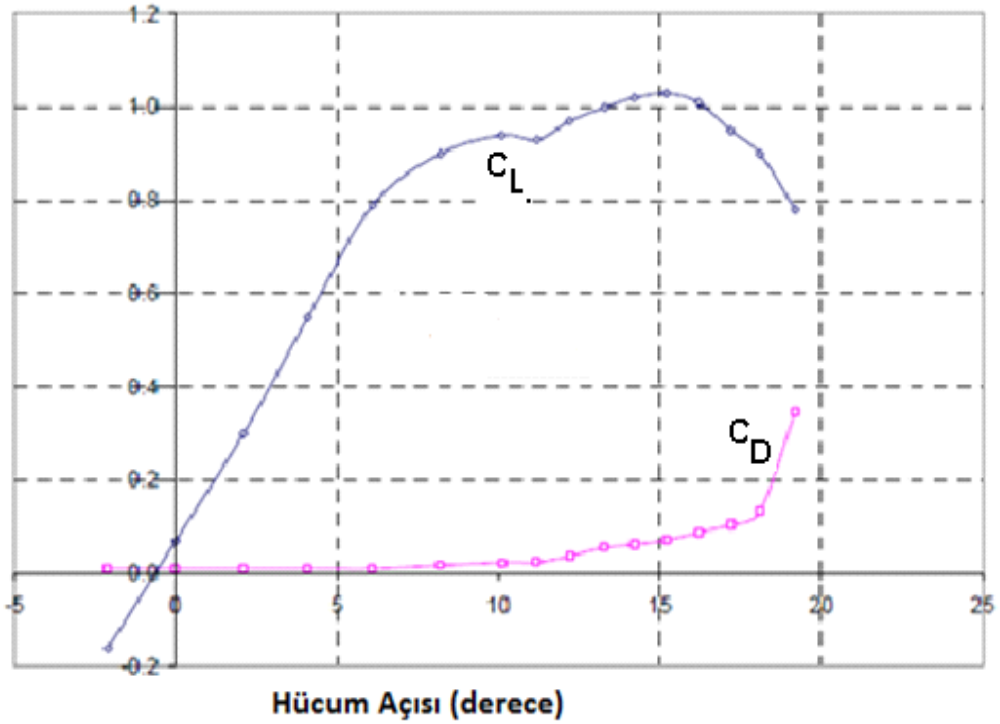
Katsayılar	**C_L**	**Katsayılar**	**C_D**
a_0	18,5	b_0	-2,68183
a_1	-15,1	b_1	3,25269
a_2	-0,19	b_2	-1,29046
a_3	2,543	b_3	0,164342
a_4	-0,5	b_4	0,00046925
a_5	0,00625	b_5	0,000367589

Stall sonrası hücum açılarındaki kaldırma ve sürükleme kuvvet katsayılarının Viterna eşitlikleri ile hesaplanmasında kullanılacak katsayılar Çizelge de verilmiştir.

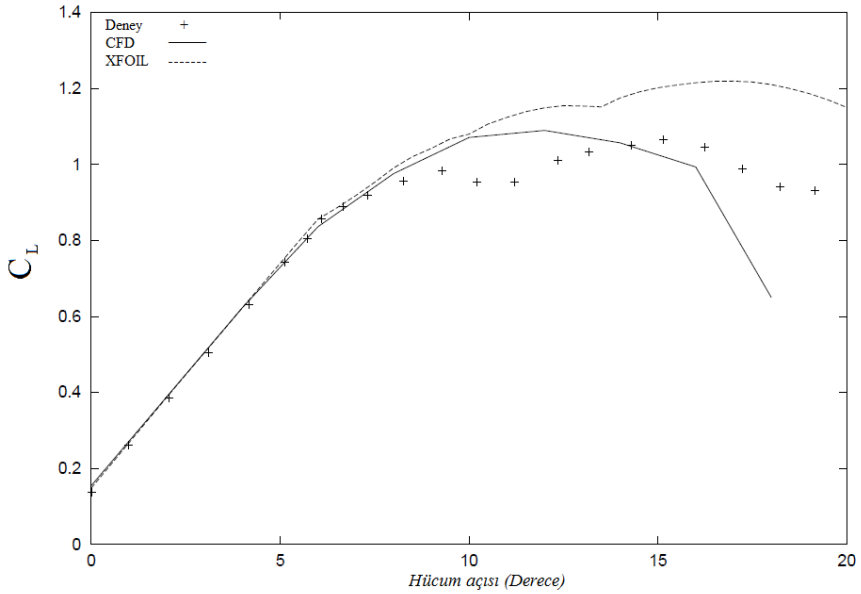
Çizelge Ek-2.15. NREL S 809 stall sonrası için değerler

alfa-stall	15 derece
stall C_L	0,894
stall C_D	0,07
B_1	1,3
B_2	-0,054
A_1	0,65
A_2	0,397

Hücum açısı 90 derece iken kaldırma katsayısı minimum değerine sahip olurken sürükleme katsayısı maksimum değerine sahip olur. NREL S 809 için maksimum sürükleme katsayı değeri 90 derecelik hücum açısında 1,3 ve bu hücum açısındaki kaldırma katsayı değeri 0 dır. Maksimum kaldırma katsayı değeri 15 derecelik hücum açısında 1,1 ve bu hücum açısındaki sürükleme katsayısı 0,08 dir. Bu değerler Reynold sayısına göre değişir. Düşük reynold sayısı için bu değerler alınmıştır.

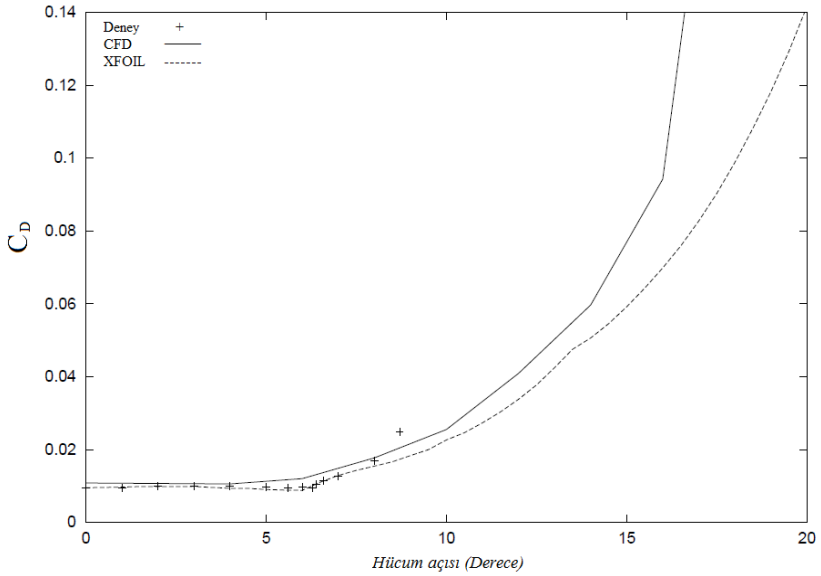


Şekil Ek-2.24. NREL S 809 C_L ve C_D Grafikleri (Delft rüzgar tünel sonuçları) [Delft University of Technology (DUT)][4]



Şekil Ek-2.25. NREL S 809 Kaldırma katsayısının hücum açısına göre değişim grafiği [5]

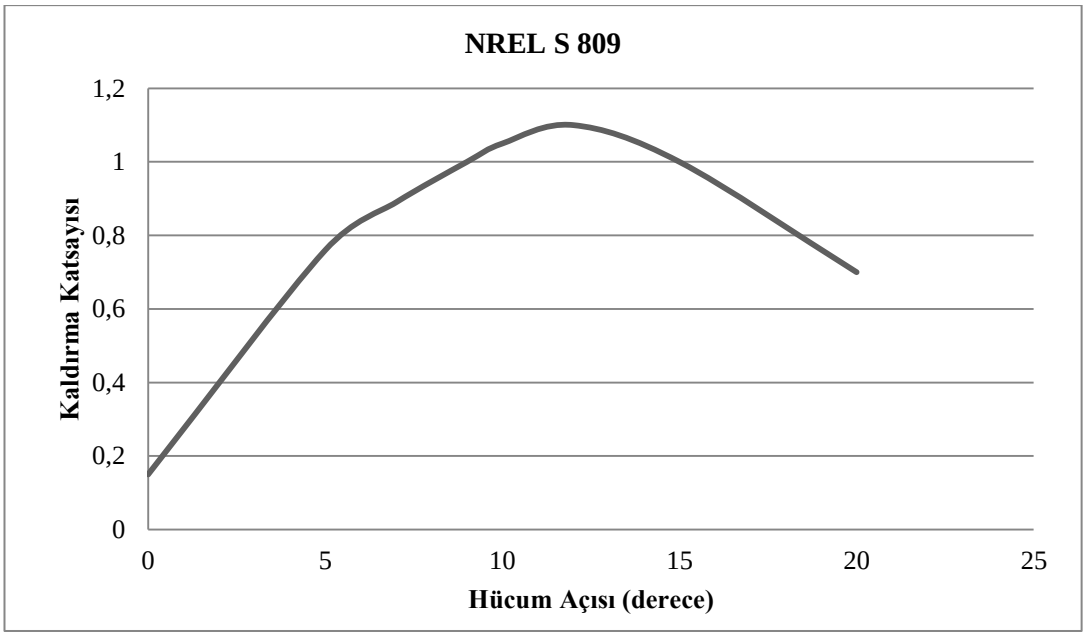
Kaynak 5:D.M. Somers, Design and Experimental Results for the S809 Airfoil, Technical Report NREL/SR-440-6918, National Renewable Energy Laboratory,Colorado, USA, January 1997.



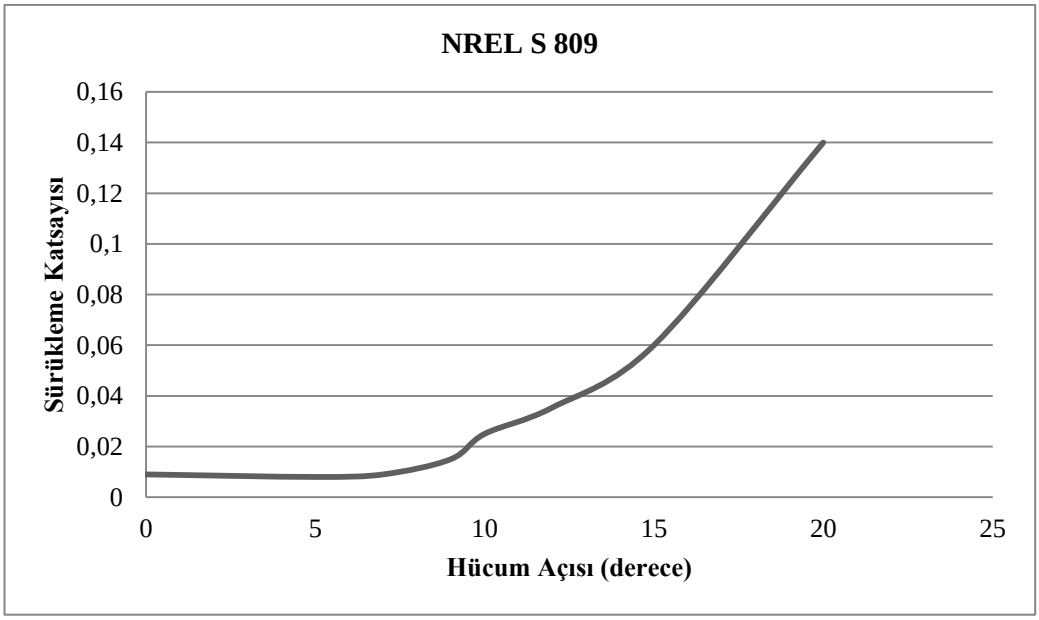
Şekil Ek-2.26.NREL S 809 Sürükleme katsayısının hücum açısına göre değişim grafiği[5]

Çizelge Ek-2.16: NREL S 809 aerodinamik katsayılar

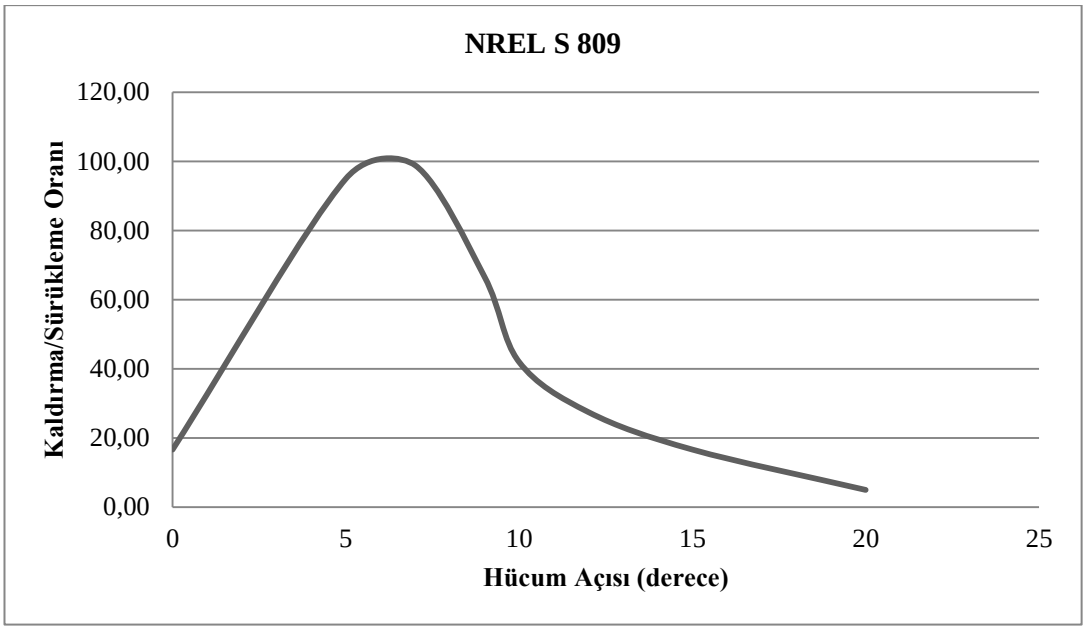
NREL S 809			
Hücum Açısı	C_L	C_D	C_L/C_D
0	0,08	0,007	11,42857
2	0,36	0,008	45
4	0,58	0,011	52,72727
6	0,8	0,012	66,66667
8	0,9	0,03	30
10	0,95	0,04	23,75
12	0,98	0,055	17,81818
14	1,05	0,07	15
16	1,08	0,09	12
18	0,8	0,17	4,705882
20	0,63	0,4	1,575



Şekil Ek-2.27.NREL S809 kaldırma katsayısı

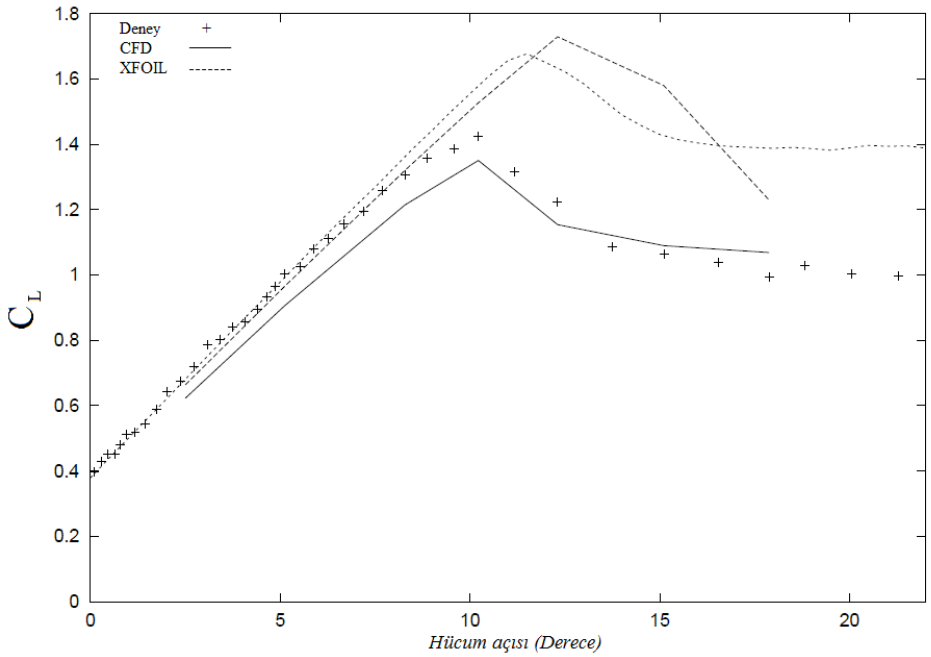


Şekil Ek-2.28. NREL S 809 sürükleme katsayısı



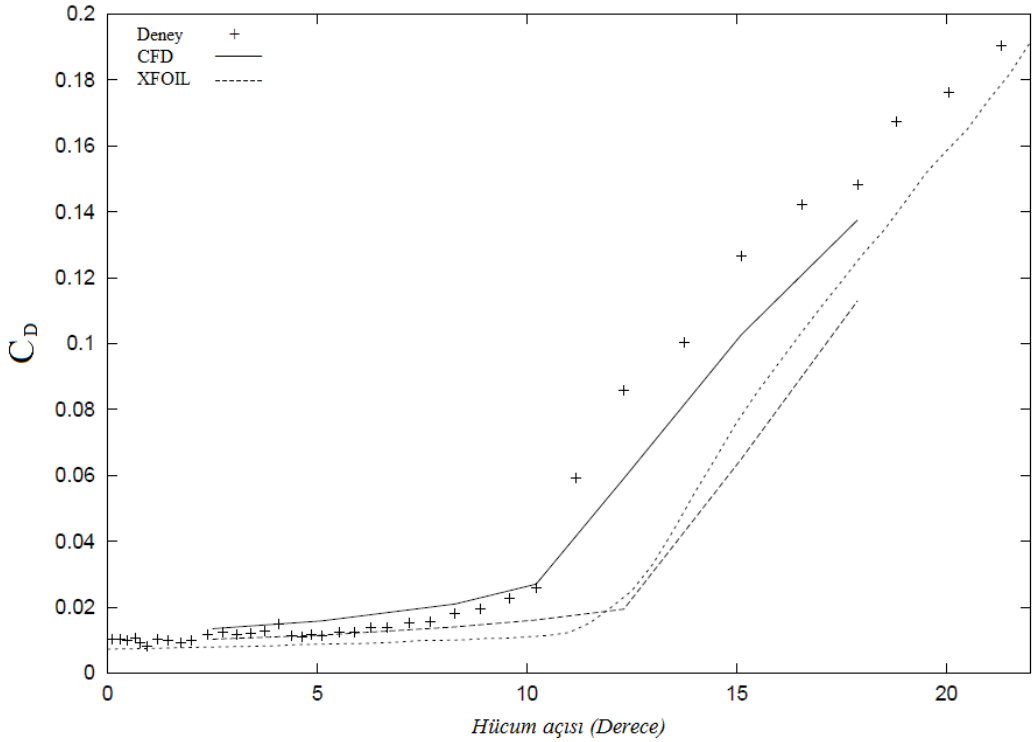
Şekil Ek-2.29.NREL S 809 kaldırma/sürükleme oranı

EK-2.7 RISO-A1-21



Şekil Ek-2.30. RISO-A1-21 Kaldırma katsayısının hücum açısına göre değişim grafiği[6]

Kaynak 6:N.N. Sorensen, General Purpose Flow Solver Applied to Flow over Hills, Tech. Report, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, PhD Thesis, Riso-R-827(EN), June 1995.



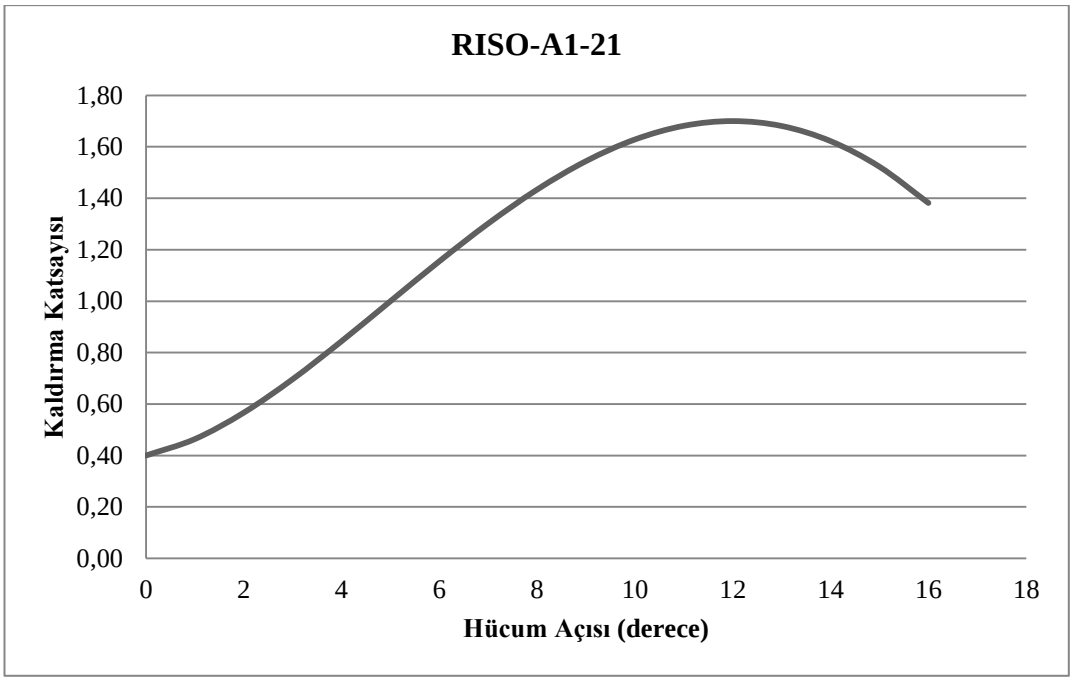
Şekil Ek-2.31.RISO-A1-21 Sürükleme katsayısının hücum açısına göre değişim grafiği[6]

Çizelge Ek-2.17. RISO-A1-21 aerodinamik katsayılar

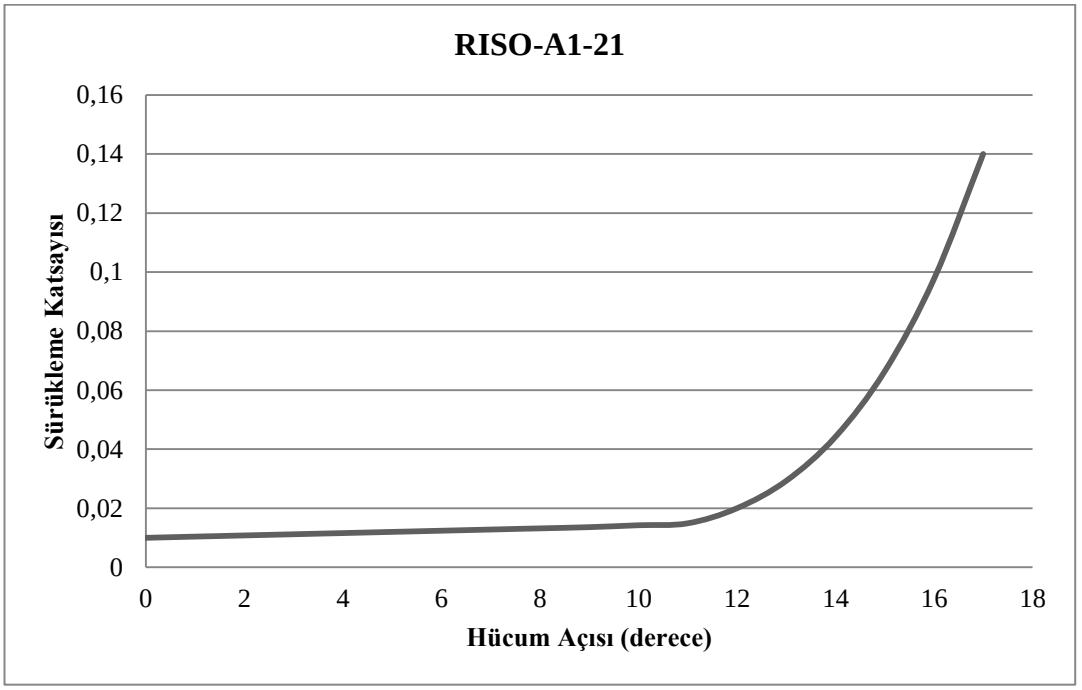
RISO-A1-21				
CFD	AÇI	C_L	C_D	C_L/C_D
	0	0,40	0,0100	40,00
	1	0,46	0,0106	43,71
	2	0,57	0,0120	47,41
	3	0,70	0,0134	52,09
	4	0,84	0,0145	58,42
	5	1,00	0,0149	66,98
	6	1,16	0,0147	78,34
	7	1,30	0,0140	92,86
	8	1,43	0,0131	109,63
TASARIM	9	1,54	0,0124	124,36
	10	1,63	0,0127	127,89
	11	1,68	0,0149	112,83
STALL	12	1,70	0,0200	85,00
	13	1,68	0,0293	57,41
	14	1,62	0,0442	36,71
	15	1,52	0,0664	22,94
	16	1,38	0,0976	14,15
	17	1,20	0,1400	8,57

Çizelge Ek-2.18.RISO-A1-21 için C L ve C D polinom fonksiyon katsayıları

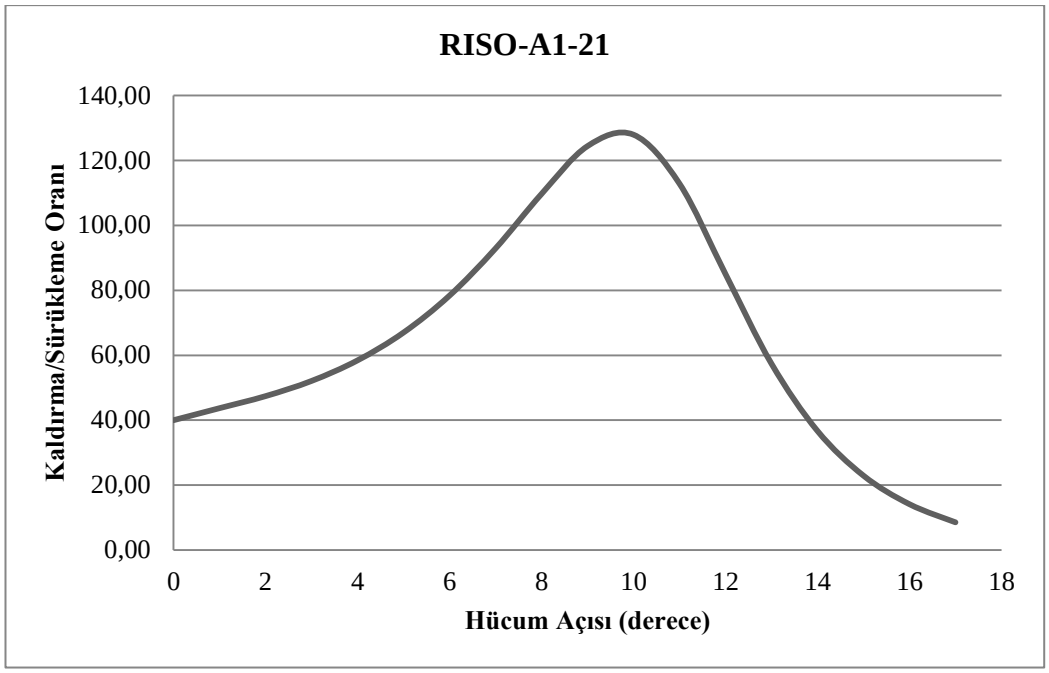
	RISO-A1-21	
	C_L	C_D
k_0	0,4	0,01
k_1	0,040868	-5,08E-18
k_2	0,025146	0,00076
k_3	-0,002033	-0,00015
k_4	3,38E-05	7,86E-06



Şekil Ek-2.32. RISO-A1-21 kaldırma katsayısı

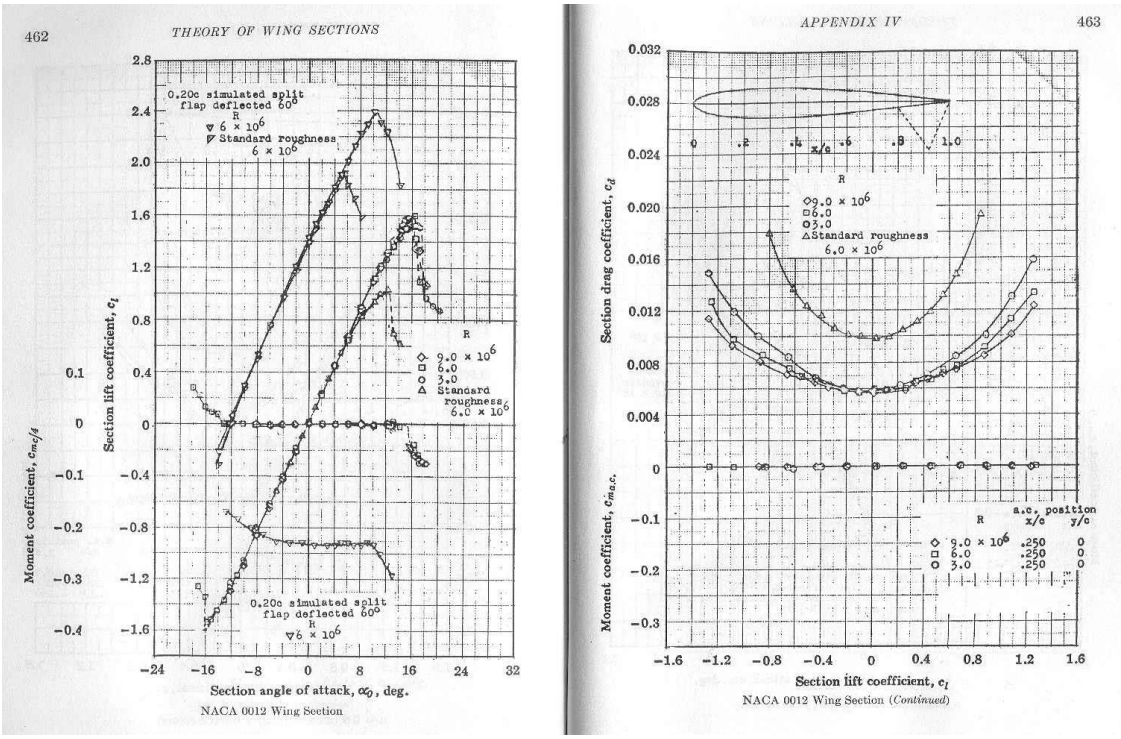


Şekil Ek-2.33. RISO-A1-21 sürükleme katsayısı



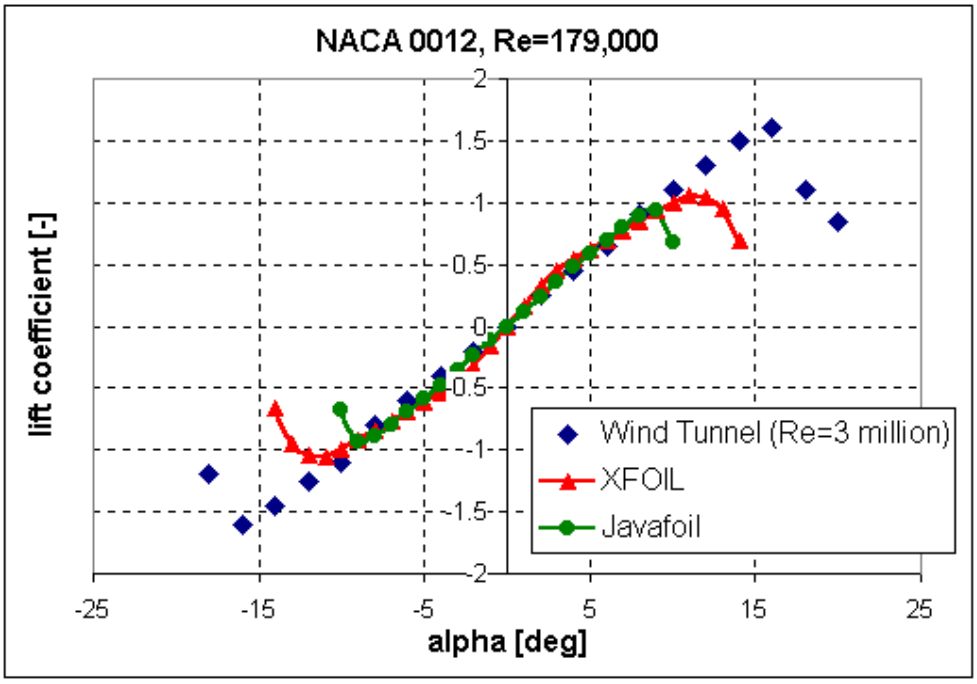
Şekil Ek-2.34. RISO-A1-21 kaldırma/sürükleme oranı

EK-2.8 NACA 0012

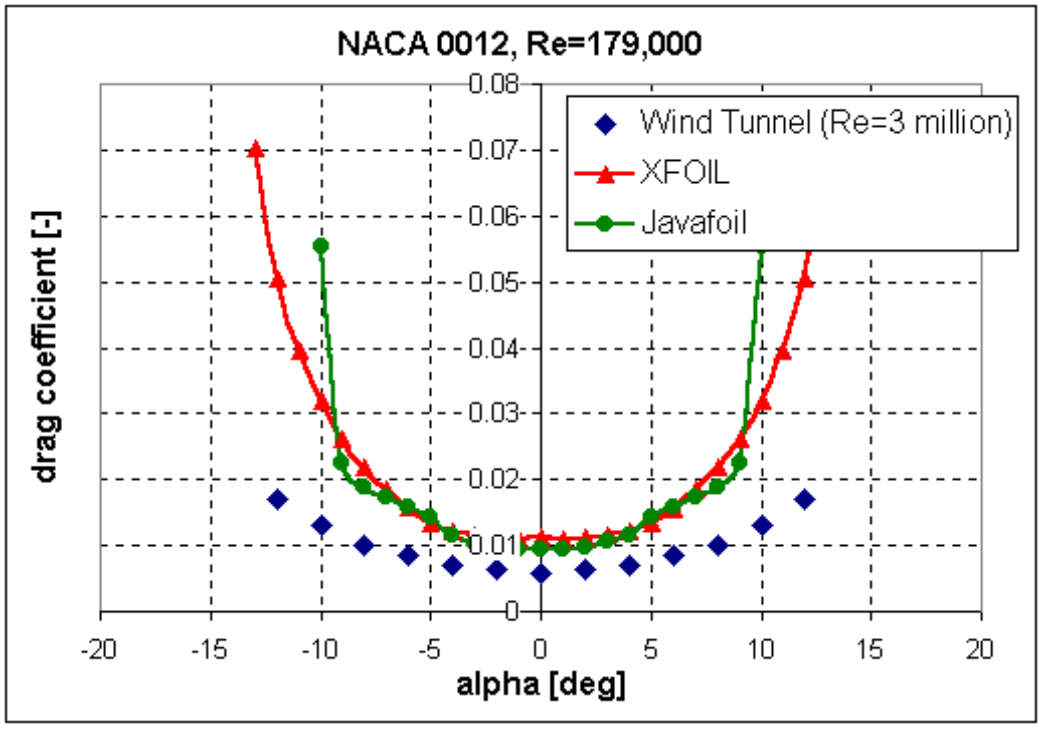


Şekil Ek-2. 35. NACA 0012 Kaldırma ve sürükleme katsayı grafikleri [1]

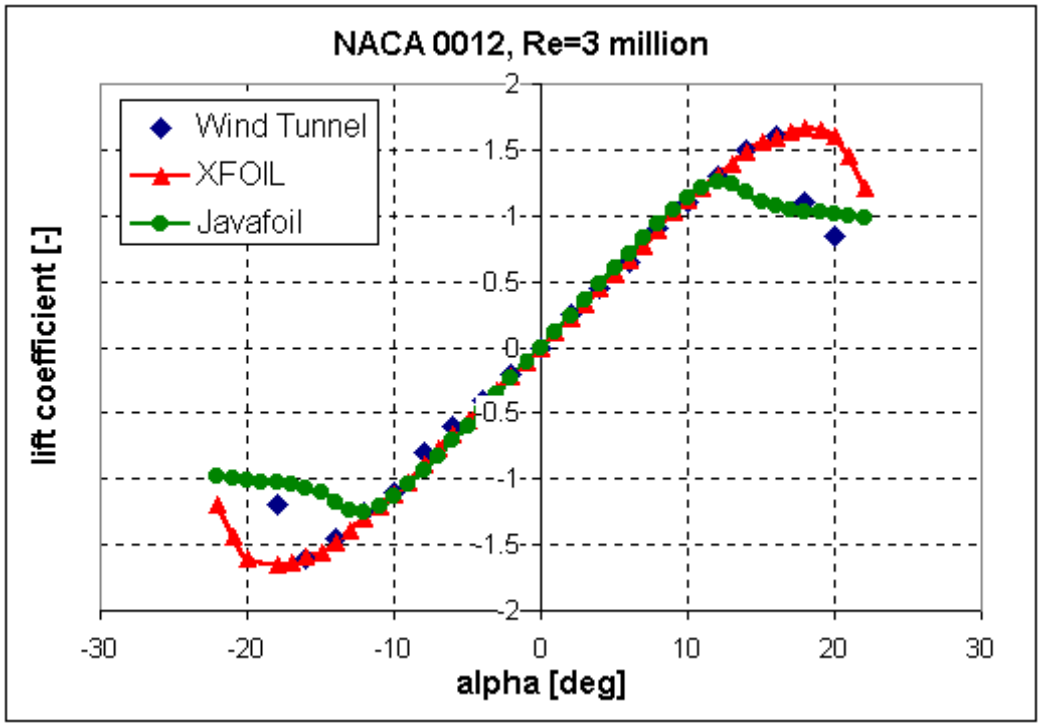
Kaynak 1: "Theory of Wing Sections, Including a Summary of Airfoil Data" by Ira H Abbott and Albert E. Von Doenhoff, 1959.



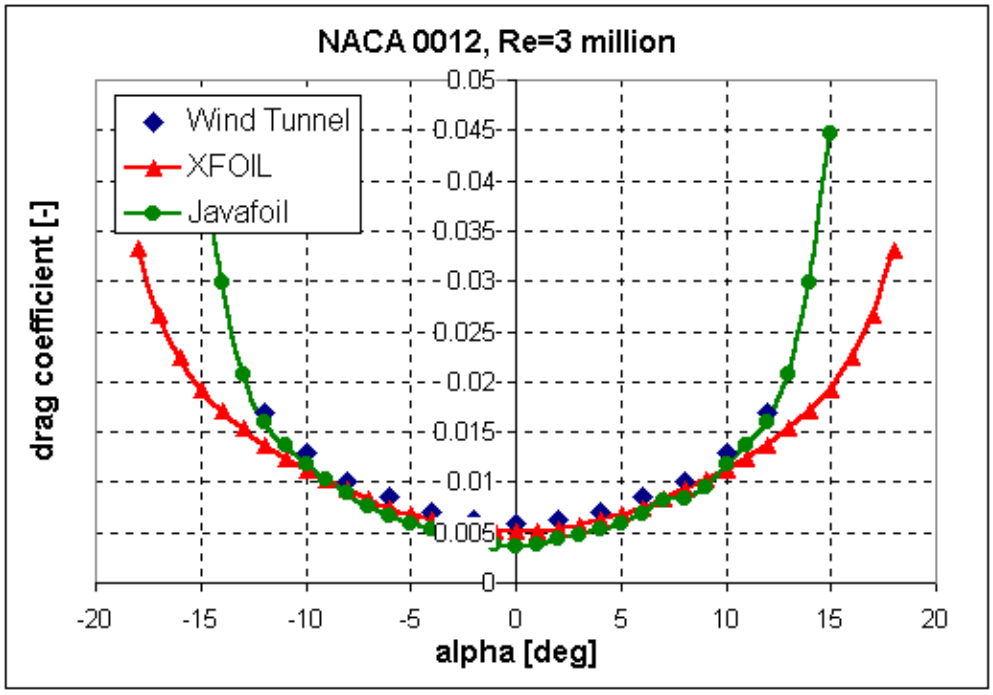
Şekil Ek-2.36. NACA 0012 Kaldırma katsayı grafikleri[7]



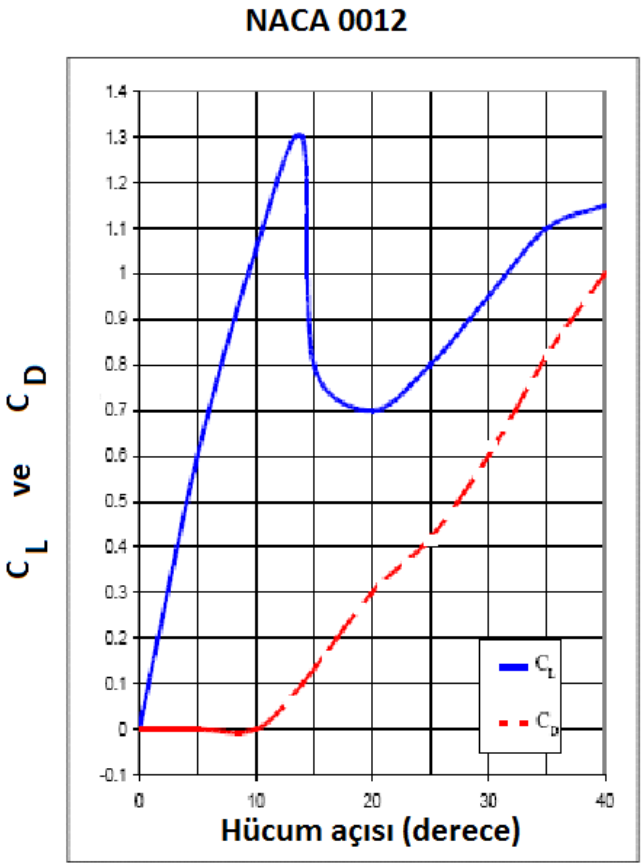
Şekil Ek-2.37. NACA 0012 Sürükleme katsayı grafiği[7]



Şekil Ek-2.38. NACA 0012 Kaldırma katsayı grafiği[7]

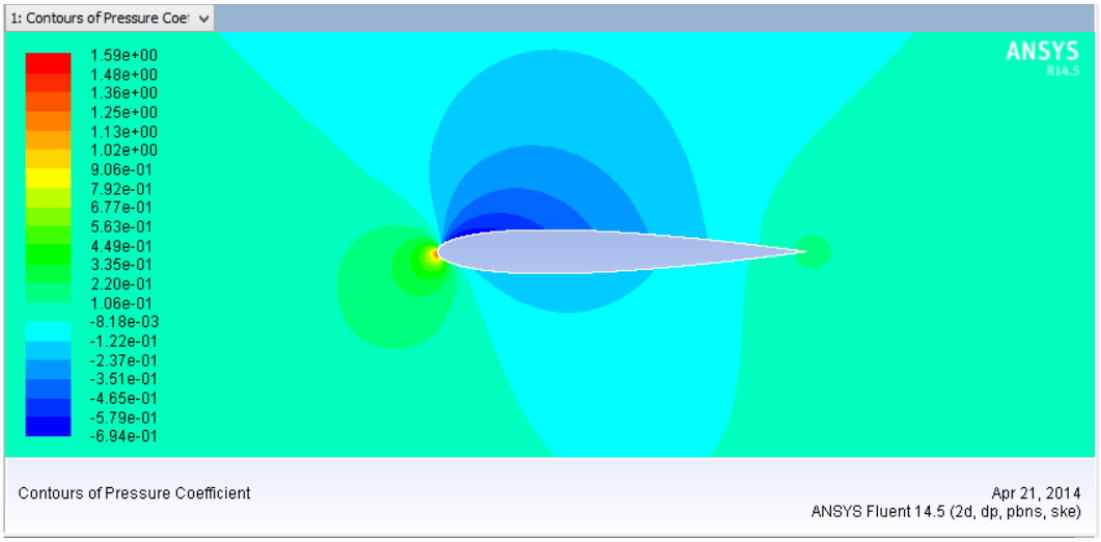


Şekil Ek-2.39.NACA 0012 Sürükleme katsayı grafiği[7]

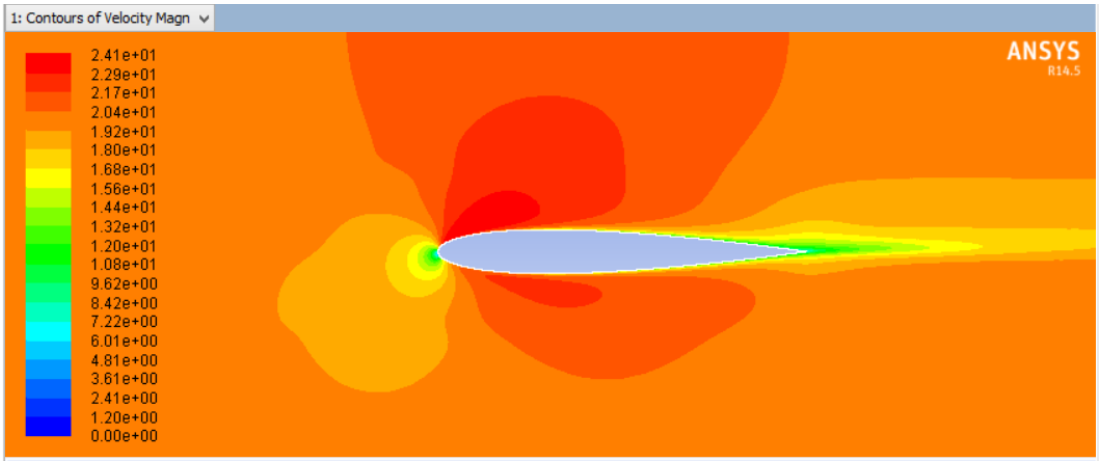


Şekil Ek-2.40. NACA 0012 kaldırma ve sürükleme katsayı grafikleri[8]

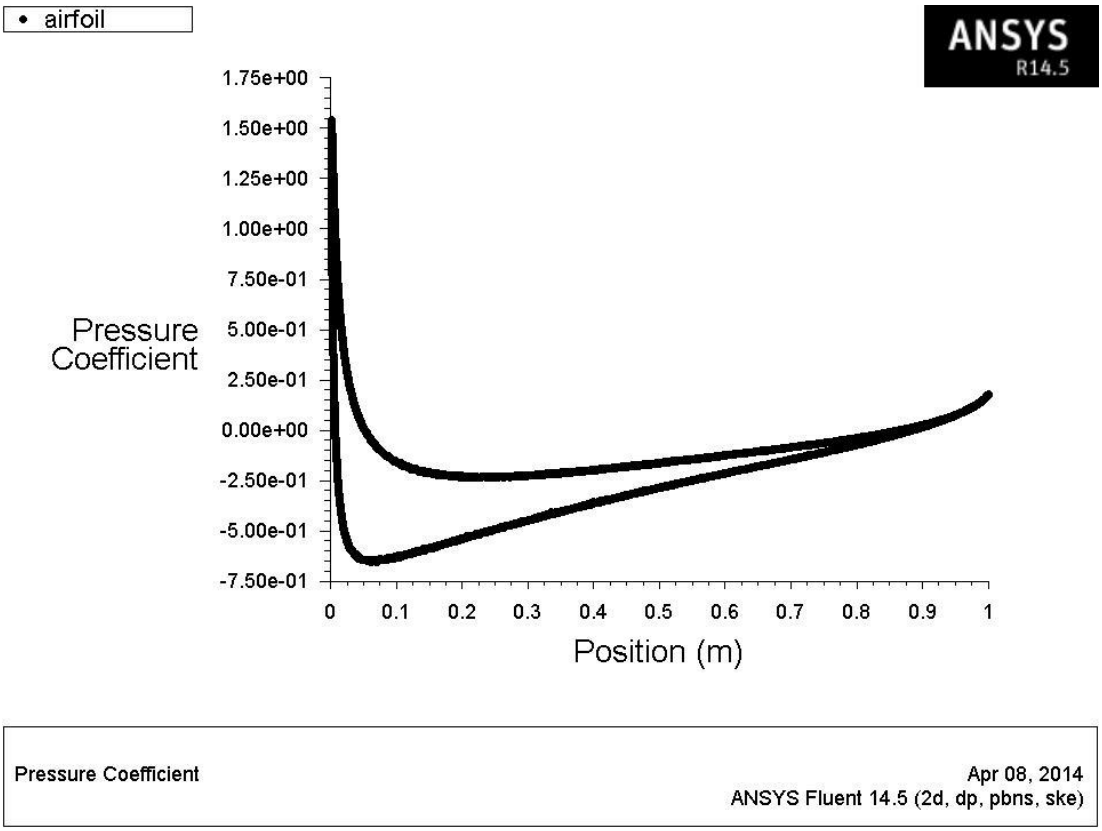
EK-3: HAD Sonuçları



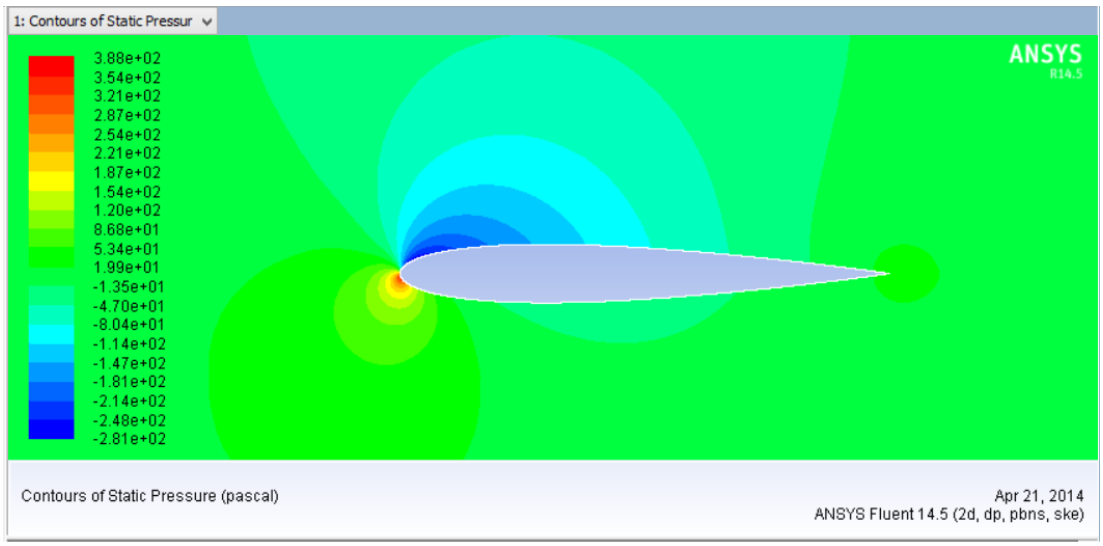
Şekil Ek-3.1.NACA 0012 (Hücum açısı: 4 derece)



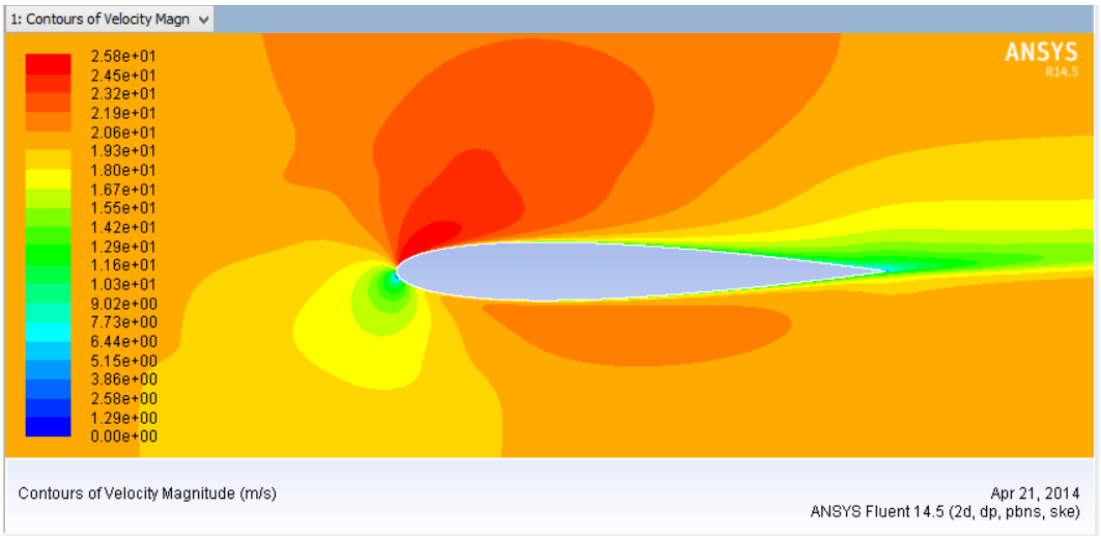
Şekil Ek-3.2.NACA 0012 (Hücum açısı: 4 derece)



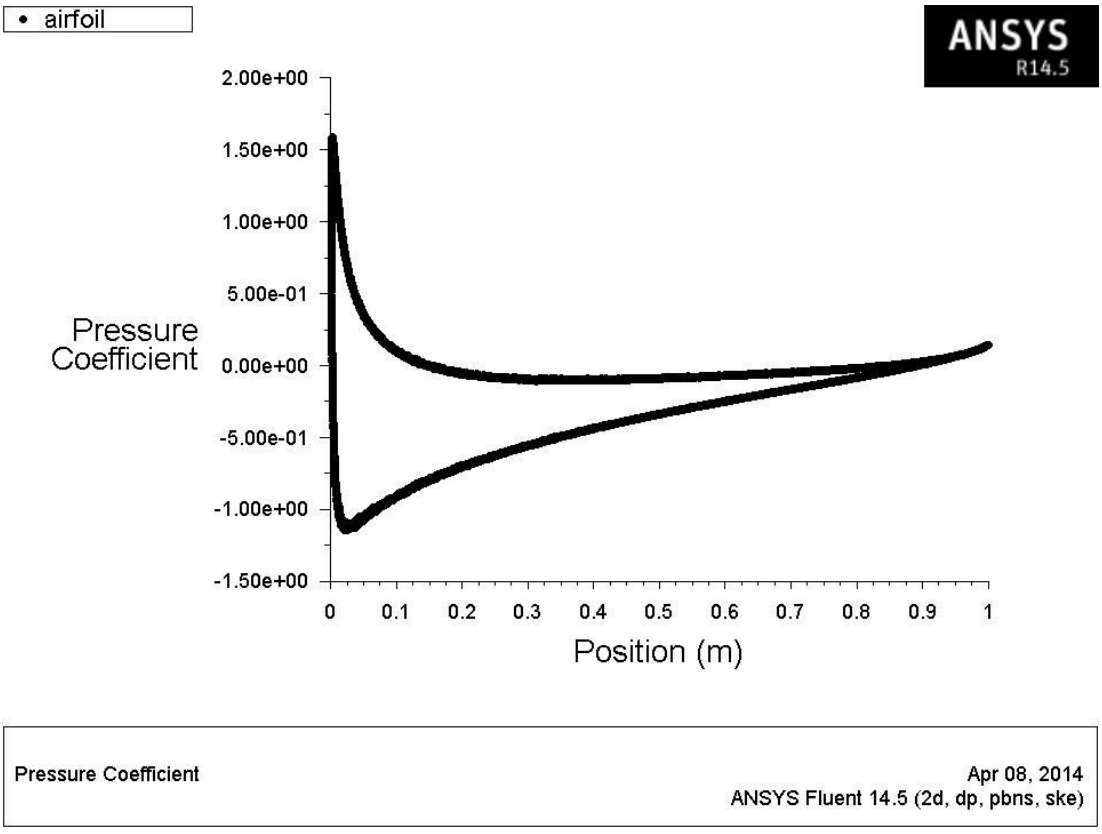
Şekil Ek-3.3.NACA 0012 (Hücum açısı: 4 derece)



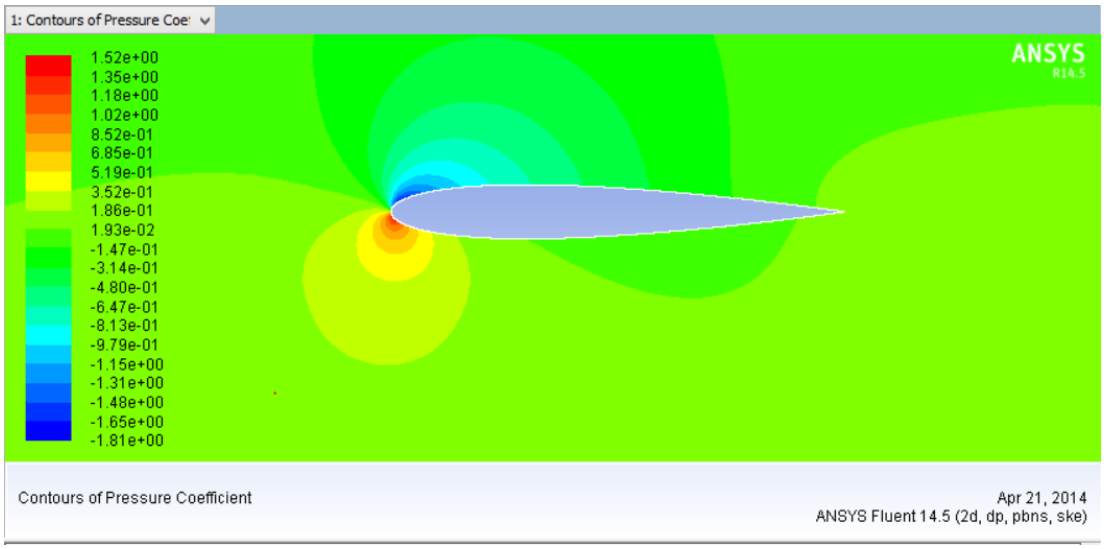
Şekil Ek-3.4.NACA 0012 (Hücum açısı: 8 derece)



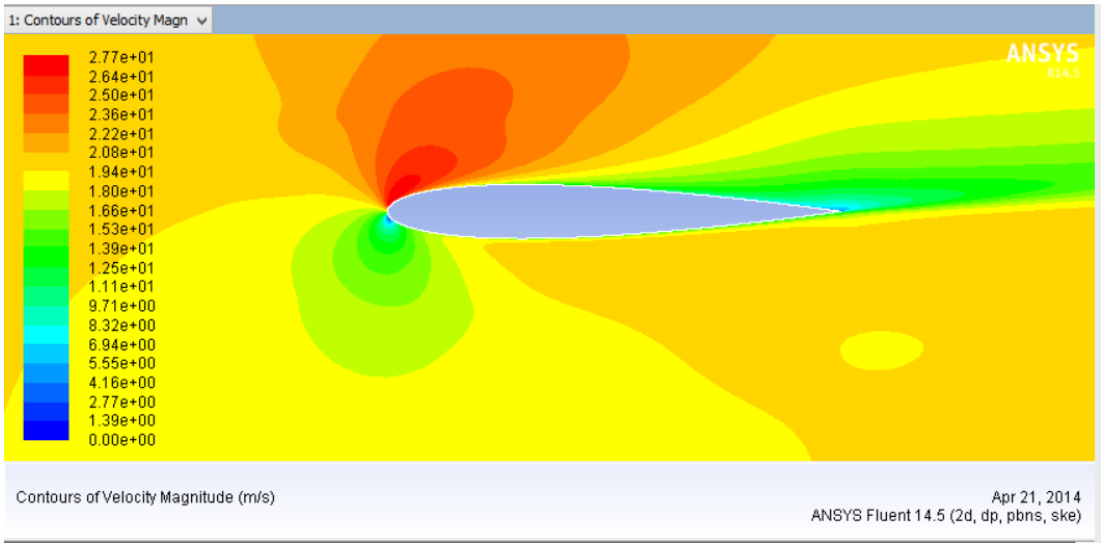
Şekil Ek-3.5.NACA 0012 (Hücum açısı: 8 derece)



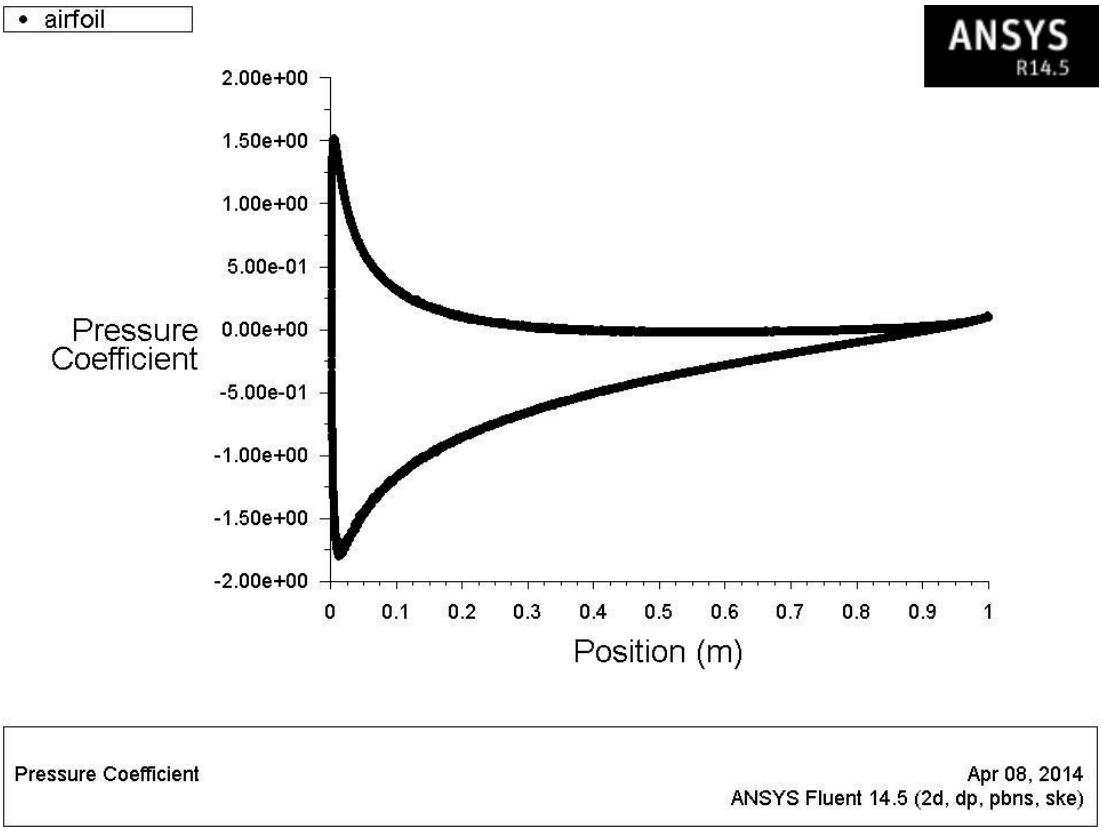
Şekil Ek-3.6.NACA 0012 (Hücum açısı: 8 derece)



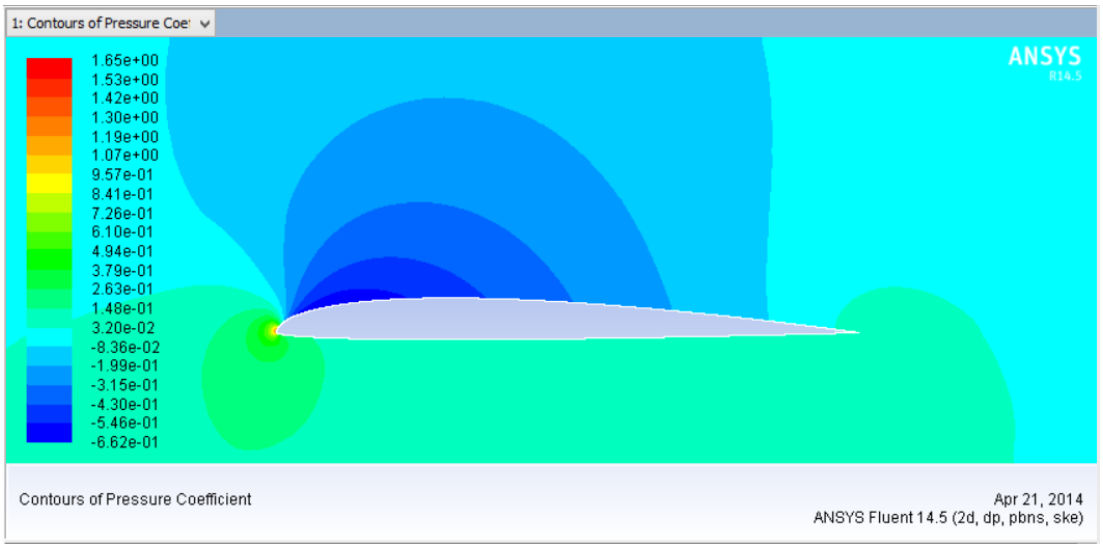
Şekil Ek-3.7.NACA 0012 (Hücum açısı: 12 derece)



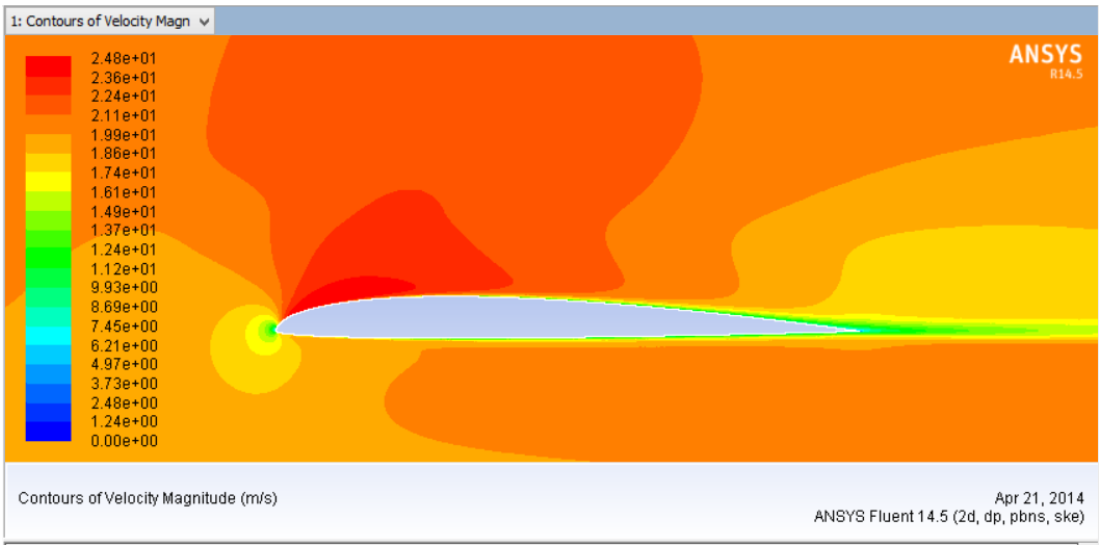
Şekil Ek-3.8.NACA 0012 (Hücum açısı: 12 derece)



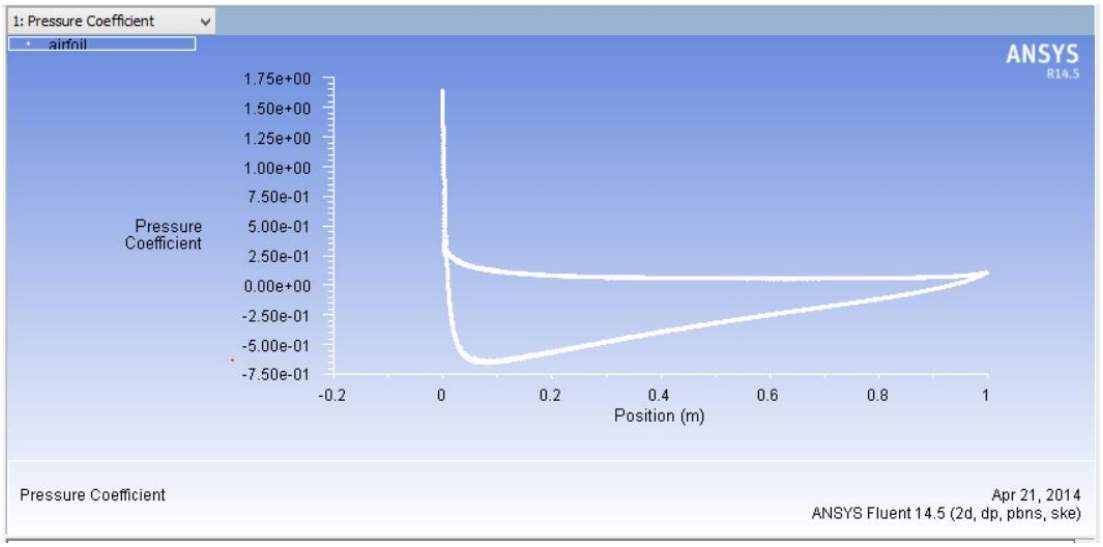
Şekil Ek-3.9.NACA 0012 (Hücum açısı: 12 derece)



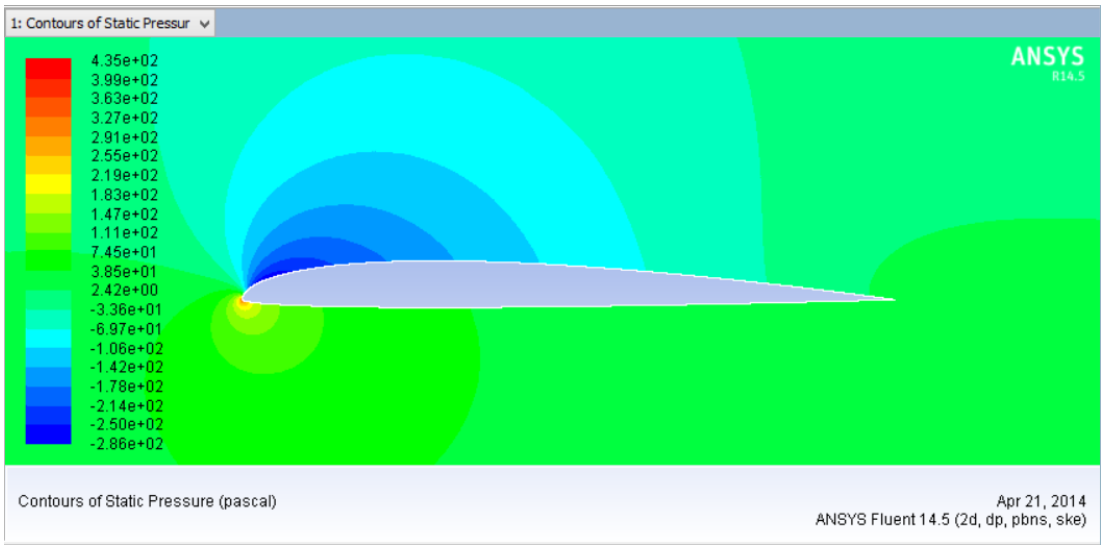
Şekil Ek-3.10.MB 01 (Hücum açısı: 4 derece)



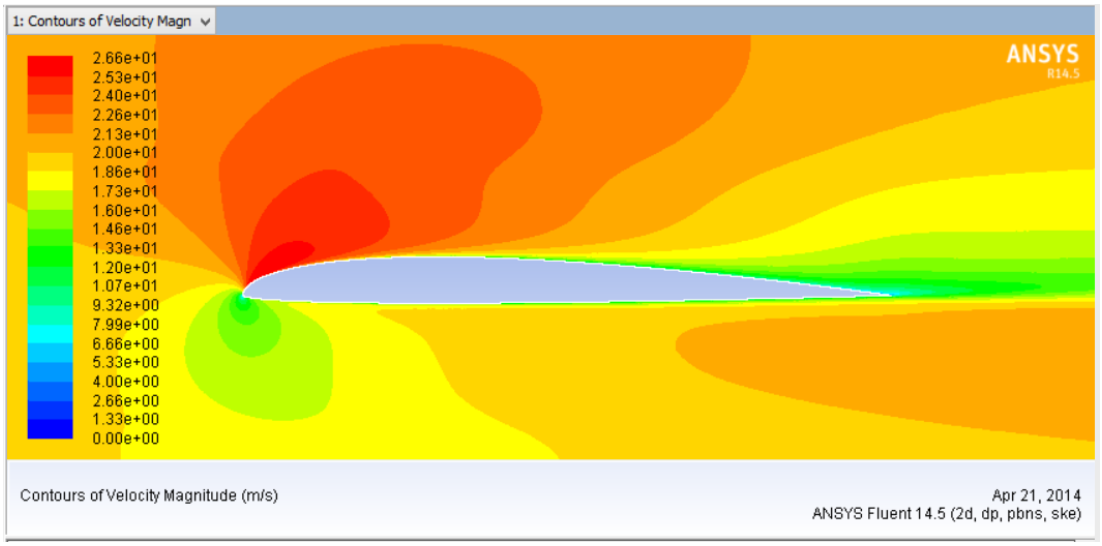
Şekil Ek-3.11. MB 01 (Hücum açısı: 4 derece)



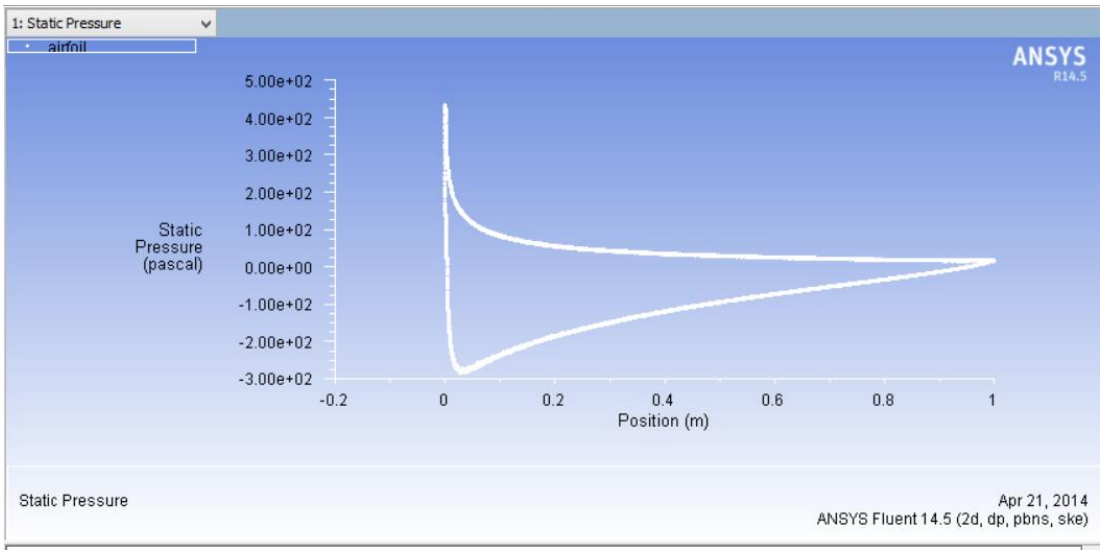
Şekil Ek-3.12.MB 01 (Hücum açısı: 4 derece)



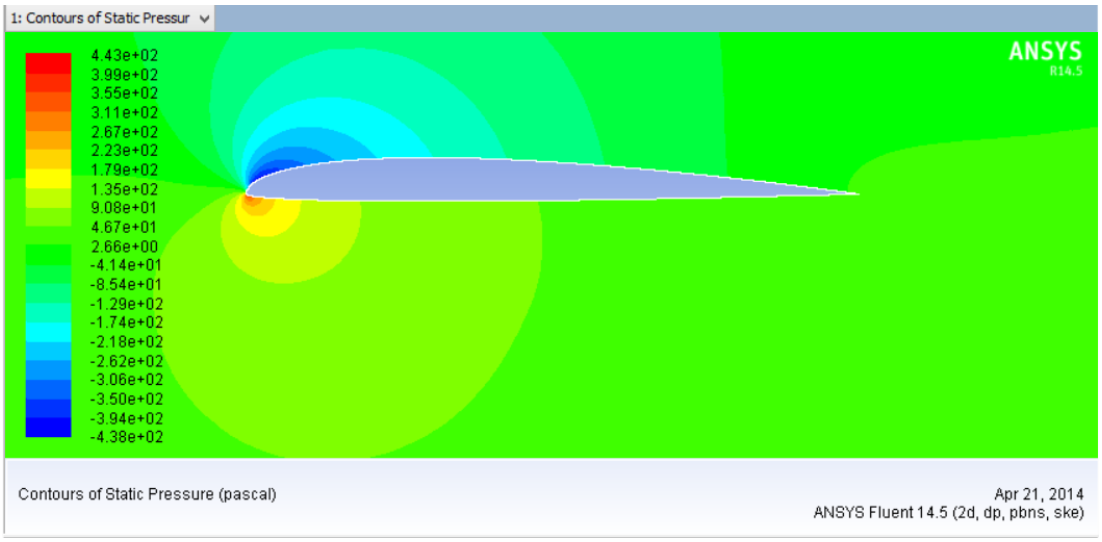
Şekil Ek-3.13.MB 01 (Hücum açısı: 8 derece)



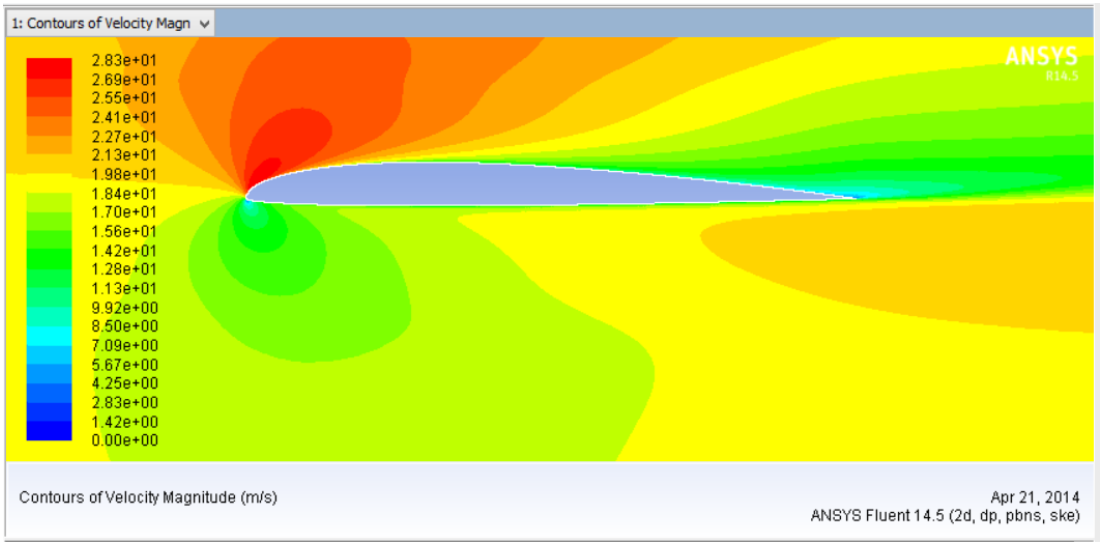
Şekil Ek-3.14.MB 01 (Hücum açısı: 8 derece)



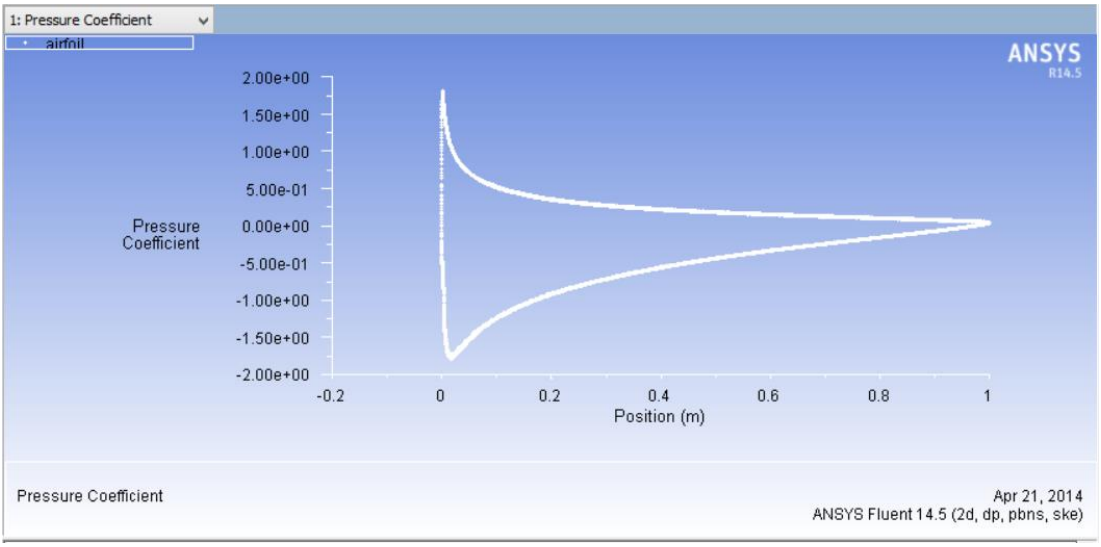
Şekil Ek-3.15.MB 01 (Hücum açısı: 8 derece)



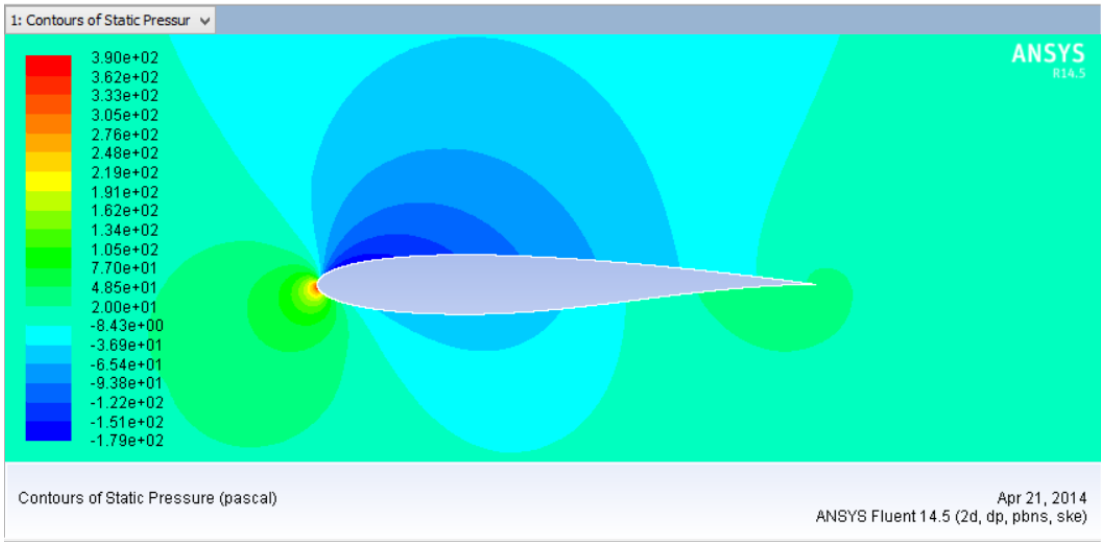
Şekil Ek-3.16.MB 01 (Hücum açısı: 12 derece)



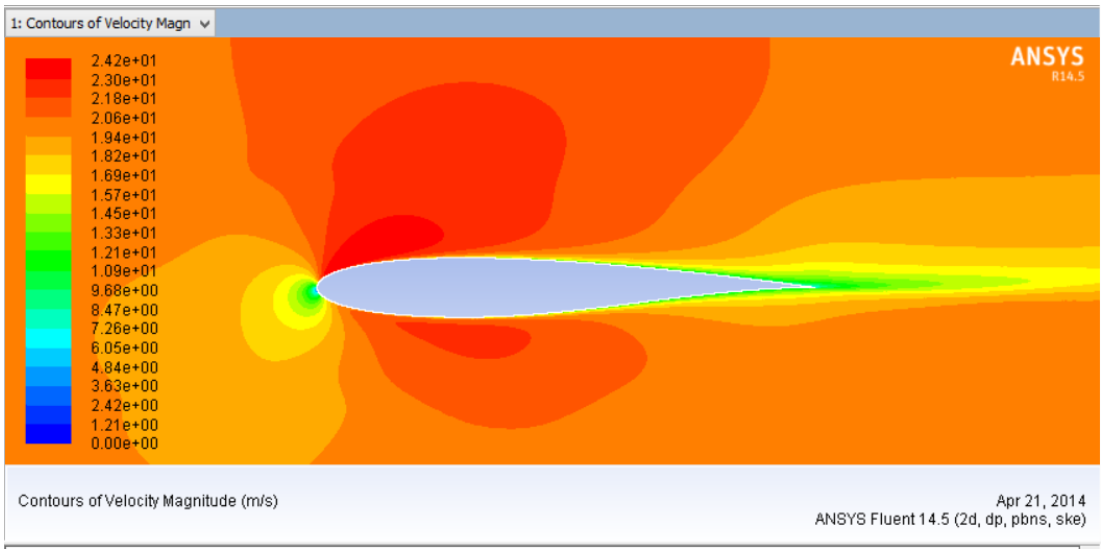
Şekil Ek-3.17.MB 01 (Hücum açısı: 12 derece)



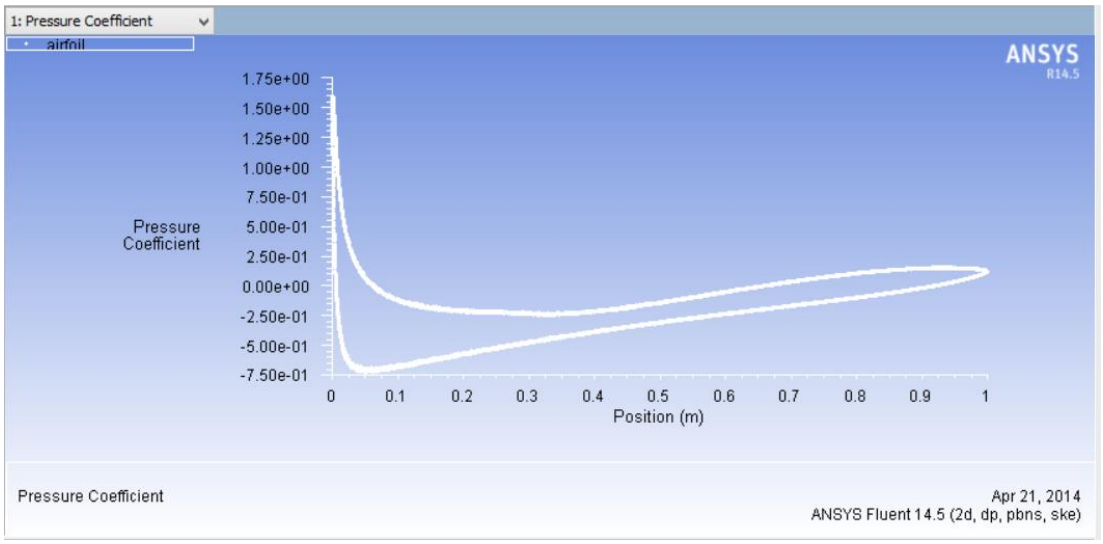
Şekil Ek-3.18. MB 01 (Hücum açısı: 12 derece)



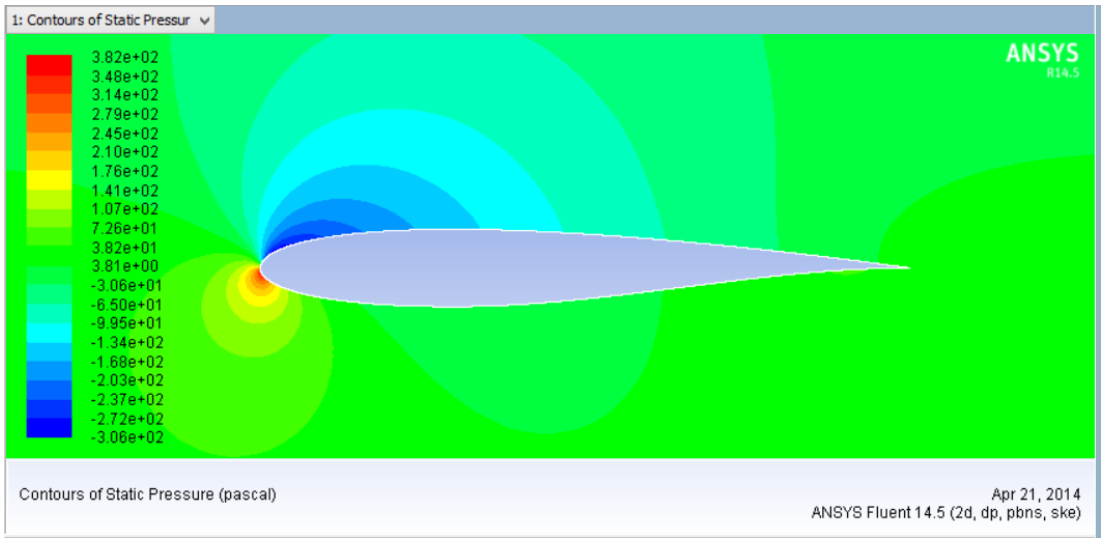
Şekil Ek-3.19.MB 02 (Hücum açısı: 4 derece)



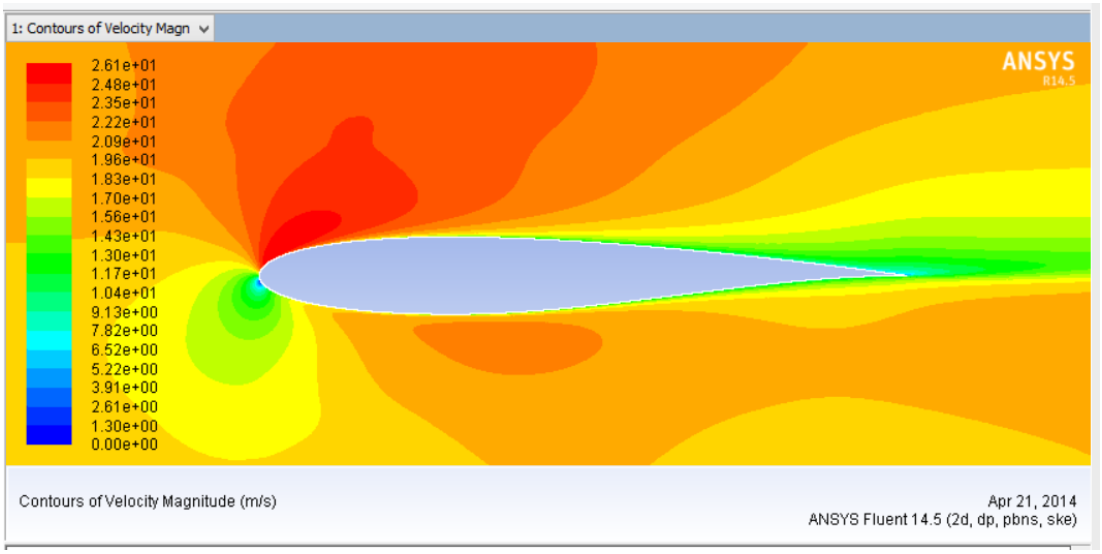
Şekil Ek-3.20.MB 02 (Hücum açısı: 4 derece)



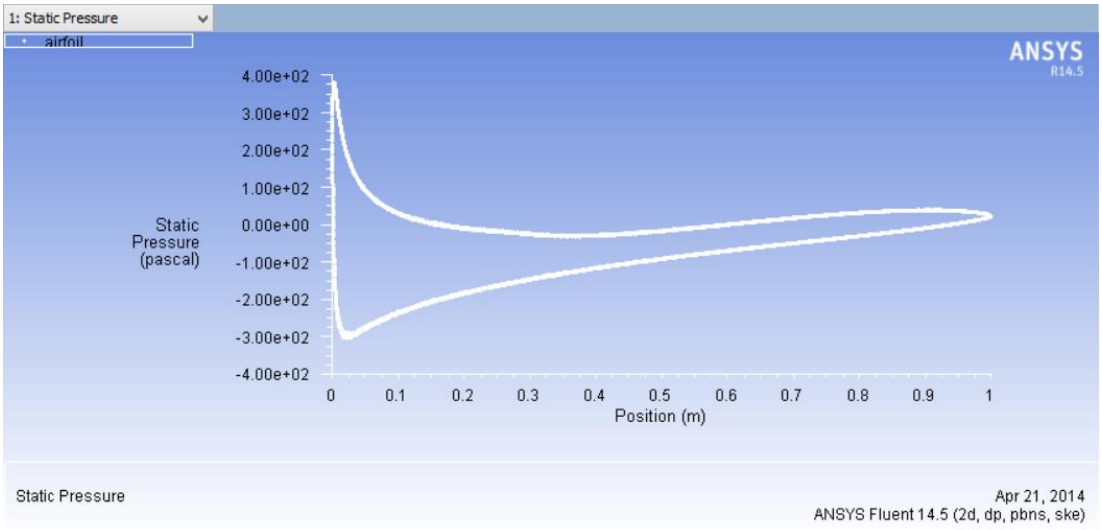
Şekil Ek-3.21.MB 02 (Hücum açısı: 4 derece)



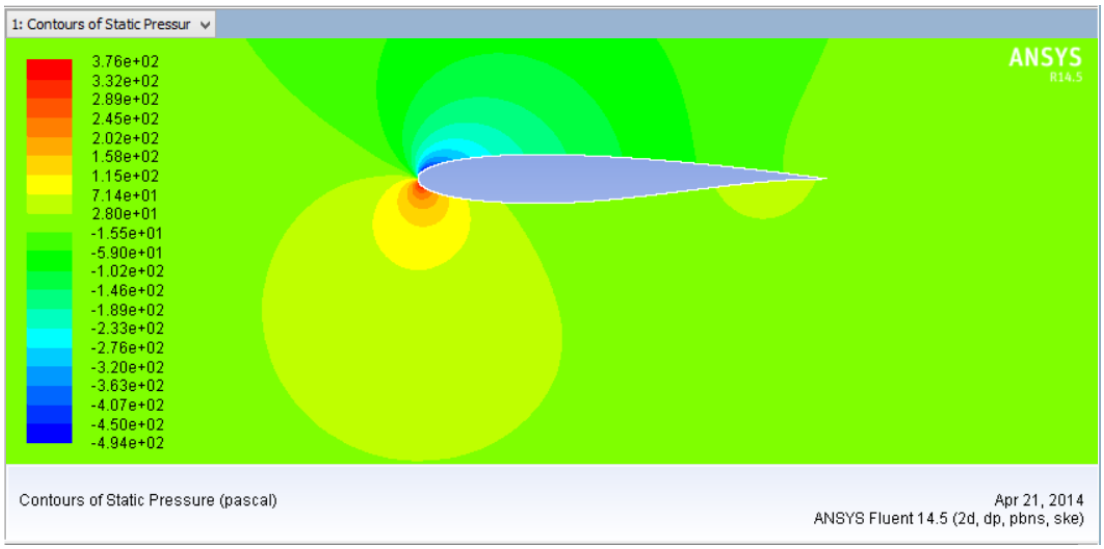
Şekil Ek-3.22.MB 02 (Hücum açısı: 8 derece)



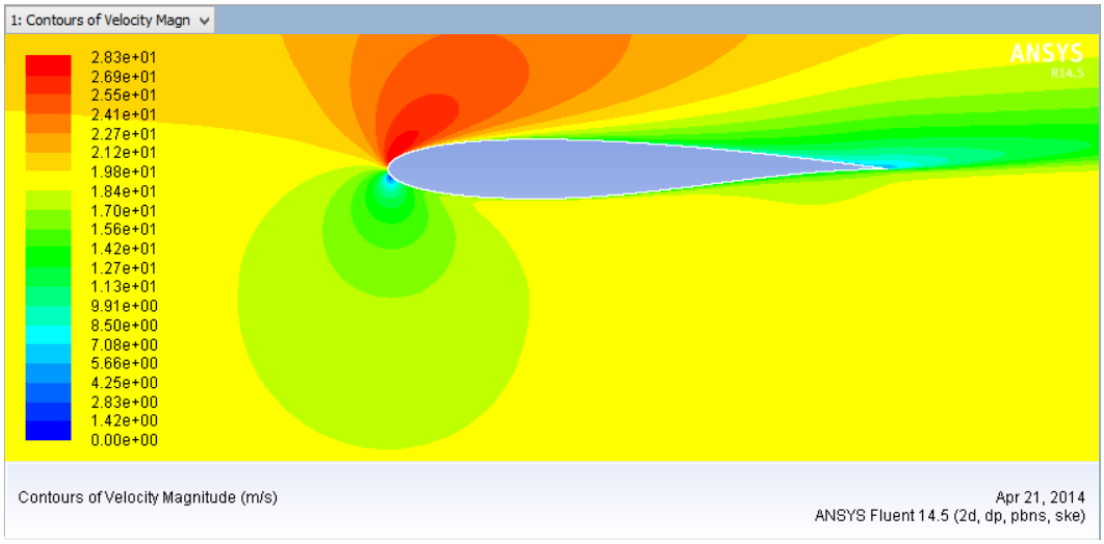
Şekil Ek-3.23.MB 02 (Hücum açısı: 8 derece)



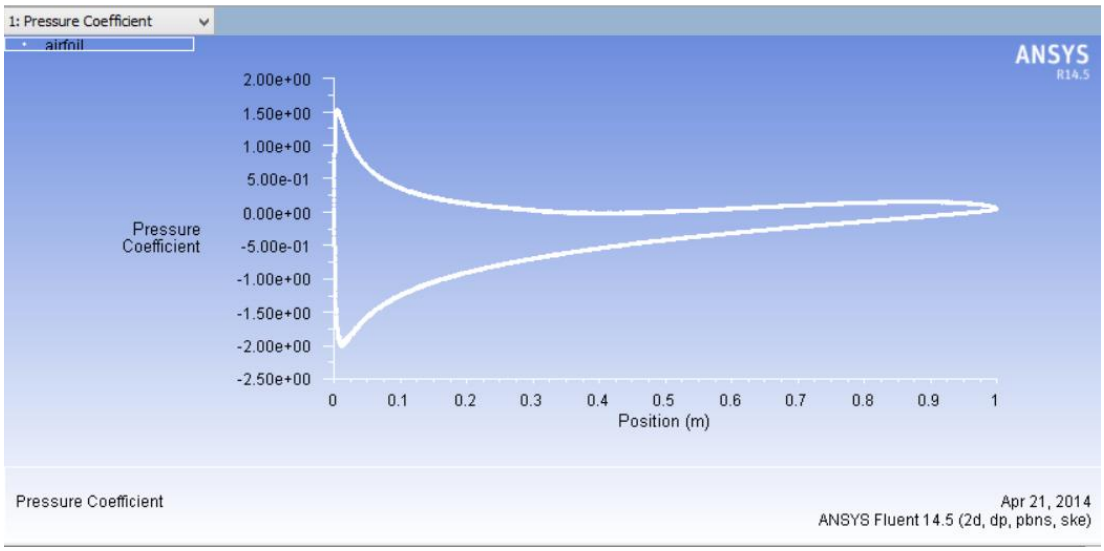
Şekil Ek-3.24.MB 02 (Hücum açısı: 8 derece)



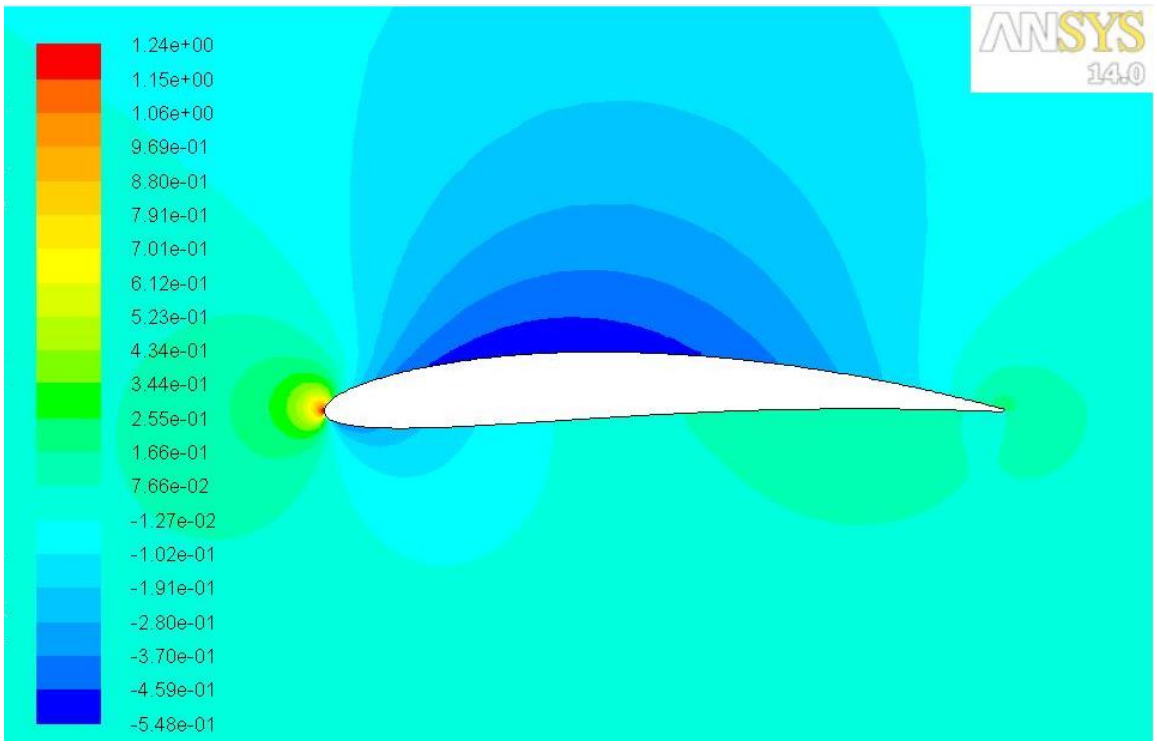
Şekil Ek-3.25.MB 02 (Hücum açısı: 12 derece)



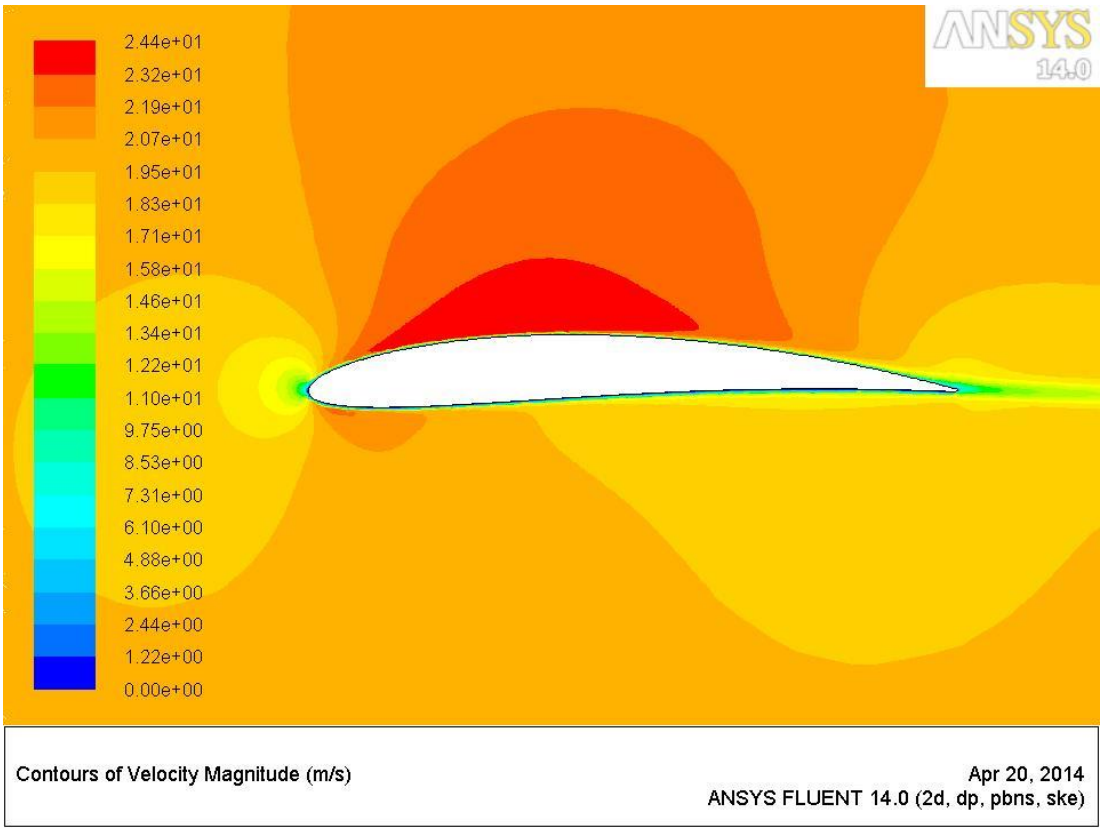
Şekil Ek-3.26.MB 02 (Hücum açısı: 12 derece)



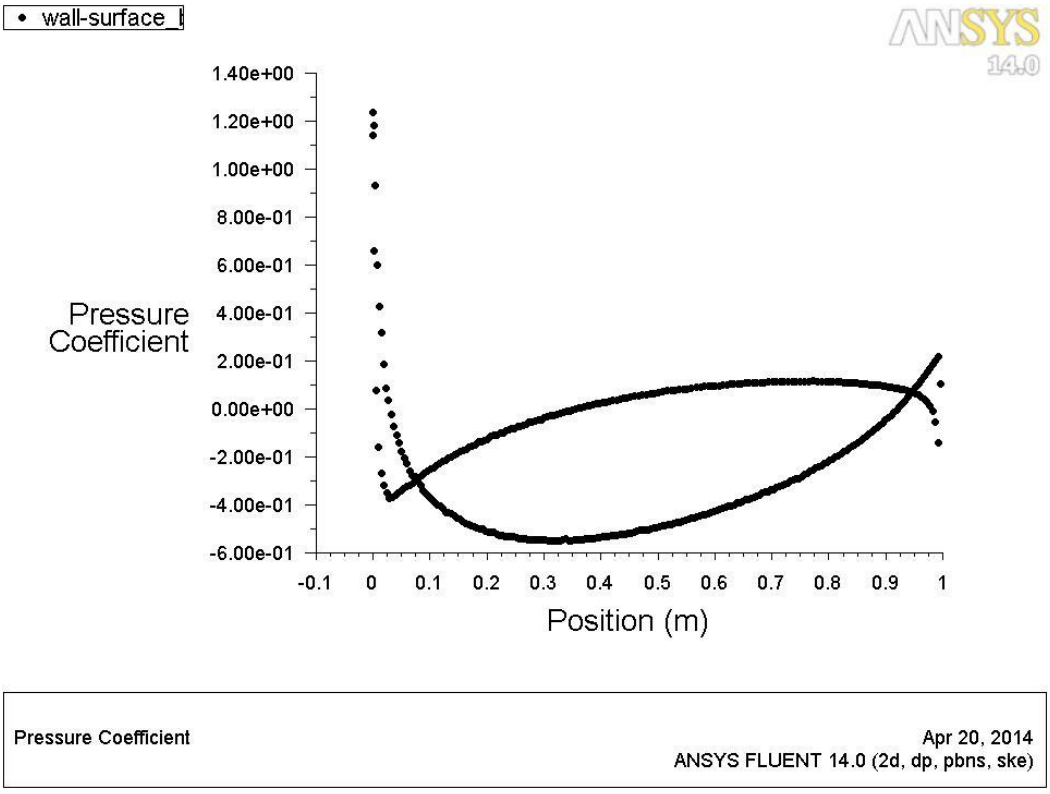
Şekil Ek-3.27.MB 02 (Hücum açısı: 12 derece)



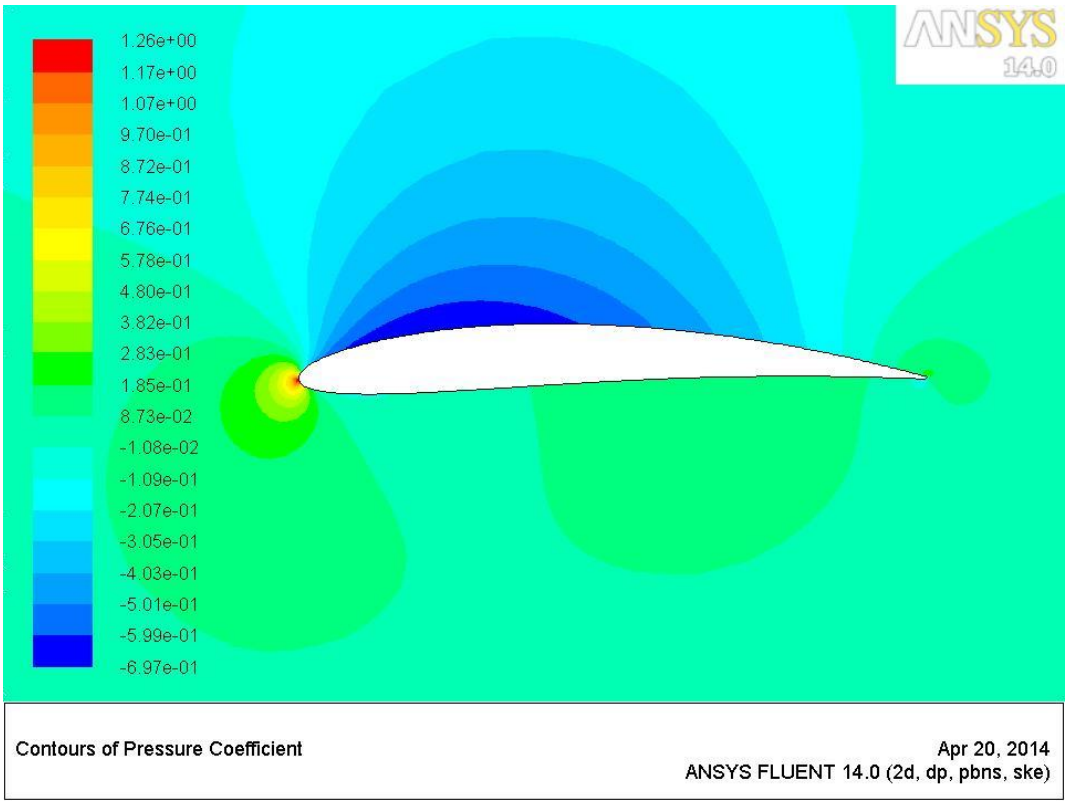
Şekil Ek-3.28.MB 03 (Hücum açısı: 0 derece)



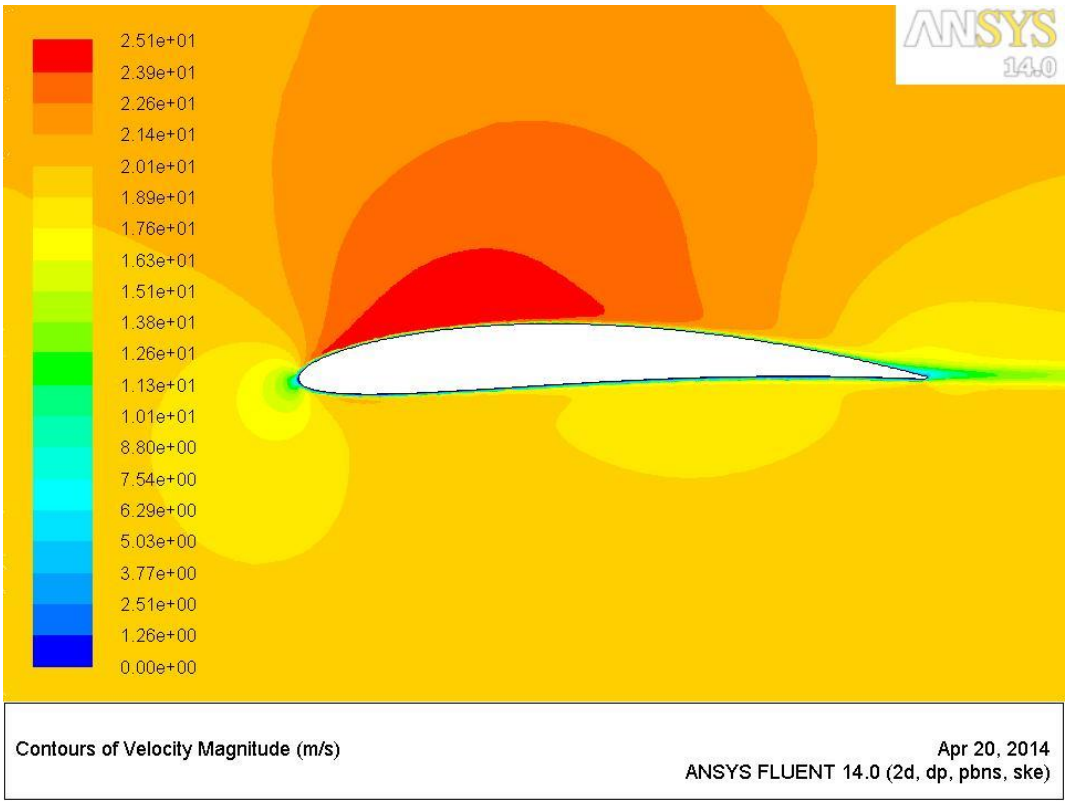
Şekil Ek-3.29.MB 03 (Hücum açısı: 0 derece)



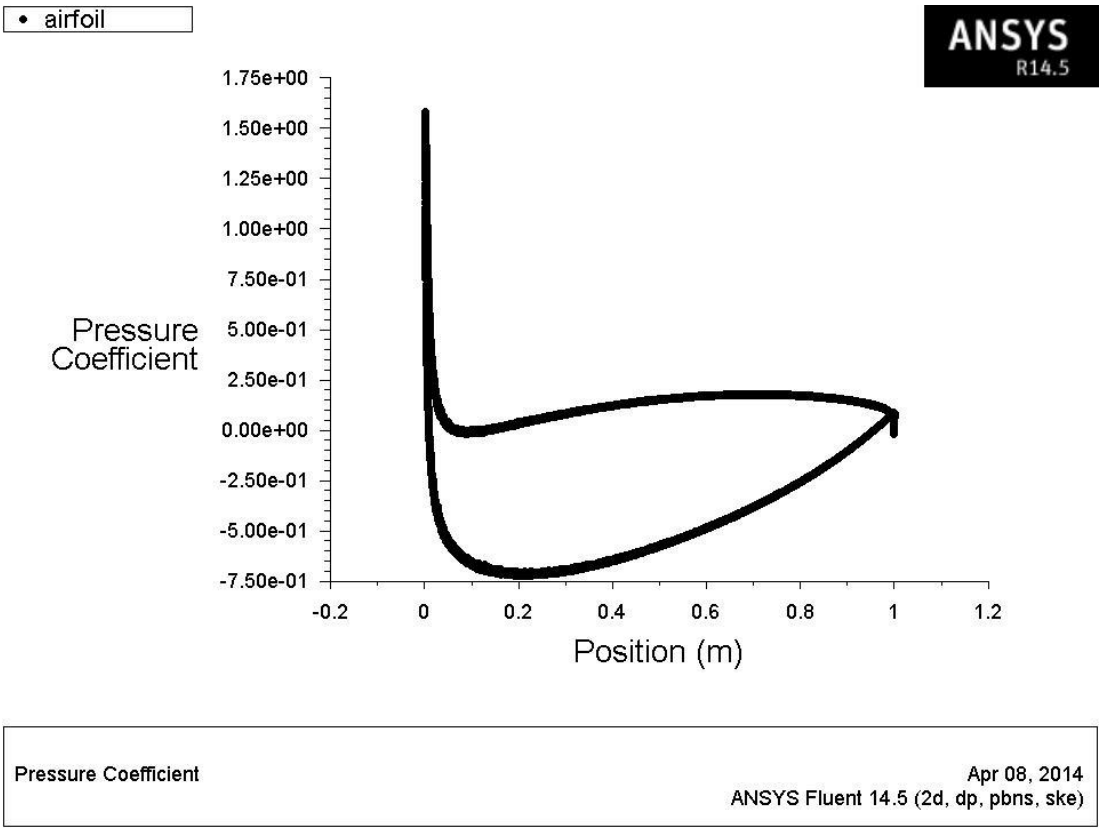
Şekil Ek-3.30.MB 03 (Hücum açısı: 0 derece)



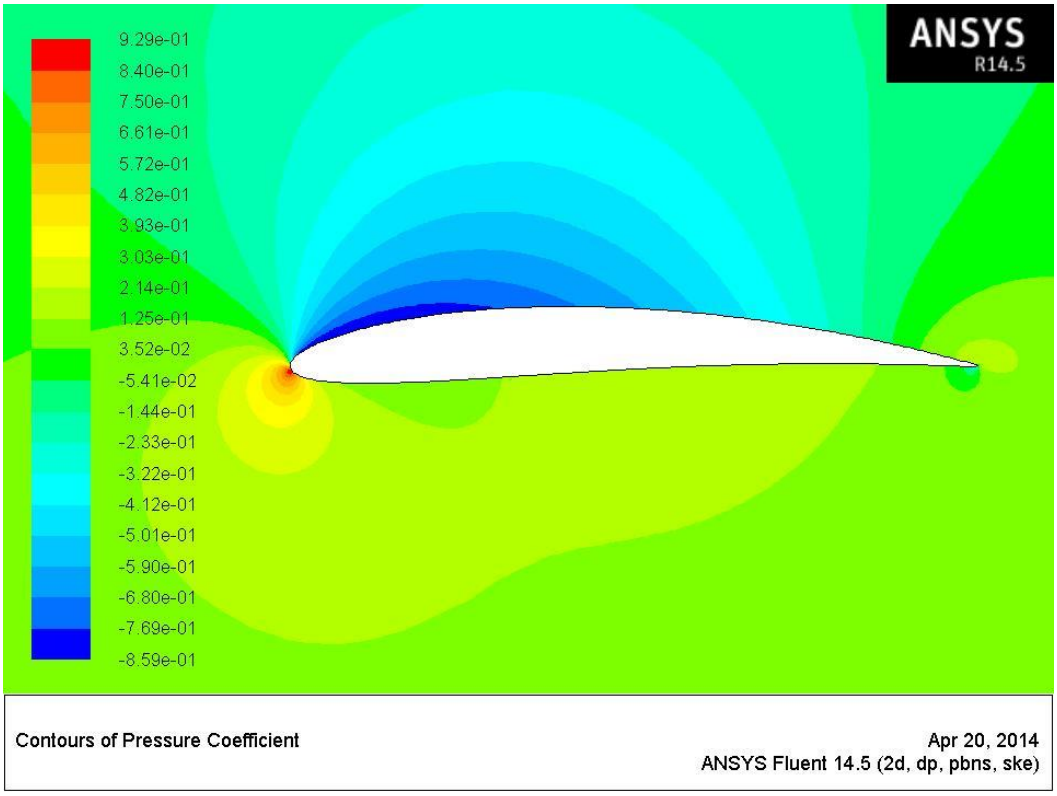
Şekil Ek-3.31.MB 03 (Hücum açısı: 4 derece)



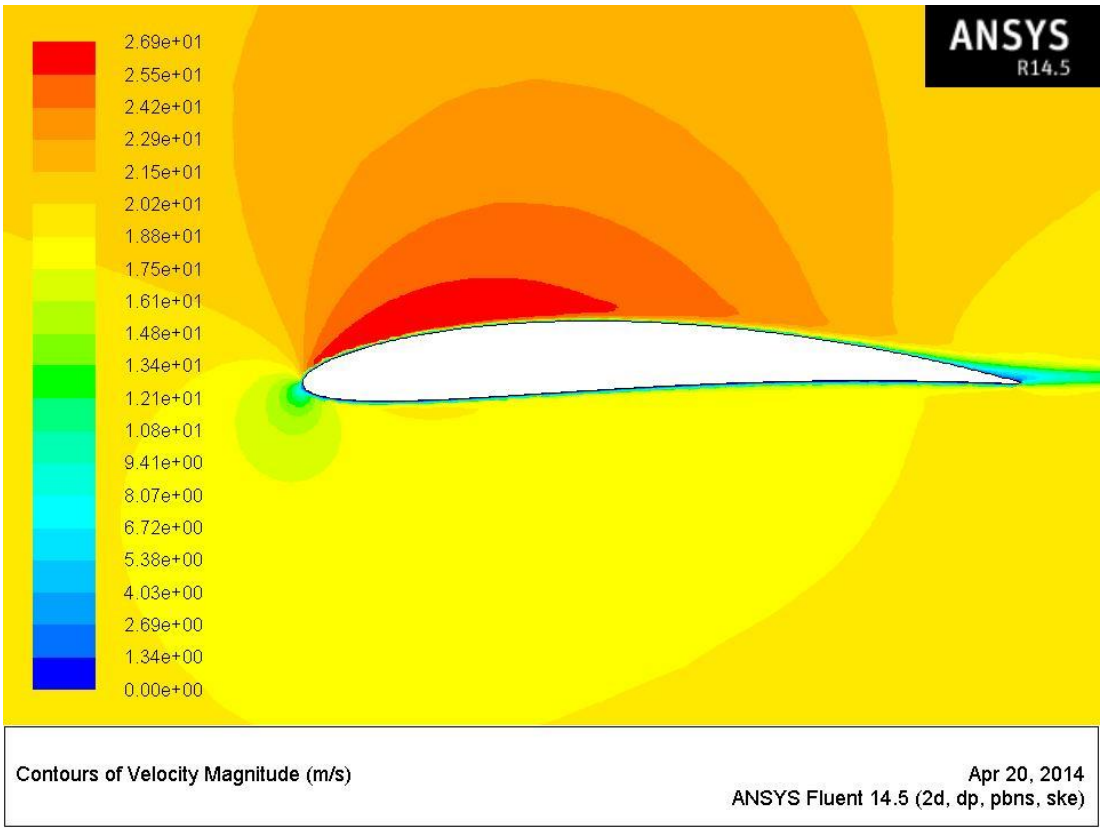
Şekil Ek-3.32.MB 03 (Hücum açısı: 4 derece)



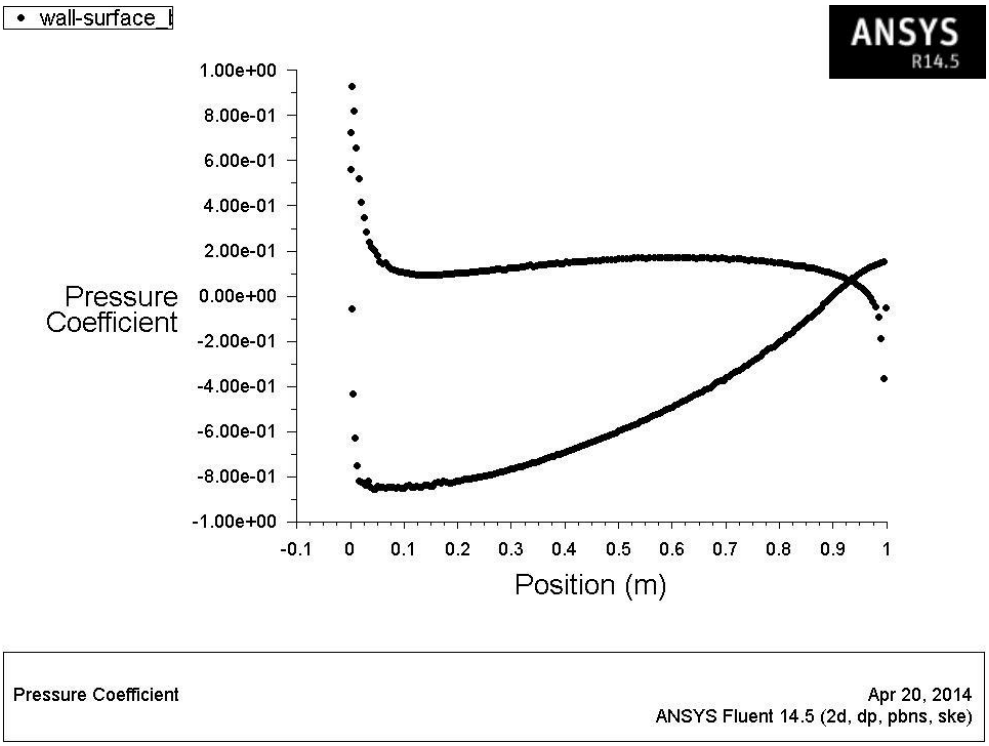
Şekil Ek-3.33.MB 03 (Hücum açısı: 4 derece)



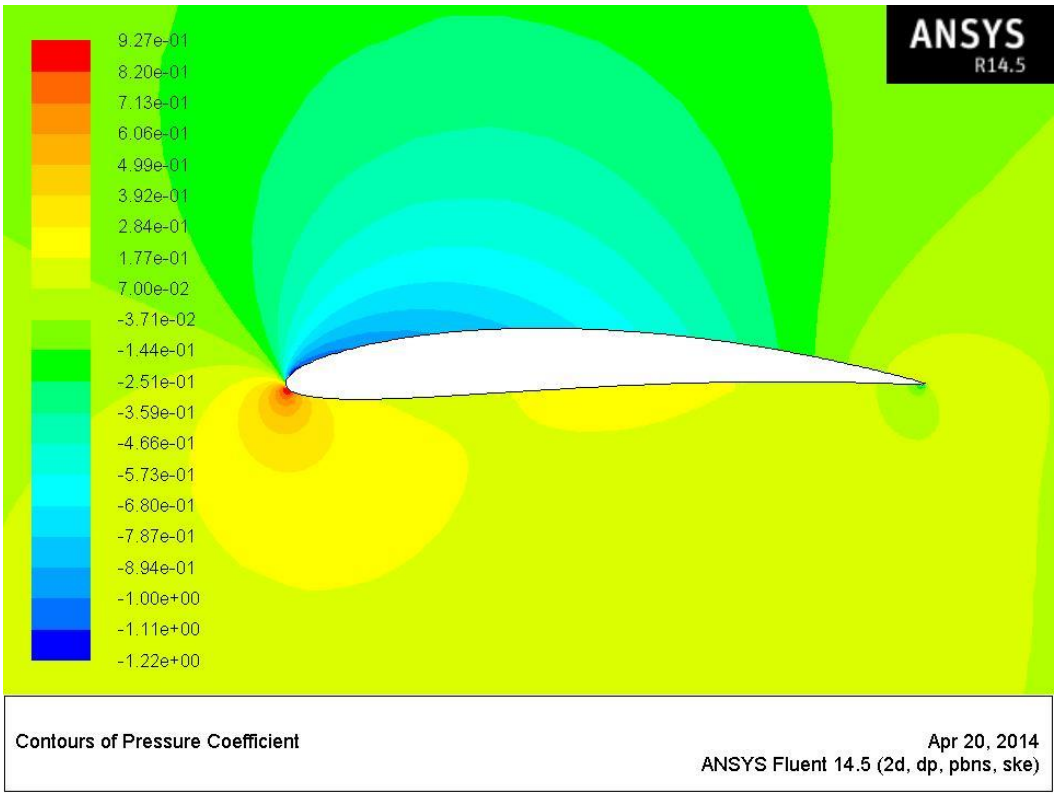
Şekil Ek-3.34.MB 03 (Hücum açısı: 6 derece)



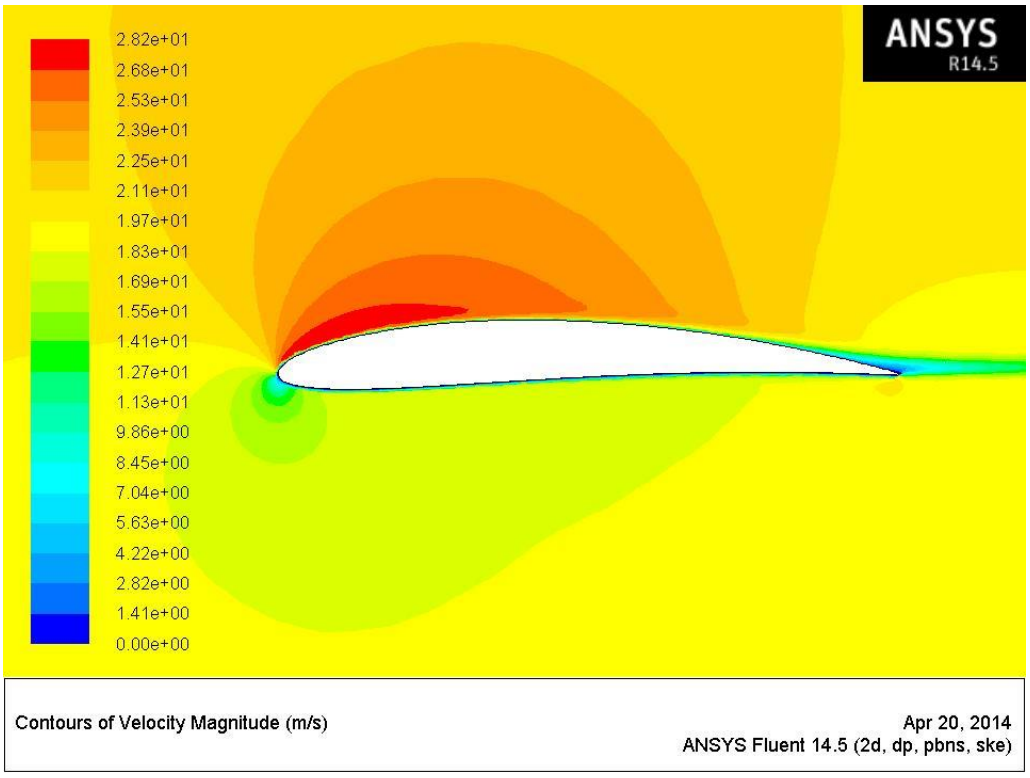
Şekil Ek-3.35. MB 03 (Hücum açısı: 6 derece)



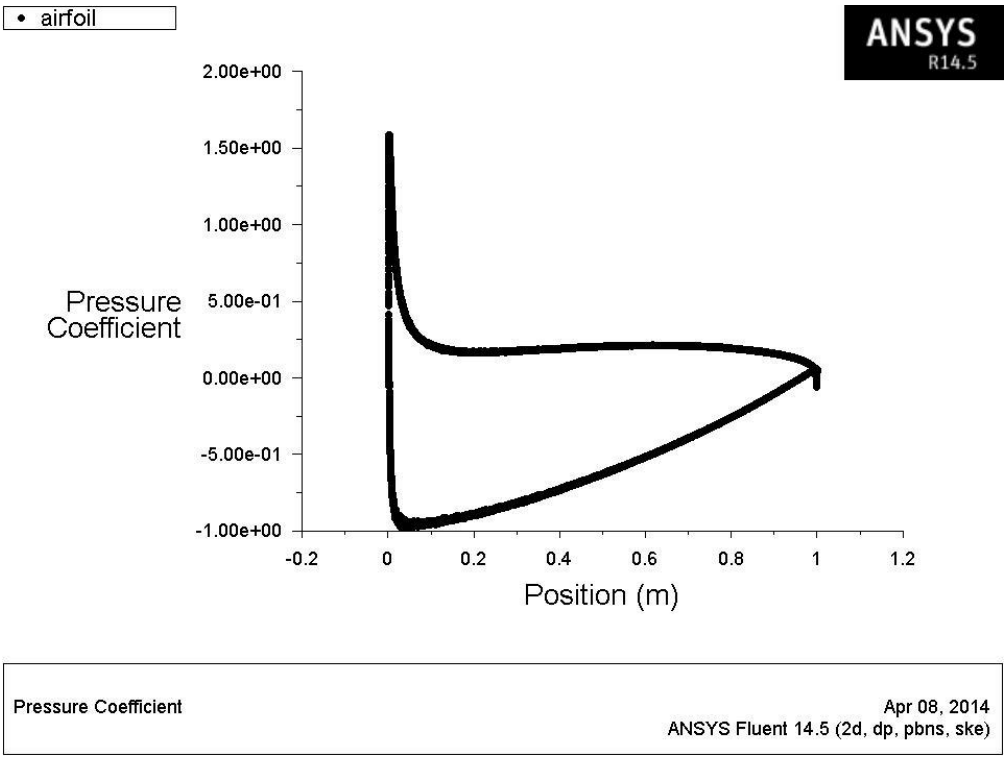
Şekil Ek-3.36.MB 03 (Hücum açısı: 6 derece)



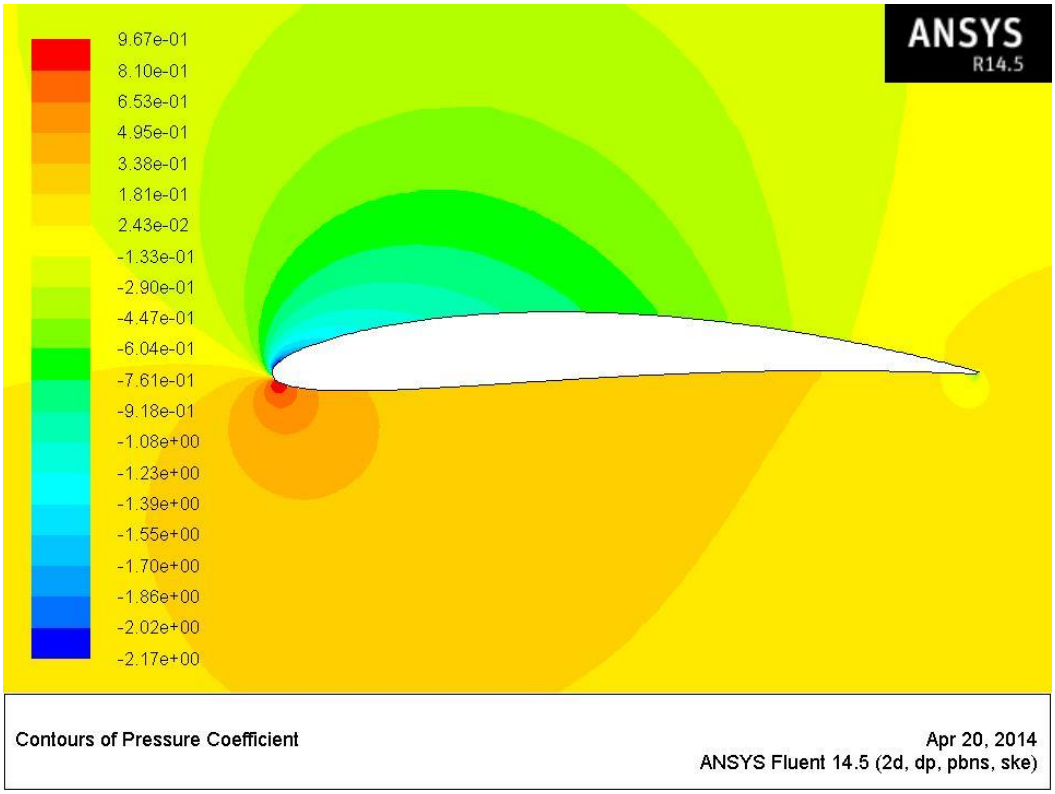
Şekil Ek-3.37. MB 03 (Hücum açısı: 8 derece)



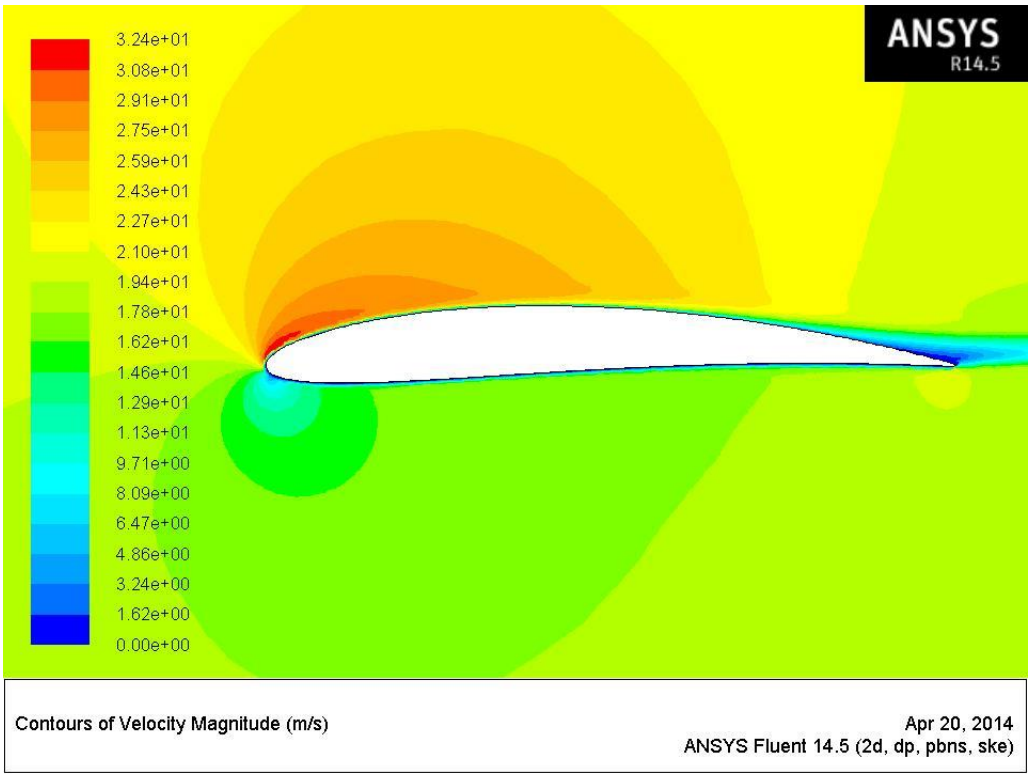
Şekil Ek-3.38. MB 03 (Hücum açısı: 8 derece)



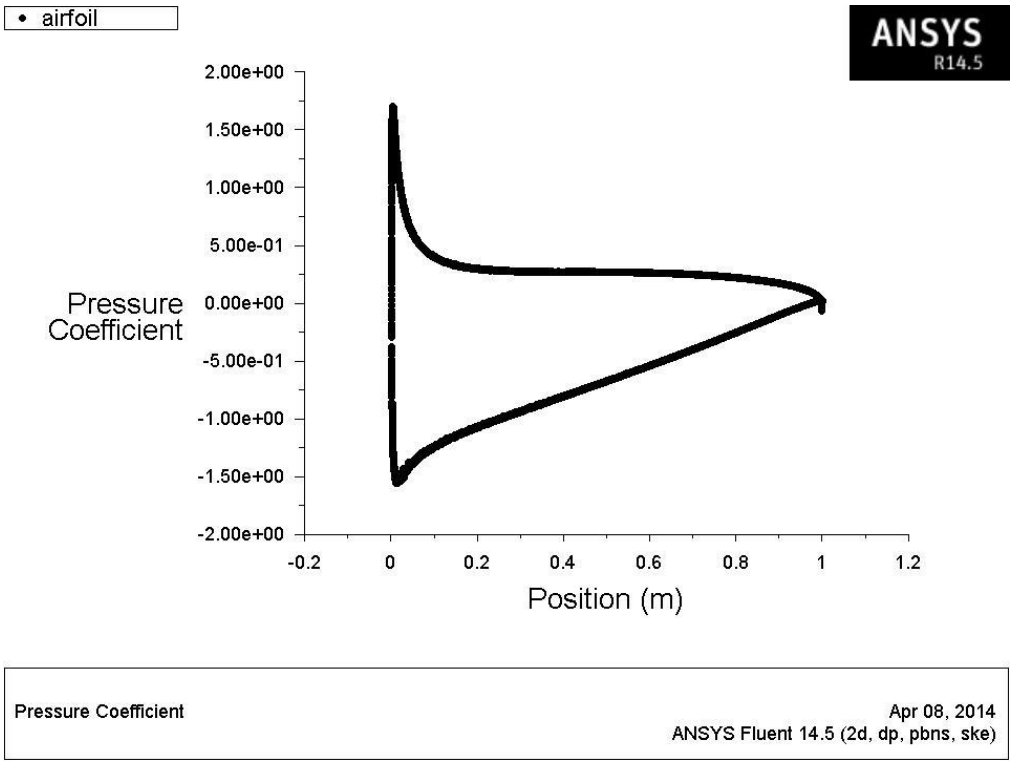
Şekil Ek-3.39.MB 03 (Hücum açısı: 8 derece)



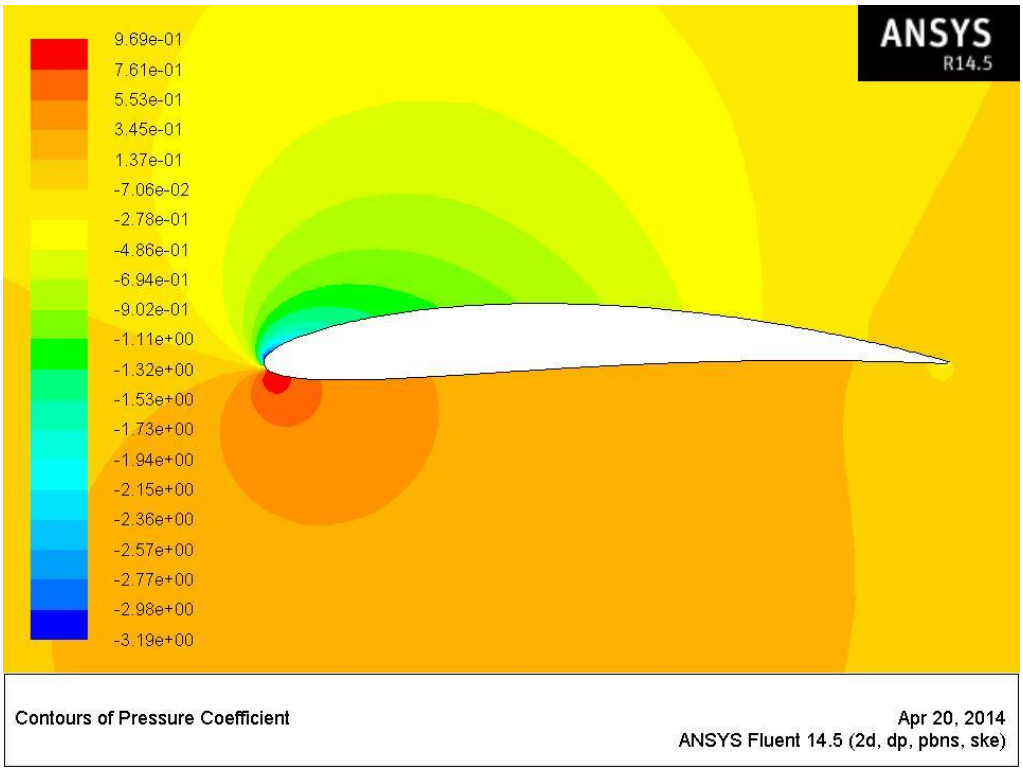
Şekil Ek-3.40.MB 03 (Hücum açısı: 12 derece)



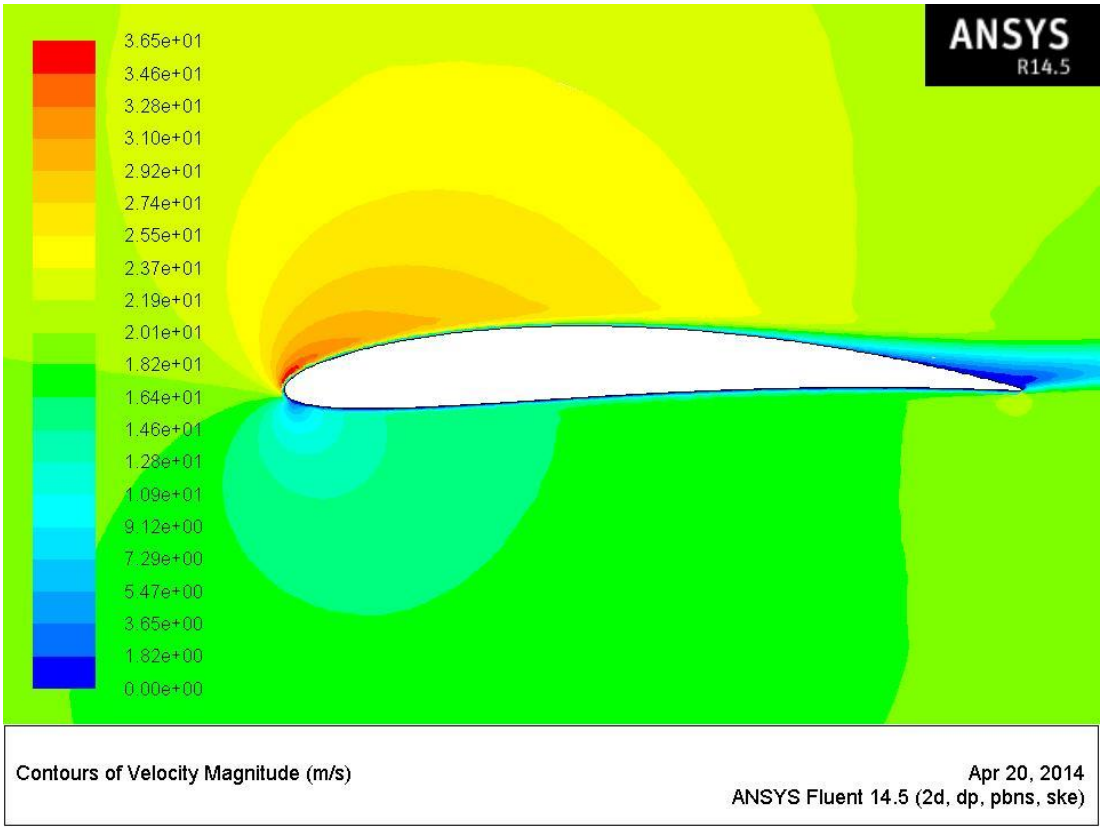
Şekil Ek-3.41. MB 03 (Hücum açısı: 12 derece)



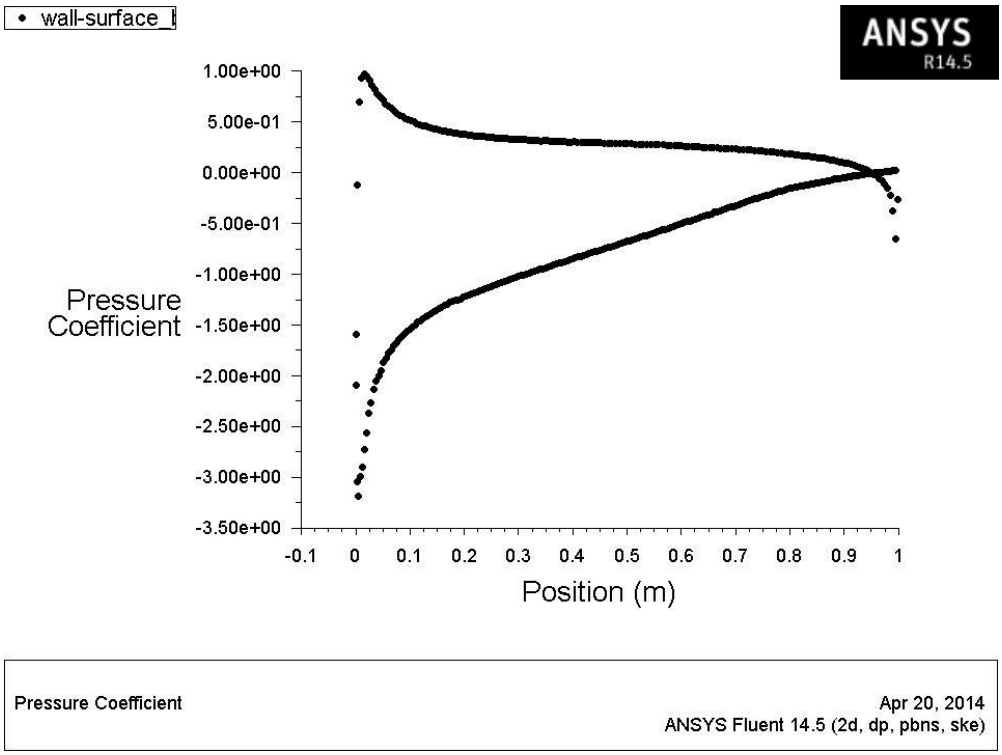
Şekil Ek-3.42.MB 03 (Hücum açısı: 12 derece)



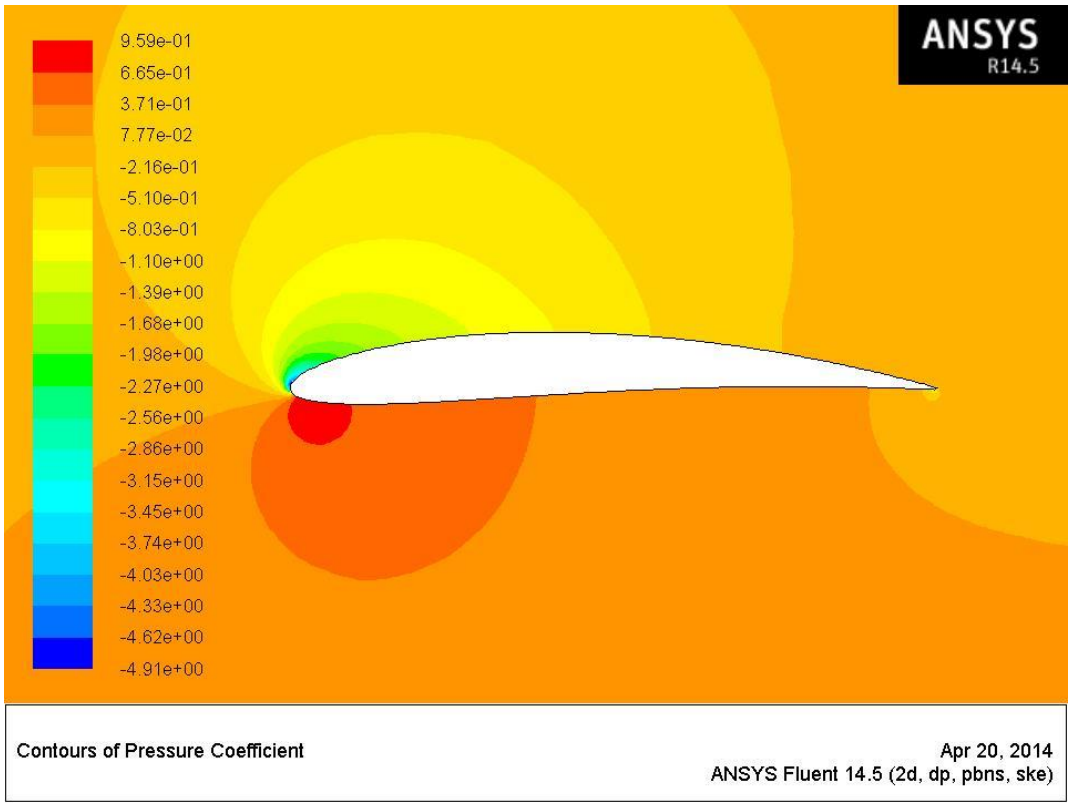
Şekil Ek-3.43.MB 03 (Hücum açısı: 15 derece)



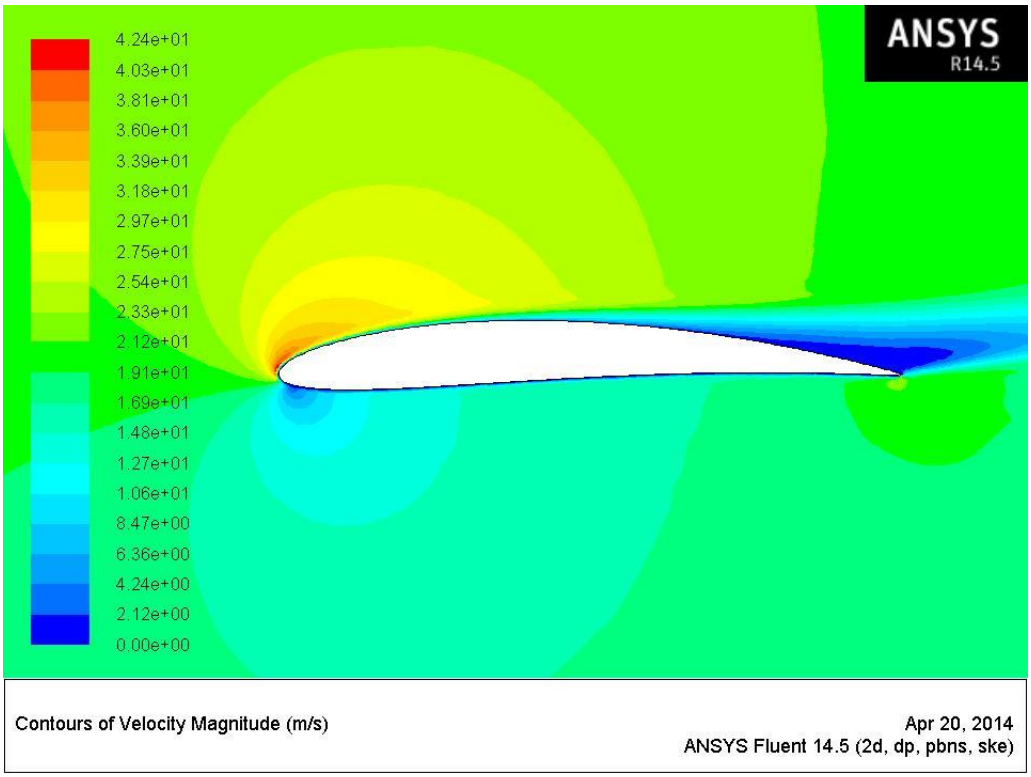
Şekil Ek-3.44. MB 03 (Hücum açısı: 15 derece)



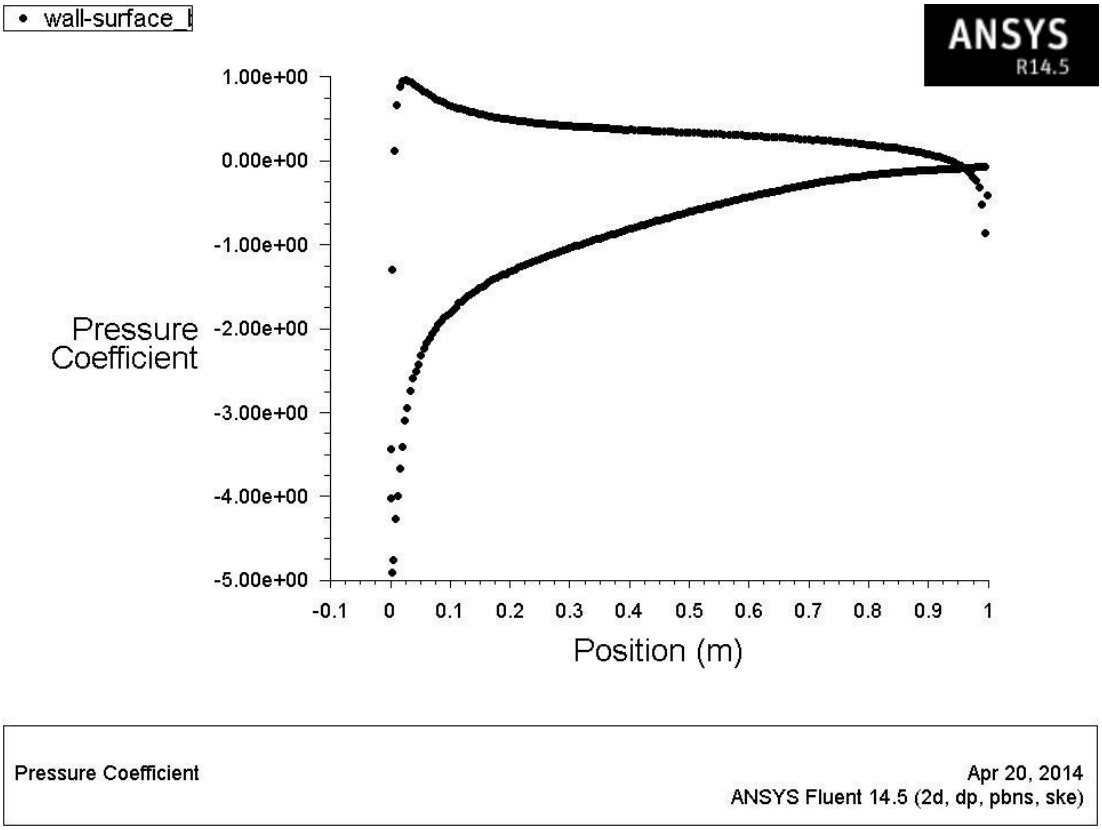
Şekil Ek-3.45.MB 03 (Hücum açısı: 15 derece)



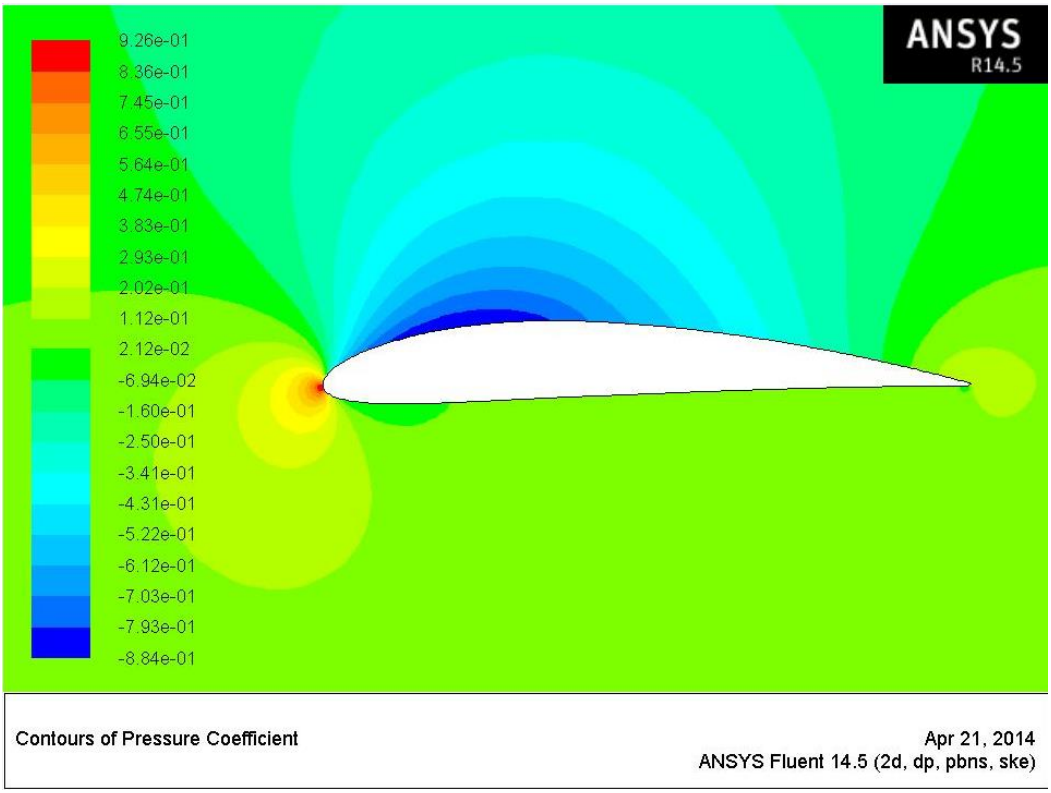
Şekil Ek-3.46. MB 03 (Hücum açısı: 20 derece)



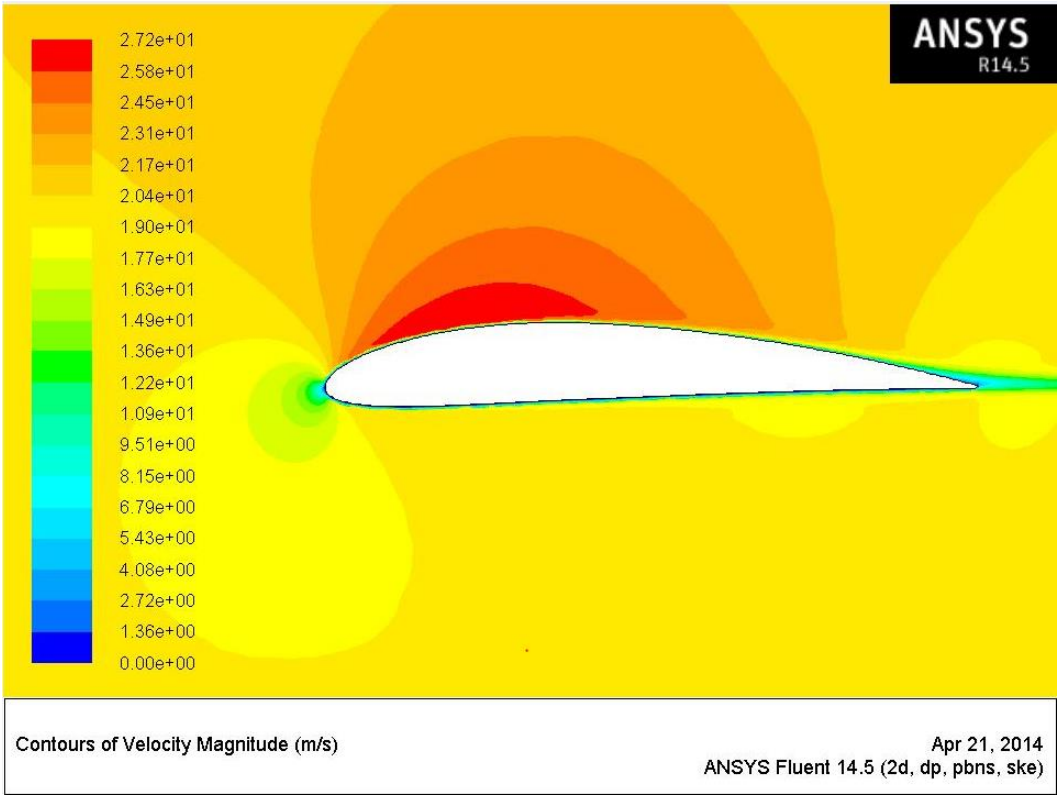
Şekil Ek-3.47. MB 03Hücum açısı: (20 derece)



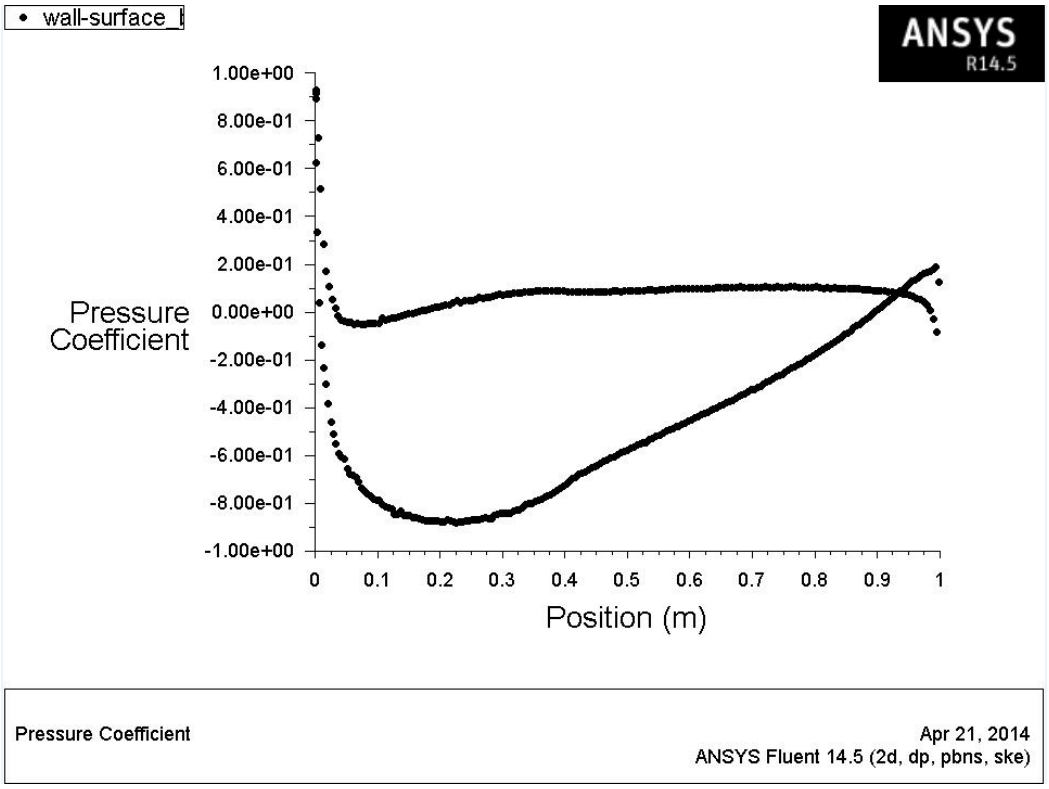
Şekil Ek-3.48.MB 03 (Hücum açısı: 20 derece)



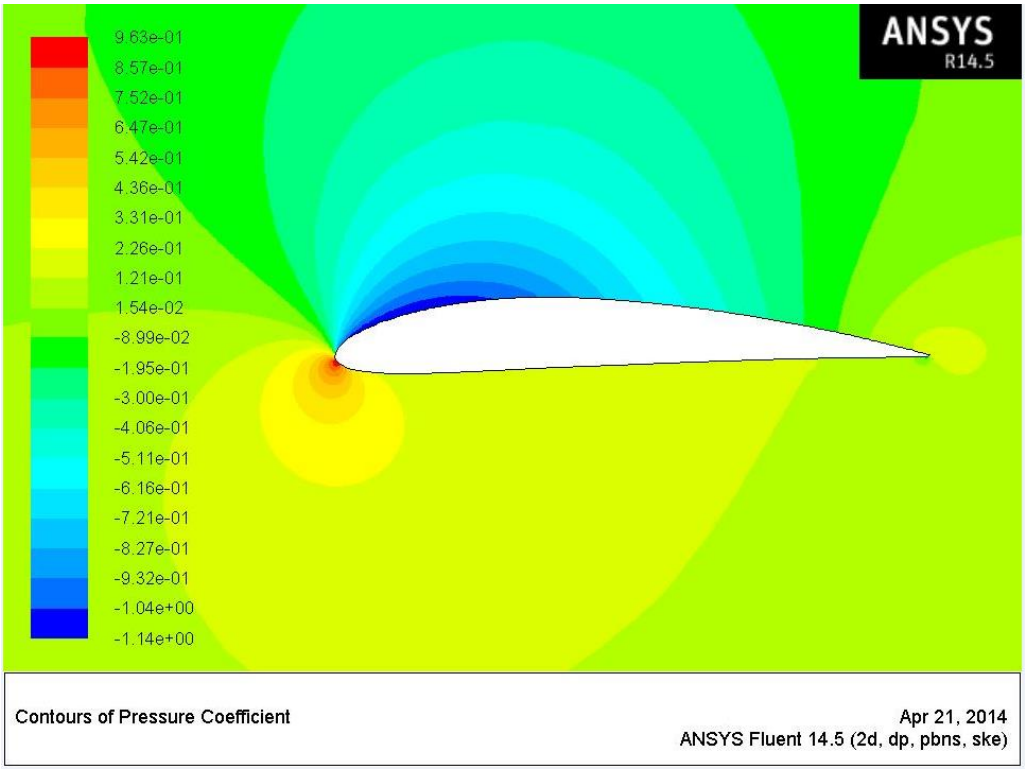
Şekil Ek-3.49.NACA 4412 (Hücum açısı: 4 derece)



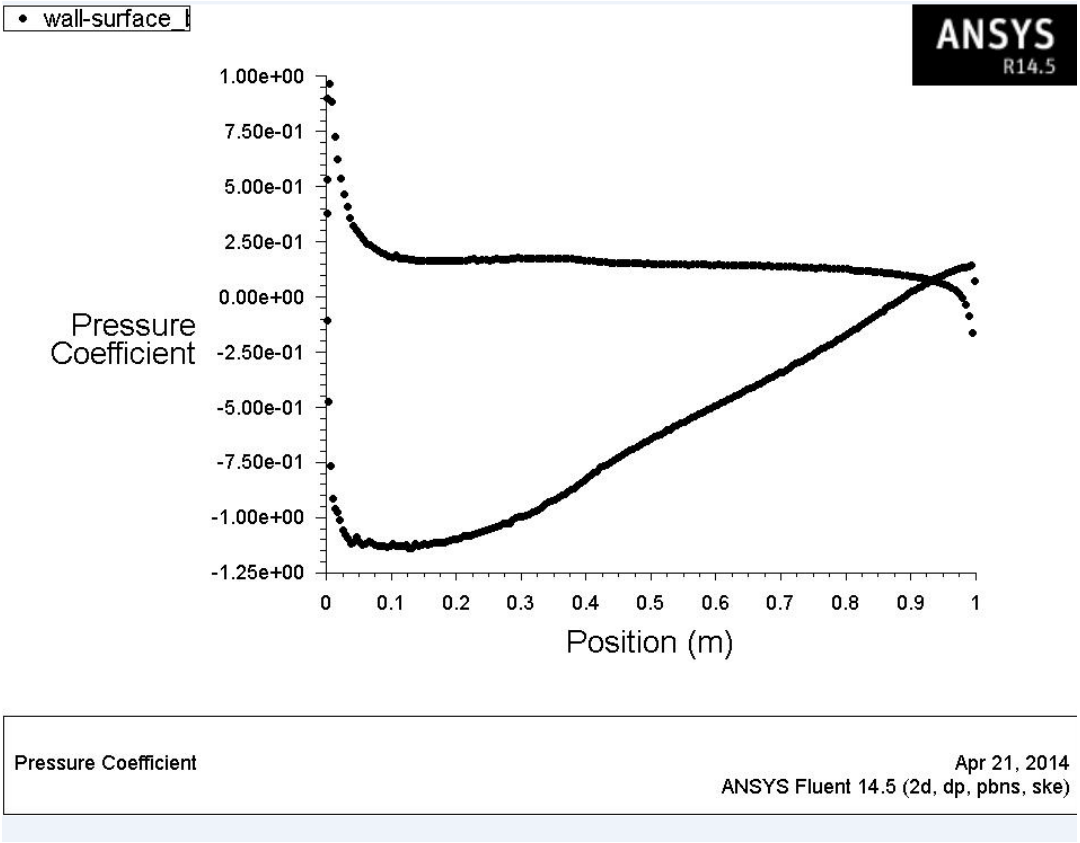
Şekil Ek-3.50.NACA 4412 (Hücum açısı: 4 derece)



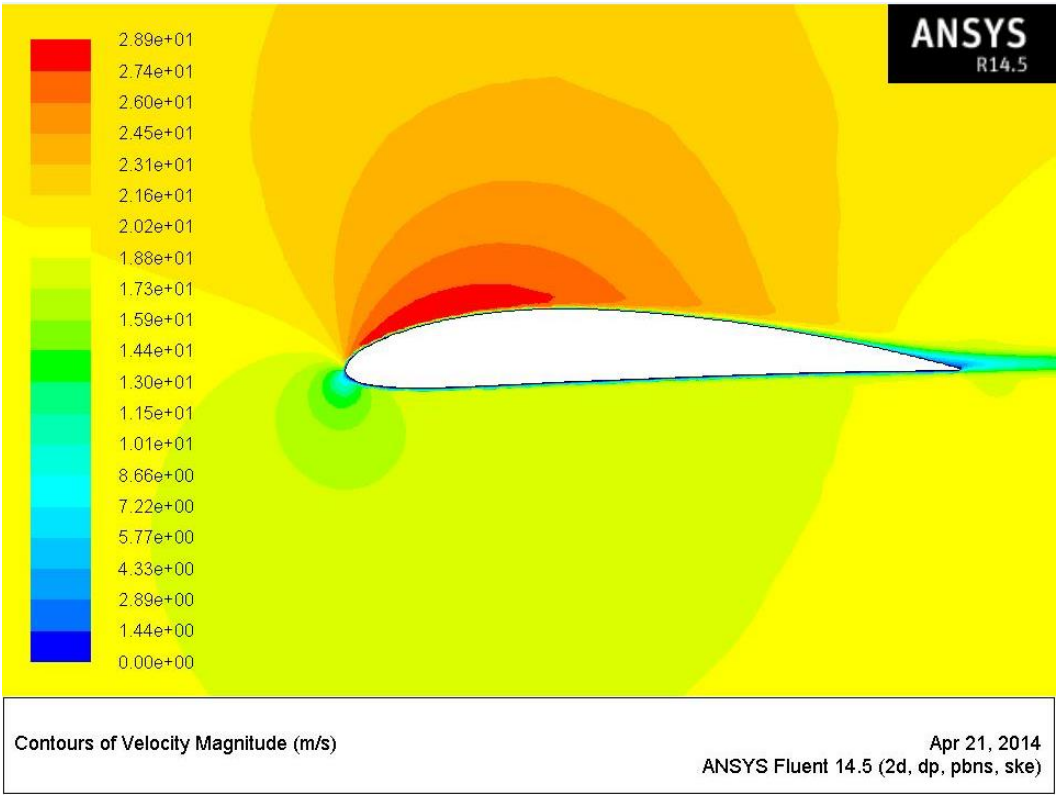
Şekil Ek-3.51.NACA 4412 (Hücum açısı: 4 derece)



Şekil Ek-3.52.NACA 4412 (Hücum açısı: 8 derece)



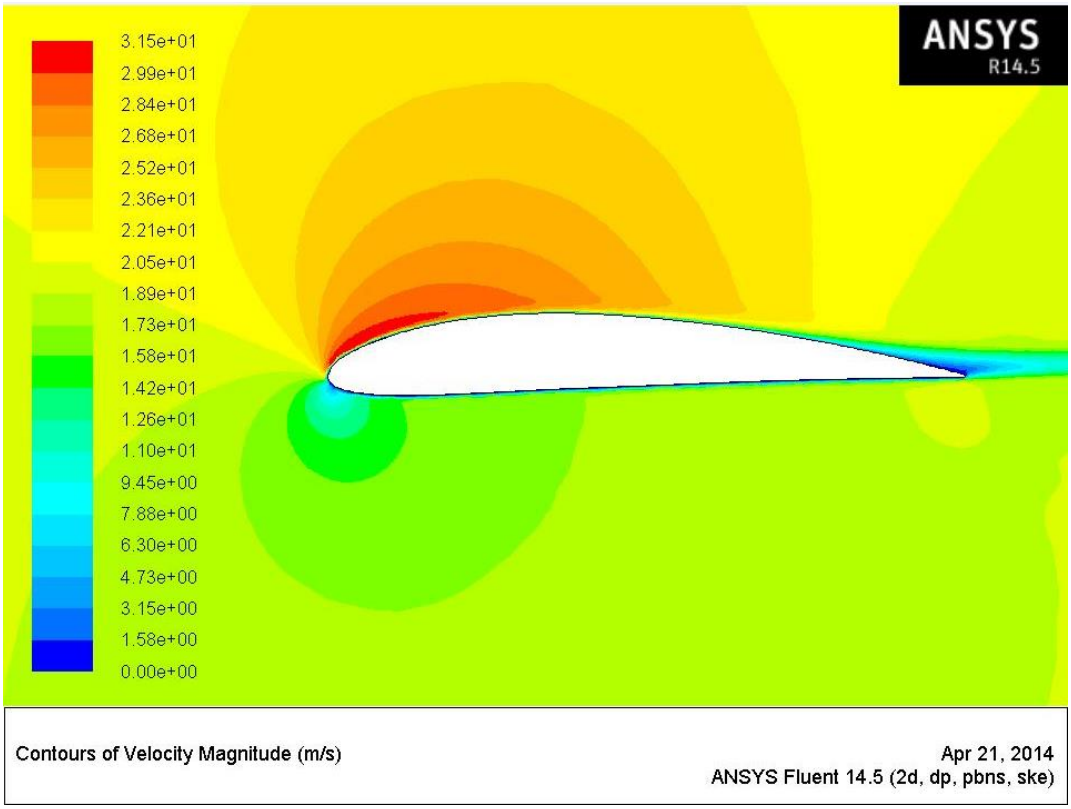
Şekil Ek-3.53.NACA 4412 (Hücum açısı: 8 derece)



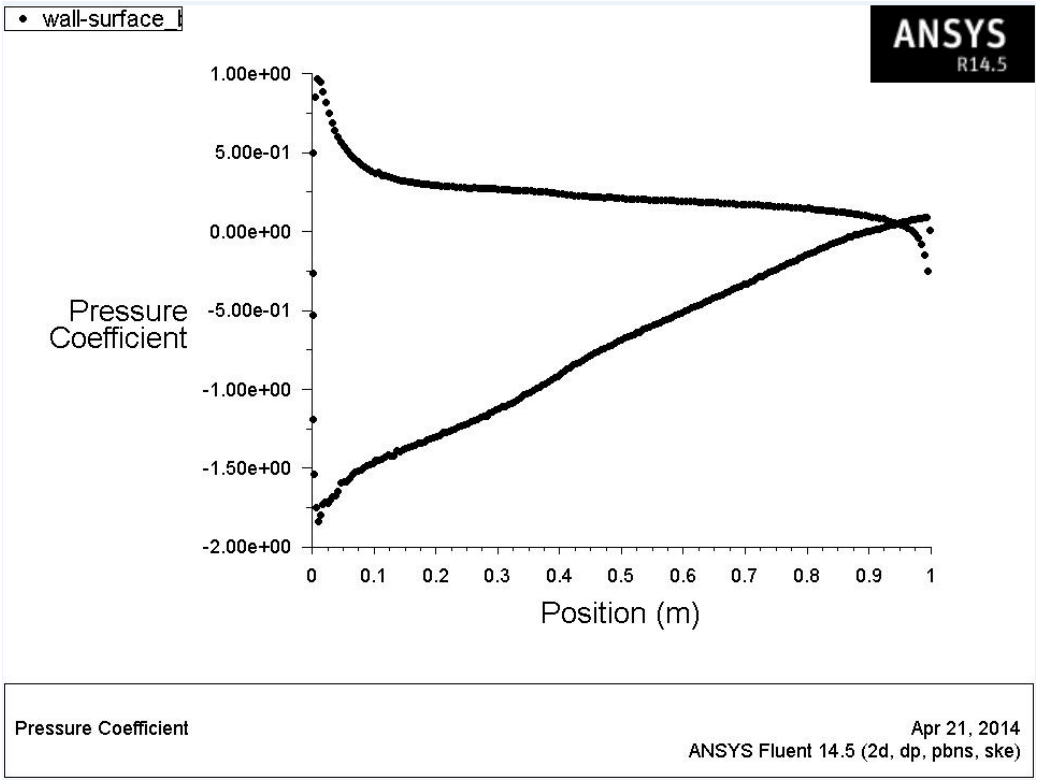
Şekil Ek-3.54.NACA 4412 (Hücum açısı:8 derece)



Şekil Ek-3.55.NACA 4412 (Hücum açısı: 12 derece)



Şekil Ek-3.56.NACA 4412 (Hücum açısı:12 derece)



Şekil Ek-3.57.NACA 4412 (Hücum açısı:12 derece)

EK-4: NACA 0012, MB 01, MB 02, NACA 4412, MB 03 Koordinatları

	NACA0012	MB01	MB02	NACA 4412	MB 03		NACA0012	MB01	MB02	NACA 4412	MB 03
	ÜST YÜZEY						ALT YÜZEY				
x/c	y/c	y/c	y/c	y/c	y/c	x/c	y/c	y/c	y/c	y/c	y/c
0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1E-07	0	0
0,002	0,00778	0,008558	0,00778	0,008213621	0,0068315	0,998	-0,00028	-0,000056	-1,5539E-06	-0,00127405	-0,000964201
0,004	0,01091	0,012001	0,01091	0,011756798	0,0097714	0,996	-0,00057	-0,000114	-5,9044E-06	-0,0012883	-0,000879105
0,006	0,01328	0,014608	0,01328	0,014528507	0,0120688	0,994	-0,00085	-0,00017	-1,3135E-05	-0,00130275	-0,000794714
0,008	0,01524	0,016764	0,01524	0,016899112	0,0140324	0,992	-0,00113	-0,000226	-2,3229E-05	-0,0013174	-0,000711032
0,01	0,01696	0,018656	0,01696	0,019012074	0,0157816	0,99	-0,00141	-0,000282	-3,6169E-05	-0,00133225	-0,00062806
0,012	0,01849	0,020339	0,01849	0,020940975	0,0173778	0,988	-0,00169	-0,000338	-5,194E-05	-0,00134731	-0,000545801
0,014	0,01988	0,021868	0,01988	0,022729527	0,0188574	0,986	-0,00197	-0,000394	-7,0524E-05	-0,00136259	-0,000464258
0,016	0,02117	0,023287	0,02117	0,024406215	0,0202442	0,984	-0,00225	-0,00045	-9,1905E-05	-0,00137808	-0,000383432
0,018	0,02237	0,024607	0,02237	0,025990826	0,0215547	0,982	-0,00253	-0,000506	-0,00011607	-0,00139378	-0,000303325
0,02	0,02349	0,025839	0,02349	0,027497771	0,0228008	0,98	-0,0028	-0,00056	-0,00014299	-0,00140971	-0,000223941
0,022	0,02454	0,026994	0,02454	0,028937929	0,0239917	0,978	-0,00308	-0,000616	-0,00017266	-0,00142585	-0,000145281
0,024	0,02554	0,028094	0,02554	0,030319755	0,0251343	0,976	-0,00335	-0,00067	-0,00020506	-0,00144223	-6,73481E-05
0,026	0,02649	0,029139	0,02649	0,031649973	0,0262343	0,974	-0,00363	-0,000726	-0,00024018	-0,00145883	9,85609E-06
0,028	0,0274	0,03014	0,0274	0,032934038	0,0272963	0,972	-0,0039	-0,00078	-0,00027799	-0,00147565	8,63292E-05
0,03	0,02826	0,031086	0,02826	0,034176445	0,0283239	0,97	-0,00418	-0,000836	-0,00031848	-0,00149272	0,000162069
0,032	0,02909	0,031999	0,02909	0,035380955	0,0293203	0,968	-0,00445	-0,00089	-0,00036164	-0,00151001	0,000237074
0,034	0,02989	0,032879	0,02989	0,036550746	0,0302882	0,966	-0,00472	-0,000944	-0,00040744	-0,00152755	0,00031134
0,036	0,03066	0,033726	0,03066	0,037688541	0,0312298	0,964	-0,00499	-0,000998	-0,00045587	-0,00154533	0,000384868
0,038	0,0314	0,03454	0,0314	0,038796686	0,032147	0,962	-0,00527	-0,001054	-0,00050692	-0,00156335	0,000457653
0,04	0,03212	0,035332	0,03212	0,039877225	0,0330417	0,96	-0,00554	-0,001108	-0,00056056	-0,00158161	0,000529695
0,042	0,03281	0,036091	0,03281	0,040931951	0,0339152	0,958	-0,00581	-0,001162	-0,00061679	-0,00160012	0,00060099
0,044	0,03348	0,036828	0,03348	0,041962446	0,0347689	0,956	-0,00607	-0,001214	-0,00067558	-0,00161889	0,000671538
0,046	0,03413	0,037543	0,03413	0,042970113	0,035604	0,954	-0,00634	-0,001268	-0,00073691	-0,0016379	0,000741336
0,048	0,03476	0,038236	0,03476	0,043956208	0,0364215	0,952	-0,00661	-0,001322	-0,00080078	-0,00165717	0,000810382
0,05	0,03537	0,038907	0,03537	0,044921857	0,0372224	0,95	-0,00688	-0,001376	-0,00086715	-0,0016767	0,000878674
0,052	0,03596	0,039556	0,03596	0,045868074	0,0380074	0,948	-0,00714	-0,001428	-0,00093603	-0,00169649	0,00094621
0,054	0,03654	0,040194	0,03654	0,046795778	0,0387774	0,946	-0,00741	-0,001482	-0,00100739	-0,00171654	0,001012989
0,056	0,0371	0,04081	0,0371	0,047705805	0,0395331	0,944	-0,00768	-0,001536	-0,00108121	-0,00173686	0,001079008
0,058	0,03764	0,041404	0,03764	0,048598917	0,040275	0,942	-0,00794	-0,001588	-0,00115748	-0,00175744	0,001144265
0,06	0,03818	0,041998	0,03818	0,04947581	0,0410038	0,94	-0,0082	-0,00164	-0,00123617	-0,00177829	0,001208759
0,062	0,03869	0,042559	0,03869	0,050337126	0,0417201	0,938	-0,00847	-0,001694	-0,00131729	-0,00179941	0,001272488
0,064	0,0392	0,04312	0,0392	0,051183454	0,0424242	0,936	-0,00873	-0,001746	-0,00140079	-0,00182081	0,00133545
0,066	0,03969	0,043659	0,03969	0,052015338	0,0431167	0,934	-0,00899	-0,001798	-0,00148668	-0,00184248	0,001397643
0,068	0,04018	0,044198	0,04018	0,052833283	0,0437979	0,932	-0,00925	-0,00185	-0,00157494	-0,00186442	0,001459066
0,07	0,04065	0,044715	0,04065	0,053637757	0,0444683	0,93	-0,00951	-0,001902	-0,00166554	-0,00188665	0,001519716
0,072	0,0411	0,04521	0,0411	0,054429193	0,0451282	0,928	-0,00977	-0,001954	-0,00175847	-0,00190916	0,001579593
0,074	0,04155	0,045705	0,04155	0,055207999	0,045778	0,926	-0,01003	-0,002006	-0,00185372	-0,00193195	0,001638694
0,076	0,04199	0,046189	0,04199	0,055974553	0,046418	0,924	-0,01029	-0,002058	-0,00195126	-0,00195503	0,001697017
0,078	0,04242	0,046662	0,04242	0,056729209	0,0470484	0,922	-0,01055	-0,00211	-0,00205108	-0,0019784	0,001754562
0,08	0,04284	0,047124	0,04284	0,057472299	0,0476696	0,92	-0,01081	-0,002162	-0,00215317	-0,00200205	0,001811326

0,082	0,04325	0,047575	0,04325	0,058204137	0,0482818	0,918	-0,01107	-0,002214	-0,00225751	-0,002026	0,001867307
0,084	0,04365	0,048015	0,04365	0,058925015	0,0488852	0,916	-0,01132	-0,002264	-0,00236407	-0,00205024	0,001922505
0,086	0,04404	0,048444	0,04404	0,05963521	0,0494801	0,914	-0,01158	-0,002316	-0,00247285	-0,00207478	0,001976918
0,088	0,04442	0,048862	0,04442	0,060334983	0,0500668	0,912	-0,01183	-0,002366	-0,00258383	-0,00209961	0,002030543
0,09	0,0448	0,04928	0,0448	0,061024581	0,0506453	0,91	-0,01209	-0,002418	-0,00269699	-0,00212474	0,002083381
0,092	0,04517	0,049687	0,04517	0,061704238	0,051216	0,908	-0,01234	-0,002468	-0,00281231	-0,00215018	0,002135428
0,094	0,04553	0,050083	0,04553	0,062374173	0,0517789	0,906	-0,0126	-0,00252	-0,00292978	-0,00217591	0,002186684
0,096	0,04588	0,050468	0,04588	0,063034599	0,0523343	0,904	-0,01285	-0,00257	-0,00304938	-0,00220195	0,002237147
0,098	0,04622	0,050842	0,04622	0,063685712	0,0528823	0,902	-0,0131	-0,00262	-0,0031711	-0,0022283	0,002286816
0,1	0,04656	0,051216	0,04656	0,064327704	0,0534231	0,9	-0,01335	-0,00267	-0,00329491	-0,00225495	0,002335689
0,102	0,04689	0,051579	0,04689	0,064960755	0,0539568	0,898	-0,0136	-0,00272	-0,0034208	-0,00228191	0,002383766
0,104	0,04722	0,051942	0,04722	0,065585035	0,0544836	0,896	-0,01385	-0,00277	-0,00354876	-0,00230919	0,002431044
0,106	0,04753	0,052283	0,04753	0,06620071	0,0550037	0,894	-0,0141	-0,00282	-0,00367876	-0,00233677	0,002477522
0,108	0,04785	0,052635	0,04785	0,066807937	0,055517	0,892	-0,01435	-0,00287	-0,0038108	-0,00236467	0,002523199
0,11	0,04815	0,052965	0,04815	0,067406864	0,0560239	0,89	-0,0146	-0,00292	-0,00394485	-0,00239289	0,002568074
0,112	0,04845	0,053295	0,04845	0,067997634	0,0565243	0,888	-0,01485	-0,00297	-0,0040809	-0,00242142	0,002612145
0,114	0,04874	0,053614	0,04874	0,068580386	0,0570185	0,886	-0,0151	-0,00302	-0,00421893	-0,00245027	0,002655412
0,116	0,04903	0,053933	0,04903	0,069155251	0,0575064	0,884	-0,01534	-0,003068	-0,00435892	-0,00247945	0,002697873
0,118	0,04931	0,054241	0,04931	0,069722354	0,0579883	0,882	-0,01559	-0,003118	-0,00450087	-0,00250894	0,002739526
0,12	0,04959	0,054549	0,04959	0,070281816	0,0584642	0,88	-0,01584	-0,003168	-0,00464474	-0,00253876	0,002780371
0,122	0,04986	0,054846	0,04986	0,070833754	0,0589342	0,878	-0,01608	-0,003216	-0,00479053	-0,0025689	0,002820406
0,124	0,05012	0,055132	0,05012	0,07137828	0,0593984	0,876	-0,01633	-0,003266	-0,00493821	-0,00259936	0,002859631
0,126	0,05038	0,055418	0,05038	0,071915501	0,0598569	0,874	-0,01657	-0,003314	-0,00508778	-0,00263016	0,002898044
0,128	0,05063	0,055693	0,05063	0,07244552	0,0603098	0,872	-0,01681	-0,003362	-0,00523921	-0,00266128	0,002935644
0,13	0,05088	0,055968	0,05088	0,072968437	0,0607572	0,87	-0,01706	-0,003412	-0,00539249	-0,00269273	0,00297243
0,132	0,05113	0,056243	0,05113	0,073484349	0,0611991	0,868	-0,0173	-0,00346	-0,0055476	-0,00272451	0,003008401
0,134	0,05137	0,056507	0,05137	0,073993347	0,0616357	0,866	-0,01754	-0,003508	-0,00570452	-0,00275662	0,003043557
0,136	0,0516	0,05676	0,0516	0,074495522	0,0620669	0,864	-0,01778	-0,003556	-0,00586324	-0,00278907	0,003077895
0,138	0,05183	0,057013	0,05183	0,07499096	0,0624929	0,862	-0,01802	-0,003604	-0,00602375	-0,00282185	0,003111416
0,14	0,05205	0,057255	0,05205	0,075479745	0,0629138	0,86	-0,01826	-0,003652	-0,00618602	-0,00285497	0,003144117
0,142	0,05228	0,057508	0,05228	0,075961957	0,0633296	0,858	-0,0185	-0,0037	-0,00635003	-0,00288842	0,003175999
0,144	0,05249	0,057739	0,05249	0,076437674	0,0637403	0,856	-0,01874	-0,003748	-0,00651578	-0,00292222	0,00320706
0,146	0,0527	0,05797	0,0527	0,076906972	0,0641461	0,854	-0,01898	-0,003796	-0,00668324	-0,00295635	0,0032373
0,148	0,05291	0,058201	0,05291	0,077369924	0,064547	0,852	-0,01922	-0,003844	-0,0068524	-0,00299082	0,003266717
0,15	0,05311	0,058421	0,05311	0,077826602	0,064943	0,85	-0,01946	-0,003892	-0,00702324	-0,00302563	0,003295311
0,152	0,05331	0,058641	0,05331	0,078277074	0,0653343	0,848	-0,01969	-0,003938	-0,00719575	-0,00306078	0,003323081
0,154	0,05351	0,058861	0,05351	0,078721407	0,0657208	0,846	-0,01993	-0,003986	-0,0073699	-0,00309627	0,003350026
0,156	0,0537	0,05907	0,0537	0,079159665	0,0661026	0,844	-0,02016	-0,004032	-0,00754569	-0,00313211	0,003376146
0,158	0,05388	0,059268	0,05388	0,079591912	0,0664799	0,842	-0,0204	-0,00408	-0,00772309	-0,0031683	0,003401439
0,16	0,05407	0,059477	0,05407	0,080018208	0,0668525	0,84	-0,02063	-0,004126	-0,00790209	-0,00320482	0,003425906
0,162	0,05424	0,059664	0,05424	0,080438614	0,0672206	0,838	-0,02087	-0,004174	-0,00808267	-0,0032417	0,003449544
0,164	0,05442	0,059862	0,05442	0,080853186	0,0675843	0,836	-0,0211	-0,00422	-0,00826482	-0,00327892	0,003472355
0,166	0,05459	0,060049	0,05459	0,08126198	0,0679435	0,834	-0,02133	-0,004266	-0,00844851	-0,00331649	0,003494336
0,168	0,05476	0,060236	0,05476	0,081665052	0,0682984	0,832	-0,02157	-0,004314	-0,00863373	-0,00335441	0,003515488
0,17	0,05492	0,060412	0,05492	0,082062455	0,0686489	0,83	-0,0218	-0,00436	-0,00882047	-0,00339267	0,003535809
0,172	0,05508	0,060588	0,05508	0,08245424	0,0689951	0,828	-0,02203	-0,004406	-0,00900871	-0,00343129	0,0035553
0,174	0,05524	0,060764	0,05524	0,082840457	0,0693371	0,826	-0,02226	-0,004452	-0,00919843	-0,00347026	0,00357396

0,176	0,05539	0,060929	0,05539	0,083221156	0,0696748	0,824	-0,02249	-0,004498	-0,00938962	-0,00350957	0,003591788
0,178	0,05554	0,061094	0,05554	0,083596385	0,0700084	0,822	-0,02272	-0,004544	-0,00958225	-0,00354924	0,003608783
0,18	0,05569	0,061259	0,05569	0,083966189	0,0703378	0,82	-0,02295	-0,00459	-0,00977632	-0,00358927	0,003624946
0,182	0,05583	0,061413	0,05583	0,084330616	0,0706632	0,818	-0,02318	-0,004636	-0,0099718	-0,00362964	0,003640275
0,184	0,05597	0,061567	0,05597	0,084689709	0,0709845	0,816	-0,02341	-0,004682	-0,01016867	-0,00367037	0,003654771
0,186	0,0561	0,06171	0,0561	0,085043511	0,0713017	0,814	-0,02363	-0,004726	-0,01036693	-0,00371145	0,003668433
0,188	0,05624	0,061864	0,05624	0,085392065	0,071615	0,812	-0,02386	-0,004772	-0,01056656	-0,00375288	0,00368126
0,19	0,05637	0,062007	0,05637	0,085735413	0,0719243	0,81	-0,02409	-0,004818	-0,01076753	-0,00379467	0,003693253
0,192	0,05649	0,062139	0,05649	0,086073593	0,0722298	0,808	-0,02431	-0,004862	-0,01096984	-0,00383682	0,00370441
0,194	0,05662	0,062282	0,05662	0,086406648	0,0725313	0,806	-0,02454	-0,004908	-0,01117346	-0,00387932	0,003714732
0,196	0,05674	0,062414	0,05674	0,086734613	0,072829	0,804	-0,02476	-0,004952	-0,01137838	-0,00392218	0,003724219
0,198	0,05685	0,062535	0,05685	0,087057528	0,0731228	0,802	-0,02499	-0,004998	-0,01158458	-0,00396539	0,003732869
0,2	0,05697	0,062667	0,05697	0,08737543	0,0734129	0,8	-0,02521	-0,005042	-0,01179204	-0,00400896	0,003740683
0,202	0,05708	0,062788	0,05708	0,087688354	0,0736992	0,798	-0,02543	-0,005086	-0,01200076	-0,00405288	0,003747661
0,204	0,05719	0,062909	0,05719	0,087996336	0,0739817	0,796	-0,02566	-0,005132	-0,01221071	-0,00409716	0,003753803
0,206	0,05729	0,063019	0,05729	0,08829941	0,0742606	0,794	-0,02588	-0,005176	-0,01242187	-0,0041418	0,003759107
0,208	0,0574	0,06314	0,0574	0,08859761	0,0745358	0,792	-0,0261	-0,00522	-0,01263423	-0,0041868	0,003763575
0,21	0,0575	0,06325	0,0575	0,08889097	0,0748073	0,79	-0,02632	-0,005264	-0,01284777	-0,00423215	0,003767206
0,212	0,05759	0,063349	0,05759	0,089179522	0,0750752	0,788	-0,02654	-0,005308	-0,01306248	-0,00427786	0,00377
0,214	0,05769	0,063459	0,05769	0,089463297	0,0753396	0,786	-0,02676	-0,005352	-0,01327833	-0,00432393	0,003771957
0,216	0,05778	0,063558	0,05778	0,089742328	0,0756003	0,784	-0,02698	-0,005396	-0,01349532	-0,00437036	0,003773076
0,218	0,05787	0,063657	0,05787	0,090016644	0,0758575	0,782	-0,0272	-0,00544	-0,01371343	-0,00441714	0,003773359
0,22	0,05795	0,063745	0,05795	0,090286276	0,0761112	0,78	-0,02742	-0,005484	-0,01393263	-0,00446428	0,003772804
0,222	0,05804	0,063844	0,05804	0,090551253	0,0763614	0,778	-0,02764	-0,005528	-0,01415291	-0,00451178	0,003771412
0,224	0,05812	0,063932	0,05812	0,090811604	0,0766082	0,776	-0,02785	-0,00557	-0,01437426	-0,00455963	0,003769184
0,226	0,0582	0,06402	0,0582	0,091067358	0,0768515	0,774	-0,02807	-0,005614	-0,01459666	-0,00460784	0,003766118
0,228	0,05827	0,064097	0,05827	0,091318541	0,0770913	0,772	-0,02829	-0,005658	-0,01482009	-0,00465641	0,003762215
0,23	0,05834	0,064174	0,05834	0,091565182	0,0773278	0,77	-0,0285	-0,0057	-0,01504454	-0,00470534	0,003757476
0,232	0,05841	0,064251	0,05841	0,091807308	0,0775609	0,768	-0,02872	-0,005744	-0,01526998	-0,00475462	0,0037519
0,234	0,05848	0,064328	0,05848	0,092044944	0,0777907	0,766	-0,02893	-0,005786	-0,01549641	-0,00480426	0,003745488
0,236	0,05855	0,064405	0,05855	0,092278116	0,0780171	0,764	-0,02915	-0,00583	-0,01572381	-0,00485426	0,00373824
0,238	0,05861	0,064471	0,05861	0,09250685	0,0782402	0,762	-0,02936	-0,005872	-0,01595215	-0,00490461	0,003730156
0,24	0,05867	0,064537	0,05867	0,092731171	0,07846	0,76	-0,02957	-0,005914	-0,01618142	-0,00495532	0,003721236
0,242	0,05873	0,064603	0,05873	0,092951103	0,0786765	0,758	-0,02978	-0,005956	-0,01641161	-0,00500638	0,003711481
0,244	0,05879	0,064669	0,05879	0,093166671	0,0788898	0,756	-0,03	-0,006	-0,0166427	-0,0050578	0,003700891
0,246	0,05884	0,064724	0,05884	0,093377898	0,0790999	0,754	-0,03021	-0,006042	-0,01687467	-0,00510957	0,003689467
0,248	0,05889	0,064779	0,05889	0,093584807	0,0793067	0,752	-0,03042	-0,006084	-0,01710751	-0,00516169	0,003677208
0,25	0,05894	0,064834	0,05894	0,093787422	0,0795104	0,75	-0,03063	-0,006126	-0,01734119	-0,00521417	0,003664115
0,252	0,05899	0,064889	0,05899	0,093985765	0,0797108	0,748	-0,03084	-0,006168	-0,01757571	-0,00526701	0,003650188
0,254	0,05903	0,064933	0,05903	0,094179857	0,0799082	0,746	-0,03105	-0,00621	-0,01781105	-0,00532019	0,003635429
0,256	0,05907	0,064977	0,05907	0,094369722	0,0801023	0,744	-0,03126	-0,006252	-0,01804718	-0,00537373	0,003619837
0,258	0,05911	0,065021	0,05911	0,09455538	0,0802934	0,742	-0,03146	-0,006292	-0,01828409	-0,00542762	0,003603413
0,26	0,05915	0,065065	0,05915	0,094736853	0,0804814	0,74	-0,03167	-0,006334	-0,01852178	-0,00548186	0,003586157
0,262	0,05919	0,065109	0,05919	0,094914162	0,0806663	0,738	-0,03188	-0,006376	-0,01876021	-0,00553645	0,00356807
0,264	0,05922	0,065142	0,05922	0,095087326	0,0808481	0,736	-0,03209	-0,006418	-0,01899937	-0,00559138	0,003549153
0,266	0,05925	0,065175	0,05925	0,095256366	0,0810268	0,734	-0,03229	-0,006458	-0,01923925	-0,00564667	0,003529406
0,268	0,05928	0,065208	0,05928	0,095421302	0,0812026	0,732	-0,0325	-0,0065	-0,01947982	-0,00570231	0,00350883

0,27	0,05931	0,065241	0,05931	0,095582154	0,0813753	0,73	-0,0327	-0,00654	-0,01972109	-0,00575829	0,003487425
0,272	0,05934	0,065274	0,05934	0,09573894	0,081545	0,728	-0,03291	-0,006582	-0,01996301	-0,00581462	0,003465192
0,274	0,05936	0,065296	0,05936	0,095891681	0,0817117	0,726	-0,03311	-0,006622	-0,02020559	-0,00587129	0,003442132
0,276	0,05938	0,065318	0,05938	0,096040394	0,0818755	0,724	-0,03331	-0,006662	-0,0204488	-0,00592831	0,003418246
0,278	0,0594	0,06534	0,0594	0,096185097	0,0820363	0,722	-0,03352	-0,006704	-0,02069262	-0,00598568	0,003393534
0,28	0,05942	0,065362	0,05942	0,09632581	0,0821942	0,72	-0,03372	-0,006744	-0,02093704	-0,00604338	0,003367997
0,282	0,05943	0,065373	0,05943	0,09646255	0,0823491	0,718	-0,03392	-0,006784	-0,02118205	-0,00610143	0,003341635
0,284	0,05945	0,065395	0,05945	0,096595335	0,0825012	0,716	-0,03412	-0,006824	-0,02142762	-0,00615982	0,003314451
0,286	0,05946	0,065406	0,05946	0,096724182	0,0826503	0,714	-0,03432	-0,006864	-0,02167374	-0,00621855	0,003286444
0,288	0,05947	0,065417	0,05947	0,096849109	0,0827966	0,712	-0,03452	-0,006904	-0,0219204	-0,00627761	0,003257615
0,29	0,05947	0,065417	0,05947	0,096970131	0,0829399	0,71	-0,03472	-0,006944	-0,02216757	-0,00633702	0,003227966
0,292	0,05948	0,065428	0,05948	0,097087267	0,0830805	0,708	-0,03492	-0,006984	-0,02241524	-0,00639676	0,003197497
0,294	0,05948	0,065428	0,05948	0,097200532	0,0832182	0,706	-0,03512	-0,007024	-0,02266339	-0,00645684	0,003166209
0,296	0,05949	0,065439	0,05949	0,097309943	0,0833531	0,704	-0,03532	-0,007064	-0,02291201	-0,00651725	0,003134104
0,298	0,05949	0,065439	0,05949	0,097415516	0,0834851	0,702	-0,03551	-0,007102	-0,02316108	-0,00657799	0,003101182
0,3	0,05948	0,065428	0,05948	0,097517266	0,0836144	0,7	-0,03571	-0,007142	-0,02341058	-0,00663907	0,003067444
0,302	0,05948	0,065428	0,05948	0,09761521	0,0837409	0,698	-0,03591	-0,007182	-0,02366049	-0,00670047	0,003032892
0,304	0,05948	0,065428	0,05948	0,097709362	0,0838646	0,696	-0,0361	-0,00722	-0,02391081	-0,00676221	0,002997526
0,306	0,05947	0,065417	0,05947	0,097799739	0,0839855	0,694	-0,0363	-0,00726	-0,02416151	-0,00682427	0,002961347
0,308	0,05946	0,065406	0,05946	0,097886354	0,0841037	0,692	-0,03649	-0,007298	-0,02441257	-0,00688666	0,002924358
0,31	0,05945	0,065395	0,05945	0,097969223	0,0842192	0,69	-0,03668	-0,007336	-0,02466399	-0,00694937	0,002886558
0,312	0,05944	0,065384	0,05944	0,09804836	0,0843319	0,688	-0,03688	-0,007376	-0,02491574	-0,00701241	0,00284795
0,314	0,05942	0,065362	0,05942	0,09812378	0,084442	0,686	-0,03707	-0,007414	-0,0251678	-0,00707577	0,002808534
0,316	0,05941	0,065351	0,05941	0,098195498	0,0845493	0,684	-0,03726	-0,007452	-0,02542017	-0,00713945	0,002768312
0,318	0,05939	0,065329	0,05939	0,098263526	0,0846539	0,682	-0,03745	-0,00749	-0,02567281	-0,00720345	0,002727284
0,32	0,05937	0,065307	0,05937	0,09832788	0,0847559	0,68	-0,03764	-0,007528	-0,02592573	-0,00726777	0,002685453
0,322	0,05935	0,065285	0,05935	0,098388573	0,0848552	0,678	-0,03783	-0,007566	-0,02617889	-0,0073324	0,00264282
0,324	0,05933	0,065263	0,05933	0,098445618	0,0849519	0,676	-0,03802	-0,007604	-0,02643229	-0,00739734	0,002599386
0,326	0,0593	0,06523	0,0593	0,098499029	0,0850459	0,674	-0,03821	-0,007642	-0,0266859	-0,0074626	0,002555152
0,328	0,05928	0,065208	0,05928	0,09854882	0,0851372	0,672	-0,0384	-0,00768	-0,02693971	-0,00752817	0,00251012
0,33	0,05925	0,065175	0,05925	0,098595003	0,085226	0,67	-0,03859	-0,007718	-0,02719371	-0,00759405	0,002464292
0,332	0,05922	0,065142	0,05922	0,098637591	0,0853122	0,668	-0,03878	-0,007756	-0,02744787	-0,00766024	0,002417668
0,334	0,05919	0,065109	0,05919	0,098676597	0,0853957	0,666	-0,03896	-0,007792	-0,02770218	-0,00772673	0,00237025
0,336	0,05916	0,065076	0,05916	0,098712033	0,0854767	0,664	-0,03915	-0,00783	-0,02795663	-0,00779352	0,002322041
0,338	0,05913	0,065043	0,05913	0,098743913	0,0855551	0,662	-0,03934	-0,007868	-0,02821119	-0,00786061	0,002273041
0,34	0,05909	0,064999	0,05909	0,098772249	0,0856309	0,66	-0,03952	-0,007904	-0,02846585	-0,00792801	0,002223252
0,342	0,05906	0,064966	0,05906	0,098797052	0,0857041	0,658	-0,03971	-0,007942	-0,0287206	-0,0079957	0,002172676
0,344	0,05902	0,064922	0,05902	0,098818335	0,0857749	0,656	-0,03989	-0,007978	-0,02897541	-0,00806369	0,002121314
0,346	0,05898	0,064878	0,05898	0,09883611	0,085843	0,654	-0,04007	-0,008014	-0,02923027	-0,00813197	0,002069168
0,348	0,05894	0,064834	0,05894	0,098850388	0,0859087	0,652	-0,04026	-0,008052	-0,02948516	-0,00820054	0,00201624
0,35	0,05889	0,064779	0,05889	0,098861182	0,0859718	0,65	-0,04044	-0,008088	-0,02974007	-0,00826941	0,001962532
0,352	0,05885	0,064735	0,05885	0,098868503	0,0860324	0,648	-0,04062	-0,008124	-0,02999499	-0,00833856	0,001908045
0,354	0,05881	0,064691	0,05881	0,098872361	0,0860906	0,646	-0,0408	-0,00816	-0,03024988	-0,00840799	0,001852781
0,356	0,05876	0,064636	0,05876	0,098872769	0,0861462	0,644	-0,04098	-0,008196	-0,03050474	-0,00847771	0,001796743
0,358	0,05871	0,064581	0,05871	0,098869738	0,0861994	0,642	-0,04116	-0,008232	-0,03075955	-0,00854771	0,001739931
0,36	0,05866	0,064526	0,05866	0,098863278	0,0862501	0,64	-0,04134	-0,008268	-0,0310143	-0,00861798	0,001682348
0,362	0,05861	0,064471	0,05861	0,098853401	0,0862983	0,638	-0,04152	-0,008304	-0,03126896	-0,00868854	0,001623995

0,364	0,05856	0,064416	0,05856	0,098840117	0,0863441	0,636	-0,0417	-0,00834	-0,03152352	-0,00875936	0,001564875
0,366	0,0585	0,06435	0,0585	0,098823438	0,0863874	0,634	-0,04187	-0,008374	-0,03177797	-0,00883046	0,00150499
0,368	0,05845	0,064295	0,05845	0,098803373	0,0864283	0,632	-0,04205	-0,00841	-0,03203228	-0,00890183	0,001444342
0,37	0,05839	0,064229	0,05839	0,098779932	0,0864668	0,63	-0,04223	-0,008446	-0,03228644	-0,00897346	0,001382932
0,372	0,05833	0,064163	0,05833	0,098753128	0,0865028	0,628	-0,0424	-0,00848	-0,03254044	-0,00904536	0,001320763
0,374	0,05827	0,064097	0,05827	0,098722968	0,0865365	0,626	-0,04258	-0,008516	-0,03279425	-0,00911751	0,001257837
0,376	0,05821	0,064031	0,05821	0,098689465	0,0865677	0,624	-0,04275	-0,00855	-0,03304786	-0,00918993	0,001194156
0,378	0,05815	0,063965	0,05815	0,098652627	0,0865966	0,622	-0,04292	-0,008584	-0,03330126	-0,0092626	0,001129723
0,38	0,05809	0,063899	0,05809	0,098612465	0,0866231	0,62	-0,0431	-0,00862	-0,03355442	-0,00933553	0,001064538
0,382	0,05802	0,063822	0,05802	0,098568988	0,0866472	0,618	-0,04327	-0,008654	-0,03380733	-0,00940871	0,000998606
0,384	0,05796	0,063756	0,05796	0,098522207	0,0866689	0,616	-0,04344	-0,008688	-0,03405998	-0,00948214	0,000931927
0,386	0,05789	0,063679	0,05789	0,09847213	0,0866882	0,614	-0,04361	-0,008722	-0,03431235	-0,00955581	0,000864505
0,388	0,05782	0,063602	0,05782	0,098418767	0,0867053	0,612	-0,04378	-0,008756	-0,03456441	-0,00962972	0,000796341
0,39	0,05775	0,063525	0,05775	0,098362128	0,0867199	0,61	-0,04395	-0,00879	-0,03481616	-0,00970387	0,000727439
0,392	0,05768	0,063448	0,05768	0,098302222	0,0867323	0,608	-0,04412	-0,008824	-0,03506757	-0,00977826	0,000657799
0,394	0,05761	0,063371	0,05761	0,098239057	0,0867423	0,606	-0,04429	-0,008858	-0,03531864	-0,00985289	0,000587426
0,396	0,05753	0,063283	0,05753	0,098172645	0,08675	0,604	-0,04446	-0,008892	-0,03556934	-0,00992774	0,00051632
0,398	0,05746	0,063206	0,05746	0,098102992	0,0867554	0,602	-0,04462	-0,008924	-0,03581966	-0,01000283	0,000444486
0,4	0,05738	0,063118	0,05738	0,098030108	0,0867584	0,6	-0,04479	-0,008958	-0,03606957	-0,01007814	0,000371924
0,402	0,05731	0,063041	0,05731	0,097954559	0,0867592	0,598	-0,04496	-0,008992	-0,03631907	-0,01015367	0,000298639
0,404	0,05723	0,062953	0,05723	0,097876907	0,0867577	0,596	-0,04512	-0,009024	-0,03656814	-0,01022941	0,000224632
0,406	0,05715	0,062865	0,05715	0,097797161	0,0867539	0,594	-0,04529	-0,009058	-0,03681676	-0,01030538	0,000149906
0,408	0,05707	0,062777	0,05707	0,097715331	0,0867478	0,592	-0,04545	-0,00909	-0,03706491	-0,01038156	7,44633E-05
0,41	0,05698	0,062678	0,05698	0,097631424	0,0867394	0,59	-0,04561	-0,009122	-0,03731258	-0,01045794	-1,69277E-06
0,412	0,0569	0,06259	0,0569	0,097545449	0,0867288	0,588	-0,04578	-0,009156	-0,03755975	-0,01053453	-7,85597E-05
0,414	0,05682	0,062502	0,05682	0,097457414	0,086716	0,586	-0,04594	-0,009188	-0,03780641	-0,01061133	-0,000156135
0,416	0,05673	0,062403	0,05673	0,097367328	0,0867009	0,584	-0,0461	-0,00922	-0,03805253	-0,01068832	-0,000234415
0,418	0,05664	0,062304	0,05664	0,097275199	0,0866835	0,582	-0,04626	-0,009252	-0,0382981	-0,01076551	-0,000313398
0,42	0,05656	0,062216	0,05656	0,097181035	0,0866639	0,58	-0,04642	-0,009284	-0,0385431	-0,0108429	-0,000393081
0,422	0,05647	0,062117	0,05647	0,097084843	0,0866421	0,578	-0,04658	-0,009316	-0,03878753	-0,01092047	-0,00047346
0,424	0,05638	0,062018	0,05638	0,096986632	0,086618	0,576	-0,04674	-0,009348	-0,03903135	-0,01099823	-0,000554534
0,426	0,05629	0,061919	0,05629	0,096886409	0,0865918	0,574	-0,04689	-0,009378	-0,03927456	-0,01107617	-0,000636298
0,428	0,05619	0,061809	0,05619	0,096784183	0,0865633	0,572	-0,04705	-0,00941	-0,03951714	-0,01115428	-0,00071875
0,43	0,0561	0,06171	0,0561	0,09667996	0,0865326	0,57	-0,04721	-0,009442	-0,03975906	-0,01123258	-0,000801887
0,432	0,05601	0,061611	0,05601	0,096573749	0,0864998	0,568	-0,04736	-0,009472	-0,04000032	-0,01131104	-0,000885705
0,434	0,05591	0,061501	0,05591	0,096465557	0,0864647	0,566	-0,04752	-0,009504	-0,0402409	-0,01138967	-0,000970203
0,436	0,05581	0,061391	0,05581	0,096355392	0,0864275	0,564	-0,04767	-0,009534	-0,04048078	-0,01146846	-0,001055376
0,438	0,05572	0,061292	0,05572	0,096243261	0,086388	0,562	-0,04782	-0,009564	-0,04071994	-0,01154742	-0,001141221
0,44	0,05562	0,061182	0,05562	0,096129171	0,0863465	0,56	-0,04798	-0,009596	-0,04095837	-0,01162653	-0,001227735
0,442	0,05552	0,061072	0,05552	0,096013129	0,0863027	0,558	-0,04813	-0,009626	-0,04119605	-0,01170579	-0,001314916
0,444	0,05542	0,060962	0,05542	0,095895143	0,0862568	0,556	-0,04828	-0,009656	-0,04143297	-0,0117852	-0,001402759
0,446	0,05531	0,060841	0,05531	0,095775219	0,0862087	0,554	-0,04843	-0,009686	-0,0416691	-0,01186475	-0,001491261
0,448	0,05521	0,060731	0,05521	0,095653366	0,0861585	0,552	-0,04858	-0,009716	-0,04190443	-0,01194445	-0,00158042
0,45	0,05511	0,060621	0,05511	0,095529589	0,0861061	0,55	-0,04873	-0,009746	-0,04213895	-0,01202428	-0,001670231
0,452	0,055	0,0605	0,055	0,095403896	0,0860516	0,548	-0,04887	-0,009774	-0,04237264	-0,01210424	-0,001760691
0,454	0,0549	0,06039	0,0549	0,095276293	0,085995	0,546	-0,04902	-0,009804	-0,04260548	-0,01218433	-0,001851796
0,456	0,05479	0,060269	0,05479	0,095146787	0,0859363	0,544	-0,04917	-0,009834	-0,04283745	-0,01226454	-0,001943544

0,458	0,05468	0,060148	0,05468	0,095015386	0,0858754	0,542	-0,04931	-0,009862	-0,04306853	-0,01234487	-0,002035931
0,46	0,05457	0,060027	0,05457	0,094882094	0,0858124	0,54	-0,04946	-0,009892	-0,04329872	-0,01242532	-0,002128952
0,462	0,05446	0,059906	0,05446	0,09474692	0,0857473	0,538	-0,0496	-0,00992	-0,043528	-0,01250588	-0,002222605
0,464	0,05435	0,059785	0,05435	0,09460987	0,0856801	0,536	-0,04975	-0,00995	-0,04375634	-0,01258654	-0,002316886
0,466	0,05424	0,059664	0,05424	0,09447095	0,0856108	0,534	-0,04989	-0,009978	-0,04398373	-0,01266731	-0,002411791
0,468	0,05413	0,059543	0,05413	0,094330166	0,0855394	0,532	-0,05003	-0,010006	-0,04421016	-0,01274817	-0,002507316
0,47	0,05401	0,059411	0,05401	0,094187524	0,085466	0,53	-0,05017	-0,010034	-0,04443561	-0,01282913	-0,002603458
0,472	0,0539	0,05929	0,0539	0,094043032	0,0853904	0,528	-0,05031	-0,010062	-0,04466005	-0,01291017	-0,002700212
0,474	0,05378	0,059158	0,05378	0,093896695	0,0853128	0,526	-0,05045	-0,01009	-0,04488348	-0,0129913	-0,002797575
0,476	0,05366	0,059026	0,05366	0,093748519	0,0852331	0,524	-0,05059	-0,010118	-0,04510588	-0,0130725	-0,002895544
0,478	0,05355	0,058905	0,05355	0,09359851	0,0851513	0,522	-0,05073	-0,010146	-0,04532723	-0,01315379	-0,002994113
0,48	0,05343	0,058773	0,05343	0,093446675	0,0850675	0,52	-0,05087	-0,010174	-0,04554752	-0,01323514	-0,003093279
0,482	0,05331	0,058641	0,05331	0,093293019	0,0849816	0,518	-0,051	-0,0102	-0,04576672	-0,01331655	-0,003193039
0,484	0,05319	0,058509	0,05319	0,093137549	0,0848937	0,516	-0,05114	-0,010228	-0,04598482	-0,01339802	-0,003293387
0,486	0,05307	0,058377	0,05307	0,092980269	0,0848037	0,514	-0,05127	-0,010254	-0,04620181	-0,01347955	-0,003394321
0,488	0,05294	0,058234	0,05294	0,092821187	0,0847117	0,512	-0,05141	-0,010282	-0,04641767	-0,01356113	-0,003495835
0,49	0,05282	0,058102	0,05282	0,092660307	0,0846176	0,51	-0,05154	-0,010308	-0,04663237	-0,01364275	-0,003597925
0,492	0,0527	0,05797	0,0527	0,092497635	0,0845215	0,508	-0,05167	-0,010334	-0,04684592	-0,01372442	-0,003700588
0,494	0,05257	0,057827	0,05257	0,092333177	0,0844234	0,506	-0,0518	-0,01036	-0,04705828	-0,01380612	-0,003803819
0,496	0,05244	0,057684	0,05244	0,092166938	0,0843232	0,504	-0,05193	-0,010386	-0,04726944	-0,01388784	-0,003907614
0,498	0,05232	0,057552	0,05232	0,091998924	0,0842211	0,502	-0,05206	-0,010412	-0,04747939	-0,01396959	-0,004011968
0,5	0,05219	0,057409	0,05219	0,091829141	0,0841169	0,5	-0,05219	-0,010438	-0,0476881	-0,01405136	-0,004116877
0,502	0,05206	0,057266	0,05206	0,091657593	0,0840107	0,498	-0,05232	-0,010464	-0,04789557	-0,01413315	-0,004222336
0,504	0,05193	0,057123	0,05193	0,091484287	0,0839025	0,496	-0,05244	-0,010488	-0,04810177	-0,01421494	-0,004328342
0,506	0,0518	0,05698	0,0518	0,091309226	0,0837923	0,494	-0,05257	-0,010514	-0,04830669	-0,01429673	-0,004434889
0,508	0,05167	0,056837	0,05167	0,091132418	0,0836801	0,492	-0,0527	-0,01054	-0,04851031	-0,01437852	-0,004541973
0,51	0,05154	0,056694	0,05154	0,090953866	0,0835659	0,49	-0,05282	-0,010564	-0,04871261	-0,01446031	-0,004649589
0,512	0,05141	0,056551	0,05141	0,090773576	0,0834498	0,488	-0,05294	-0,010588	-0,04891358	-0,01454208	-0,004757733
0,514	0,05127	0,056397	0,05127	0,090591553	0,0833316	0,486	-0,05307	-0,010614	-0,04911321	-0,01462382	-0,004866399
0,516	0,05114	0,056254	0,05114	0,090407802	0,0832115	0,484	-0,05319	-0,010638	-0,04931147	-0,01470555	-0,004975584
0,518	0,051	0,0561	0,051	0,090222328	0,0830894	0,482	-0,05331	-0,010662	-0,04950835	-0,01478724	-0,005085282
0,52	0,05087	0,055957	0,05087	0,090035135	0,0829653	0,48	-0,05343	-0,010686	-0,04970383	-0,0148689	-0,005195489
0,522	0,05073	0,055803	0,05073	0,08984623	0,0828392	0,478	-0,05355	-0,01071	-0,04989789	-0,01495051	-0,005306199
0,524	0,05059	0,055649	0,05059	0,089655616	0,0827112	0,476	-0,05366	-0,010732	-0,05009053	-0,01503207	-0,005417407
0,526	0,05045	0,055495	0,05045	0,089463299	0,0825813	0,474	-0,05378	-0,010756	-0,05028171	-0,01511358	-0,005529109
0,528	0,05031	0,055341	0,05031	0,089269282	0,0824493	0,472	-0,0539	-0,01078	-0,05047143	-0,01519503	-0,0056413
0,53	0,05017	0,055187	0,05017	0,089073572	0,0823155	0,47	-0,05401	-0,010802	-0,05065967	-0,01527641	-0,005753974
0,532	0,05003	0,055033	0,05003	0,088876171	0,0821796	0,468	-0,05413	-0,010826	-0,05084641	-0,01535772	-0,005867126
0,534	0,04989	0,054879	0,04989	0,088677086	0,0820419	0,466	-0,05424	-0,010848	-0,05103163	-0,01543895	-0,005980751
0,536	0,04975	0,054725	0,04975	0,08847632	0,0819022	0,464	-0,05435	-0,01087	-0,05121533	-0,01552009	-0,006094844
0,538	0,0496	0,05456	0,0496	0,088273878	0,0817605	0,462	-0,05446	-0,010892	-0,05139747	-0,01560114	-0,0062094
0,54	0,04946	0,054406	0,04946	0,088069765	0,081617	0,46	-0,05457	-0,010914	-0,05157805	-0,01568209	-0,006324412
0,542	0,04931	0,054241	0,04931	0,087863985	0,0814715	0,458	-0,05468	-0,010936	-0,05175705	-0,01576294	-0,006439876
0,544	0,04917	0,054087	0,04917	0,087656541	0,081324	0,456	-0,05479	-0,010958	-0,05193445	-0,01584368	-0,006555786
0,546	0,04902	0,053922	0,04902	0,087447439	0,0811747	0,454	-0,0549	-0,01098	-0,05211024	-0,01592429	-0,006672137
0,548	0,04887	0,053757	0,04887	0,087236683	0,0810234	0,452	-0,055	-0,011	-0,05228439	-0,01600478	-0,006788923
0,55	0,04873	0,053603	0,04873	0,087024277	0,0808702	0,45	-0,05511	-0,011022	-0,0524569	-0,01608514	-0,006906139

0,552	0,04858	0,053438	0,04858	0,086810225	0,0807151	0,448	-0,05521	-0,011042	-0,05262774	-0,01616537	-0,007023778
0,554	0,04843	0,053273	0,04843	0,086594531	0,0805581	0,446	-0,05531	-0,011062	-0,0527969	-0,01624544	-0,007141835
0,556	0,04828	0,053108	0,04828	0,086377199	0,0803992	0,444	-0,05542	-0,011084	-0,05296436	-0,01632536	-0,007260305
0,558	0,04813	0,052943	0,04813	0,086158233	0,0802384	0,442	-0,05552	-0,011104	-0,05313011	-0,01640513	-0,007379181
0,56	0,04798	0,052778	0,04798	0,085937638	0,0800757	0,44	-0,05562	-0,011124	-0,05329412	-0,01648473	-0,007498457
0,562	0,04782	0,052602	0,04782	0,085715417	0,0799111	0,438	-0,05572	-0,011144	-0,05345639	-0,01656415	-0,007618128
0,564	0,04767	0,052437	0,04767	0,085491574	0,0797447	0,436	-0,05581	-0,011162	-0,0536169	-0,01664339	-0,007738187
0,566	0,04752	0,052272	0,04752	0,085266113	0,0795763	0,434	-0,05591	-0,011182	-0,05377562	-0,01672245	-0,007858628
0,568	0,04736	0,052096	0,04736	0,085039038	0,079406	0,432	-0,05601	-0,011202	-0,05393254	-0,0168013	-0,007979446
0,57	0,04721	0,051931	0,04721	0,084810353	0,0792339	0,43	-0,0561	-0,01122	-0,05408765	-0,01687996	-0,008100633
0,572	0,04705	0,051755	0,04705	0,084580061	0,0790599	0,428	-0,05619	-0,011238	-0,05424093	-0,0169584	-0,008222185
0,574	0,04689	0,051579	0,04689	0,084348165	0,078884	0,426	-0,05629	-0,011258	-0,05439236	-0,01703663	-0,008344093
0,576	0,04674	0,051414	0,04674	0,08411467	0,0787062	0,424	-0,05638	-0,011276	-0,05454193	-0,01711463	-0,008466353
0,578	0,04658	0,051238	0,04658	0,08387958	0,0785266	0,422	-0,05647	-0,011294	-0,05468961	-0,0171924	-0,008588957
0,58	0,04642	0,051062	0,04642	0,083642897	0,0783451	0,42	-0,05656	-0,011312	-0,0548354	-0,01726992	-0,008711899
0,582	0,04626	0,050886	0,04626	0,083404625	0,0781617	0,418	-0,05664	-0,011328	-0,05497927	-0,0173472	-0,008835173
0,584	0,0461	0,05071	0,0461	0,083164768	0,0779765	0,416	-0,05673	-0,011346	-0,05512121	-0,01742422	-0,008958771
0,586	0,04594	0,050534	0,04594	0,08292333	0,0777894	0,414	-0,05682	-0,011364	-0,05526121	-0,01750097	-0,009082687
0,588	0,04578	0,050358	0,04578	0,082680313	0,0776005	0,412	-0,0569	-0,01138	-0,05539924	-0,01757745	-0,009206914
0,59	0,04561	0,050171	0,04561	0,08243572	0,0774097	0,41	-0,05698	-0,011396	-0,05553528	-0,01765365	-0,009331446
0,592	0,04545	0,049995	0,04545	0,082189556	0,0772171	0,408	-0,05707	-0,011414	-0,05566934	-0,01772955	-0,009456275
0,594	0,04529	0,049819	0,04529	0,081941823	0,0770226	0,406	-0,05715	-0,01143	-0,05580137	-0,01780516	-0,009581394
0,596	0,04512	0,049632	0,04512	0,081692525	0,0768262	0,404	-0,05723	-0,011446	-0,05593138	-0,01788046	-0,009706797
0,598	0,04496	0,049456	0,04496	0,081441665	0,0766281	0,402	-0,05731	-0,011462	-0,05605933	-0,01795545	-0,009832476
0,6	0,04479	0,049269	0,04479	0,081189246	0,0764281	0,4	-0,05738	-0,011476	-0,05618523	-0,01803011	-0,009958424
0,602	0,04462	0,049082	0,04462	0,080935271	0,0762262	0,398	-0,05746	-0,011492	-0,05630904	-0,01810499	-0,010084633
0,604	0,04446	0,048906	0,04446	0,080679744	0,0760226	0,396	-0,05753	-0,011506	-0,05643076	-0,01818064	-0,010211097
0,606	0,04429	0,048719	0,04429	0,080422666	0,0758171	0,394	-0,05761	-0,011522	-0,05655036	-0,01825706	-0,010337808
0,608	0,04412	0,048532	0,04412	0,080164042	0,0756097	0,392	-0,05768	-0,011536	-0,05666783	-0,01833422	-0,010464758
0,61	0,04395	0,048345	0,04395	0,079903874	0,0754006	0,39	-0,05775	-0,01155	-0,05678315	-0,01841213	-0,01059194
0,612	0,04378	0,048158	0,04378	0,079642164	0,0751896	0,388	-0,05782	-0,011564	-0,05689631	-0,01849077	-0,010719346
0,614	0,04361	0,047971	0,04361	0,079378917	0,0749768	0,386	-0,05789	-0,011578	-0,05700728	-0,01857013	-0,010846968
0,616	0,04344	0,047784	0,04344	0,079114135	0,0747622	0,384	-0,05796	-0,011592	-0,05711606	-0,01865021	-0,010974799
0,618	0,04327	0,047597	0,04327	0,07884782	0,0745457	0,382	-0,05802	-0,011604	-0,05722263	-0,01873099	-0,01110283
0,62	0,0431	0,04741	0,0431	0,078579976	0,0743275	0,38	-0,05809	-0,011618	-0,05732696	-0,01881246	-0,011231054
0,622	0,04292	0,047212	0,04292	0,078310605	0,0741074	0,378	-0,05815	-0,01163	-0,05742905	-0,01889463	-0,011359463
0,624	0,04275	0,047025	0,04275	0,078039709	0,0738855	0,376	-0,05821	-0,011642	-0,05752887	-0,01897746	-0,011488047
0,626	0,04258	0,046838	0,04258	0,077767292	0,0736618	0,374	-0,05827	-0,011654	-0,05762642	-0,01906097	-0,0116168
0,628	0,0424	0,04664	0,0424	0,077493356	0,0734364	0,372	-0,05833	-0,011666	-0,05772166	-0,01914513	-0,011745713
0,63	0,04223	0,046453	0,04223	0,077217904	0,0732091	0,37	-0,05839	-0,011678	-0,05781459	-0,01922993	-0,011874777
0,632	0,04205	0,046255	0,04205	0,076940937	0,07298	0,368	-0,05845	-0,01169	-0,05790519	-0,01931537	-0,012003984
0,634	0,04187	0,046057	0,04187	0,07666246	0,0727491	0,366	-0,0585	-0,0117	-0,05799345	-0,01940144	-0,012133325
0,636	0,0417	0,04587	0,0417	0,076382473	0,0725164	0,364	-0,05856	-0,011712	-0,05807934	-0,01948812	-0,012262791
0,638	0,04152	0,045672	0,04152	0,07610098	0,0722819	0,362	-0,05861	-0,011722	-0,05816285	-0,0195754	-0,012392374
0,64	0,04134	0,045474	0,04134	0,075817983	0,0720457	0,36	-0,05866	-0,011732	-0,05824396	-0,01966328	-0,012522065
0,642	0,04116	0,045276	0,04116	0,075533484	0,0718076	0,358	-0,05871	-0,011742	-0,05832266	-0,01975174	-0,012651855
0,644	0,04098	0,045078	0,04098	0,075247486	0,0715677	0,356	-0,05876	-0,011752	-0,05839892	-0,01984077	-0,012781734

0,646	0,0408	0,04488	0,0408	0,07495999	0,0713261	0,354	-0,05881	-0,011762	-0,05847274	-0,01993036	-0,012911694
0,648	0,04062	0,044682	0,04062	0,074671	0,0710827	0,352	-0,05885	-0,01177	-0,0585441	-0,0200205	-0,013041725
0,65	0,04044	0,044484	0,04044	0,074380517	0,0708375	0,35	-0,05889	-0,011778	-0,05861298	-0,02011118	-0,013171818
0,652	0,04026	0,044286	0,04026	0,074088543	0,0705905	0,348	-0,05894	-0,011788	-0,05867935	-0,02020239	-0,013301964
0,654	0,04007	0,044077	0,04007	0,073795082	0,0703417	0,346	-0,05898	-0,011796	-0,05874322	-0,02029411	-0,013432152
0,656	0,03989	0,043879	0,03989	0,073500133	0,0700912	0,344	-0,05902	-0,011804	-0,05880455	-0,02038634	-0,013562373
0,658	0,03971	0,043681	0,03971	0,073203701	0,0698388	0,342	-0,05906	-0,011812	-0,05886334	-0,02047905	-0,013692617
0,66	0,03952	0,043472	0,03952	0,072905786	0,0695847	0,34	-0,05909	-0,011818	-0,05891957	-0,02057225	-0,013822874
0,662	0,03934	0,043274	0,03934	0,072606392	0,0693289	0,338	-0,05913	-0,011826	-0,05897321	-0,02066591	-0,013953134
0,664	0,03915	0,043065	0,03915	0,072305519	0,0690712	0,336	-0,05916	-0,011832	-0,05902425	-0,02076003	-0,014083388
0,666	0,03896	0,042856	0,03896	0,07200317	0,0688118	0,334	-0,05919	-0,011838	-0,05907269	-0,0208546	-0,014213624
0,668	0,03878	0,042658	0,03878	0,071699346	0,0685507	0,332	-0,05922	-0,011844	-0,05911849	-0,02094959	-0,014343832
0,67	0,03859	0,042449	0,03859	0,07139405	0,0682877	0,33	-0,05925	-0,01185	-0,05916165	-0,021045	-0,014474002
0,672	0,0384	0,04224	0,0384	0,071087283	0,068023	0,328	-0,05928	-0,011856	-0,05920214	-0,02114082	-0,014604123
0,674	0,03821	0,042031	0,03821	0,070779048	0,0677565	0,326	-0,0593	-0,01186	-0,05923995	-0,02123703	-0,014734185
0,676	0,03802	0,041822	0,03802	0,070469345	0,0674883	0,324	-0,05933	-0,011866	-0,05927506	-0,02133362	-0,014864175
0,678	0,03783	0,041613	0,03783	0,070158177	0,0672183	0,322	-0,05935	-0,01187	-0,05930747	-0,02143057	-0,014994084
0,68	0,03764	0,041404	0,03764	0,069845545	0,0669465	0,32	-0,05937	-0,011874	-0,05933714	-0,02152788	-0,0151239
0,682	0,03745	0,041195	0,03745	0,069531451	0,066673	0,318	-0,05939	-0,011878	-0,05936406	-0,02162553	-0,015253612
0,684	0,03726	0,040986	0,03726	0,069215896	0,0663978	0,316	-0,05941	-0,011882	-0,05938822	-0,0217235	-0,015383208
0,686	0,03707	0,040777	0,03707	0,068898883	0,0661207	0,314	-0,05942	-0,011884	-0,0594096	-0,02182178	-0,015512677
0,688	0,03688	0,040568	0,03688	0,068580412	0,065842	0,312	-0,05944	-0,011888	-0,05942819	-0,02192036	-0,015642007
0,69	0,03668	0,040348	0,03668	0,068260486	0,0655614	0,31	-0,05945	-0,01189	-0,05944396	-0,02201922	-0,015771186
0,692	0,03649	0,040139	0,03649	0,067939105	0,0652792	0,308	-0,05946	-0,011892	-0,0594569	-0,02211835	-0,015900202
0,694	0,0363	0,03993	0,0363	0,067616271	0,0649951	0,306	-0,05947	-0,011894	-0,05946699	-0,02221774	-0,016029042
0,696	0,0361	0,03971	0,0361	0,067291986	0,0647094	0,304	-0,05948	-0,011896	-0,05947422	-0,02231736	-0,016157695
0,698	0,03591	0,039501	0,03591	0,066966251	0,0644218	0,302	-0,05948	-0,011896	-0,05947857	-0,02241721	-0,016286148
0,7	0,03571	0,039281	0,03571	0,066639067	0,0641326	0,3	-0,05948	-0,011896	-0,05948002	-0,02251727	-0,016414389
0,702	0,03551	0,039061	0,03551	0,066310436	0,0638415	0,298	-0,05949	-0,011898	-0,05949	-0,02261752	-0,016542403
0,704	0,03532	0,038852	0,03532	0,065980359	0,0635488	0,296	-0,05949	-0,011898	-0,05949	-0,02271794	-0,016670179
0,706	0,03512	0,038632	0,03512	0,065648837	0,0632543	0,294	-0,05948	-0,011896	-0,05948	-0,02281853	-0,016797704
0,708	0,03492	0,038412	0,03492	0,065315871	0,062958	0,292	-0,05948	-0,011896	-0,05948	-0,02291927	-0,016924963
0,71	0,03472	0,038192	0,03472	0,064981463	0,06266	0,29	-0,05947	-0,011894	-0,05947	-0,02302013	-0,017051943
0,712	0,03452	0,037972	0,03452	0,064645614	0,0623603	0,288	-0,05947	-0,011894	-0,05947	-0,02312111	-0,017178631
0,714	0,03432	0,037752	0,03432	0,064308324	0,0620588	0,286	-0,05946	-0,011892	-0,05946	-0,02322218	-0,017305012
0,716	0,03412	0,037532	0,03412	0,063969596	0,0617556	0,284	-0,05945	-0,01189	-0,05945	-0,02332334	-0,017431073
0,718	0,03392	0,037312	0,03392	0,063629429	0,0614507	0,282	-0,05943	-0,011886	-0,05943	-0,02342455	-0,017556799
0,72	0,03372	0,037092	0,03372	0,063287826	0,061144	0,28	-0,05942	-0,011884	-0,05942	-0,02352581	-0,017682175
0,722	0,03352	0,036872	0,03352	0,062944787	0,0608356	0,278	-0,0594	-0,01188	-0,0594	-0,0236271	-0,017807188
0,724	0,03331	0,036641	0,03331	0,062600313	0,0605254	0,276	-0,05938	-0,011876	-0,05938	-0,02372839	-0,017931821
0,726	0,03311	0,036421	0,03311	0,062254405	0,0602135	0,274	-0,05936	-0,011872	-0,05936	-0,02382968	-0,018056061
0,728	0,03291	0,036201	0,03291	0,061907063	0,0598999	0,272	-0,05934	-0,011868	-0,05934	-0,02393094	-0,01817989
0,73	0,0327	0,03597	0,0327	0,06155829	0,0595846	0,27	-0,05931	-0,011862	-0,05931	-0,02403215	-0,018303295
0,732	0,0325	0,03575	0,0325	0,061208085	0,0592675	0,268	-0,05928	-0,011856	-0,05928	-0,0241333	-0,018426258
0,734	0,03229	0,035519	0,03229	0,060856449	0,0589487	0,266	-0,05925	-0,01185	-0,05925	-0,02423437	-0,018548765
0,736	0,03209	0,035299	0,03209	0,060503384	0,0586281	0,264	-0,05922	-0,011844	-0,05922	-0,02433533	-0,018670798
0,738	0,03188	0,035068	0,03188	0,06014889	0,0583058	0,262	-0,05919	-0,011838	-0,05919	-0,02443616	-0,018792341

0,74	0,03167	0,034837	0,03167	0,059792967	0,0579818	0,26	-0,05915	-0,01183	-0,05915	-0,02453685	-0,018913378
0,742	0,03146	0,034606	0,03146	0,059435617	0,0576561	0,258	-0,05911	-0,011822	-0,05911	-0,02463738	-0,01903389
0,744	0,03126	0,034386	0,03126	0,059076839	0,0573286	0,256	-0,05907	-0,011814	-0,05907	-0,02473772	-0,019153862
0,746	0,03105	0,034155	0,03105	0,058716636	0,0569995	0,254	-0,05903	-0,011806	-0,05903	-0,02483786	-0,019273275
0,748	0,03084	0,033924	0,03084	0,058355006	0,0566685	0,252	-0,05899	-0,011798	-0,05899	-0,02493776	-0,01939211
0,75	0,03063	0,033693	0,03063	0,057991951	0,0563359	0,25	-0,05894	-0,011788	-0,05894	-0,02503742	-0,019510352
0,752	0,03042	0,033462	0,03042	0,057627472	0,0560015	0,248	-0,05889	-0,011778	-0,05889	-0,02513681	-0,019627979
0,754	0,03021	0,033231	0,03021	0,057261568	0,0556654	0,246	-0,05884	-0,011768	-0,05884	-0,0252359	-0,019744975
0,756	0,03	0,033	0,03	0,056894241	0,0553276	0,244	-0,05879	-0,011758	-0,05879	-0,02533467	-0,019861319
0,758	0,02978	0,032758	0,02978	0,05652549	0,054988	0,242	-0,05873	-0,011746	-0,05873	-0,0254331	-0,019976993
0,76	0,02957	0,032527	0,02957	0,056155316	0,0546468	0,24	-0,05867	-0,011734	-0,05867	-0,02553117	-0,020091976
0,762	0,02936	0,032296	0,02936	0,05578372	0,0543038	0,238	-0,05861	-0,011722	-0,05861	-0,02562885	-0,020206248
0,764	0,02915	0,032065	0,02915	0,055410702	0,053959	0,236	-0,05855	-0,01171	-0,05855	-0,02572612	-0,02031979
0,766	0,02893	0,031823	0,02893	0,055036262	0,0536126	0,234	-0,05848	-0,011696	-0,05848	-0,02582294	-0,02043258
0,768	0,02872	0,031592	0,02872	0,054660401	0,0532644	0,232	-0,05841	-0,011682	-0,05841	-0,02591931	-0,020544596
0,77	0,0285	0,03135	0,0285	0,054283118	0,0529145	0,23	-0,05834	-0,011668	-0,05834	-0,02601518	-0,020655819
0,772	0,02829	0,031119	0,02829	0,053904414	0,0525629	0,228	-0,05827	-0,011654	-0,05827	-0,02611054	-0,020766225
0,774	0,02807	0,030877	0,02807	0,053524289	0,0522096	0,226	-0,0582	-0,01164	-0,0582	-0,02620536	-0,020875792
0,776	0,02785	0,030635	0,02785	0,053142743	0,0518545	0,224	-0,05812	-0,011624	-0,05812	-0,0262996	-0,020984497
0,778	0,02764	0,030404	0,02764	0,052759777	0,0514977	0,222	-0,05804	-0,011608	-0,05804	-0,02639325	-0,021092318
0,78	0,02742	0,030162	0,02742	0,052375391	0,0511392	0,22	-0,05795	-0,01159	-0,05795	-0,02648628	-0,02119923
0,782	0,0272	0,02992	0,0272	0,051989584	0,050779	0,218	-0,05787	-0,011574	-0,05787	-0,02657864	-0,02130521
0,784	0,02698	0,029678	0,02698	0,051602356	0,050417	0,216	-0,05778	-0,011556	-0,05778	-0,02667033	-0,021410233
0,786	0,02676	0,029436	0,02676	0,051213709	0,0500533	0,214	-0,05769	-0,011538	-0,05769	-0,0267613	-0,021514274
0,788	0,02654	0,029194	0,02654	0,050823641	0,0496879	0,212	-0,05759	-0,011518	-0,05759	-0,02685152	-0,021617308
0,79	0,02632	0,028952	0,02632	0,050432153	0,0493208	0,21	-0,0575	-0,0115	-0,0575	-0,02694097	-0,021719308
0,792	0,0261	0,02871	0,0261	0,050039244	0,0489519	0,208	-0,0574	-0,01148	-0,0574	-0,02702961	-0,021820248
0,794	0,02588	0,028468	0,02588	0,049644915	0,0485814	0,206	-0,05729	-0,011458	-0,05729	-0,02711741	-0,021920101
0,796	0,02566	0,028226	0,02566	0,049249165	0,0482091	0,204	-0,05719	-0,011438	-0,05719	-0,02720434	-0,02201884
0,798	0,02543	0,027973	0,02543	0,048851994	0,0478351	0,202	-0,05708	-0,011416	-0,05708	-0,02729035	-0,022116435
0,8	0,02521	0,027731	0,02521	0,048453402	0,0474593	0,2	-0,05697	-0,011394	-0,05697	-0,02737543	-0,022212858
0,802	0,02499	0,027489	0,02499	0,048053389	0,0470819	0,198	-0,05685	-0,01137	-0,05685	-0,02745953	-0,02230808
0,804	0,02476	0,027236	0,02476	0,047651954	0,0467027	0,196	-0,05674	-0,011348	-0,05674	-0,02754261	-0,022402071
0,806	0,02454	0,026994	0,02454	0,047249098	0,0463217	0,194	-0,05662	-0,011324	-0,05662	-0,02762465	-0,0224948
0,808	0,02431	0,026741	0,02431	0,04684482	0,0459391	0,192	-0,05649	-0,011298	-0,05649	-0,02770559	-0,022586235
0,81	0,02409	0,026499	0,02409	0,046439119	0,0455547	0,19	-0,05637	-0,011274	-0,05637	-0,02778541	-0,022676344
0,812	0,02386	0,026246	0,02386	0,046031995	0,0451687	0,188	-0,05624	-0,011248	-0,05624	-0,02786407	-0,022765094
0,814	0,02363	0,025993	0,02363	0,045623449	0,0447808	0,186	-0,0561	-0,01122	-0,0561	-0,02794151	-0,022852452
0,816	0,02341	0,025751	0,02341	0,045213478	0,0443913	0,184	-0,05597	-0,011194	-0,05597	-0,02801771	-0,022938384
0,818	0,02318	0,025498	0,02318	0,044802084	0,044	0,182	-0,05583	-0,011166	-0,05583	-0,02809262	-0,023022853
0,82	0,02295	0,025245	0,02295	0,044389265	0,0436071	0,18	-0,05569	-0,011138	-0,05569	-0,02816619	-0,023105824
0,822	0,02272	0,024992	0,02272	0,043975021	0,0432123	0,178	-0,05554	-0,011108	-0,05554	-0,02823838	-0,02318726
0,824	0,02249	0,024739	0,02249	0,043559352	0,0428159	0,176	-0,05539	-0,011078	-0,05539	-0,02830916	-0,023267123
0,826	0,02226	0,024486	0,02226	0,043142256	0,0424177	0,174	-0,05524	-0,011048	-0,05524	-0,02837846	-0,023345374
0,828	0,02203	0,024233	0,02203	0,042723734	0,0420178	0,172	-0,05508	-0,011016	-0,05508	-0,02844624	-0,023421973
0,83	0,0218	0,02398	0,0218	0,042303784	0,0416162	0,17	-0,05492	-0,010984	-0,05492	-0,02851245	-0,023496879
0,832	0,02157	0,023727	0,02157	0,041882407	0,0412128	0,168	-0,05476	-0,010952	-0,05476	-0,02857705	-0,02357005

0,834	0,02133	0,023463	0,02133	0,0414596	0,0408077	0,166	-0,05459	-0,010918	-0,05459	-0,02863998	-0,023641444
0,836	0,0211	0,02321	0,0211	0,041035365	0,0404009	0,164	-0,05442	-0,010884	-0,05442	-0,02870119	-0,023711015
0,838	0,02087	0,022957	0,02087	0,040609699	0,0399924	0,162	-0,05424	-0,010848	-0,05424	-0,02876061	-0,023778718
0,84	0,02063	0,022693	0,02063	0,040182602	0,0395821	0,16	-0,05407	-0,010814	-0,05407	-0,02881821	-0,023844507
0,842	0,0204	0,02244	0,0204	0,039754074	0,0391701	0,158	-0,05388	-0,010776	-0,05388	-0,02887391	-0,023908333
0,844	0,02016	0,022176	0,02016	0,039324113	0,0387563	0,156	-0,0537	-0,01074	-0,0537	-0,02892767	-0,023970148
0,846	0,01993	0,021923	0,01993	0,038892719	0,0383409	0,154	-0,05351	-0,010702	-0,05351	-0,02897941	-0,024029899
0,848	0,01969	0,021659	0,01969	0,03845989	0,0379236	0,152	-0,05331	-0,010662	-0,05331	-0,02902907	-0,024087535
0,85	0,01946	0,021406	0,01946	0,038025627	0,0375047	0,15	-0,05311	-0,010622	-0,05311	-0,0290766	-0,024143002
0,852	0,01922	0,021142	0,01922	0,037589927	0,037084	0,148	-0,05291	-0,010582	-0,05291	-0,02912192	-0,024196244
0,854	0,01898	0,020878	0,01898	0,037152791	0,0366616	0,146	-0,0527	-0,01054	-0,0527	-0,02916497	-0,024247203
0,856	0,01874	0,020614	0,01874	0,036714216	0,0362374	0,144	-0,05249	-0,010498	-0,05249	-0,02920567	-0,024295821
0,858	0,0185	0,02035	0,0185	0,036274202	0,0358115	0,142	-0,05228	-0,010456	-0,05228	-0,02924396	-0,024342037
0,86	0,01826	0,020086	0,01826	0,035832748	0,0353839	0,14	-0,05205	-0,01041	-0,05205	-0,02927974	-0,024385787
0,862	0,01802	0,019822	0,01802	0,035389853	0,0349545	0,138	-0,05183	-0,010366	-0,05183	-0,02931296	-0,024427007
0,864	0,01778	0,019558	0,01778	0,034945516	0,0345234	0,136	-0,0516	-0,01032	-0,0516	-0,02934352	-0,024465629
0,866	0,01754	0,019294	0,01754	0,034499735	0,0340905	0,134	-0,05137	-0,010274	-0,05137	-0,02937135	-0,024501583
0,868	0,0173	0,01903	0,0173	0,03405251	0,0336559	0,132	-0,05113	-0,010226	-0,05113	-0,02939635	-0,024534797
0,87	0,01706	0,018766	0,01706	0,033603839	0,0332196	0,13	-0,05088	-0,010176	-0,05088	-0,02941844	-0,024565198
0,872	0,01681	0,018491	0,01681	0,033153721	0,0327815	0,128	-0,05063	-0,010126	-0,05063	-0,02943752	-0,024592706
0,874	0,01657	0,018227	0,01657	0,032702155	0,0323416	0,126	-0,05038	-0,010076	-0,05038	-0,0294535	-0,024617244
0,876	0,01633	0,017963	0,01633	0,03224914	0,0319	0,124	-0,05012	-0,010024	-0,05012	-0,02946628	-0,024638727
0,878	0,01608	0,017688	0,01608	0,031794673	0,0314567	0,122	-0,04986	-0,009972	-0,04986	-0,02947575	-0,024657069
0,88	0,01584	0,017424	0,01584	0,031338755	0,0310116	0,12	-0,04959	-0,009918	-0,04959	-0,02948182	-0,02467218
0,882	0,01559	0,017149	0,01559	0,030881383	0,0305648	0,118	-0,04931	-0,009862	-0,04931	-0,02948435	-0,024683968
0,884	0,01534	0,016874	0,01534	0,030422557	0,0301162	0,116	-0,04903	-0,009806	-0,04903	-0,02948325	-0,024692336
0,886	0,0151	0,01661	0,0151	0,029962274	0,0296659	0,114	-0,04874	-0,009748	-0,04874	-0,02947839	-0,024697182
0,888	0,01485	0,016335	0,01485	0,029500533	0,0292138	0,112	-0,04845	-0,00969	-0,04845	-0,02946963	-0,024698402
0,89	0,0146	0,01606	0,0146	0,029037333	0,0287599	0,11	-0,04815	-0,00963	-0,04815	-0,02945686	-0,024695886
0,892	0,01435	0,015785	0,01435	0,028572673	0,0283043	0,108	-0,04785	-0,00957	-0,04785	-0,02943994	-0,024689521
0,894	0,0141	0,01551	0,0141	0,028106551	0,027847	0,106	-0,04753	-0,009506	-0,04753	-0,02941871	-0,024679185
0,896	0,01385	0,015235	0,01385	0,027638965	0,0273878	0,104	-0,04722	-0,009444	-0,04722	-0,02939304	-0,024664756
0,898	0,0136	0,01496	0,0136	0,027169913	0,026927	0,102	-0,04689	-0,009378	-0,04689	-0,02936275	-0,024646102
0,9	0,01335	0,014685	0,01335	0,026699395	0,0264643	0,1	-0,04656	-0,009312	-0,04656	-0,0293277	-0,024623087
0,902	0,0131	0,01441	0,0131	0,026227408	0,0259999	0,098	-0,04622	-0,009244	-0,04622	-0,02928771	-0,024595567
0,904	0,01285	0,014135	0,01285	0,025753951	0,0255337	0,096	-0,04588	-0,009176	-0,04588	-0,0292426	-0,024563392
0,906	0,0126	0,01386	0,0126	0,025279023	0,0250658	0,094	-0,04553	-0,009106	-0,04553	-0,02919217	-0,024526405
0,908	0,01234	0,013574	0,01234	0,024802621	0,0245961	0,092	-0,04517	-0,009034	-0,04517	-0,02913624	-0,024484438
0,91	0,01209	0,013299	0,01209	0,024324743	0,0241246	0,09	-0,0448	-0,00896	-0,0448	-0,02907458	-0,024437318
0,912	0,01183	0,013013	0,01183	0,023845389	0,0236514	0,088	-0,04442	-0,008884	-0,04442	-0,02900698	-0,024384859
0,914	0,01158	0,012738	0,01158	0,023364556	0,0231764	0,086	-0,04404	-0,008808	-0,04404	-0,02893321	-0,024326868
0,916	0,01132	0,012452	0,01132	0,022882242	0,0226996	0,084	-0,04365	-0,00873	-0,04365	-0,02885301	-0,024263139
0,918	0,01107	0,012177	0,01107	0,022398445	0,022221	0,082	-0,04325	-0,00865	-0,04325	-0,02876614	-0,024193454
0,92	0,01081	0,011891	0,01081	0,021913165	0,0217407	0,08	-0,04284	-0,008568	-0,04284	-0,0286723	-0,024117583
0,922	0,01055	0,011605	0,01055	0,021426398	0,0212586	0,078	-0,04242	-0,008484	-0,04242	-0,02857121	-0,024035281
0,924	0,01029	0,011319	0,01029	0,020938143	0,0207747	0,076	-0,04199	-0,008398	-0,04199	-0,02846255	-0,023946287
0,926	0,01003	0,011033	0,01003	0,020448398	0,020289	0,074	-0,04155	-0,00831	-0,04155	-0,028346	-0,023850326

0,928	0,00977	0,010747	0,00977	0,019957161	0,0198015	0,072	-0,0411	-0,00822	-0,0411	-0,02822119	-0,023747101
0,93	0,00951	0,010461	0,00951	0,019464429	0,0193123	0,07	-0,04065	-0,00813	-0,04065	-0,02808776	-0,023636297
0,932	0,00925	0,010175	0,00925	0,018970202	0,0188213	0,068	-0,04018	-0,008036	-0,04018	-0,02794528	-0,023517576
0,934	0,00899	0,009889	0,00899	0,018474476	0,0183284	0,066	-0,03969	-0,007938	-0,03969	-0,02779334	-0,023390575
0,936	0,00873	0,009603	0,00873	0,01797725	0,0178338	0,064	-0,0392	-0,00784	-0,0392	-0,02763145	-0,023254905
0,938	0,00847	0,009317	0,00847	0,017478522	0,0173374	0,062	-0,03869	-0,007738	-0,03869	-0,02745913	-0,023110145
0,94	0,0082	0,00902	0,0082	0,016978289	0,0168392	0,06	-0,03818	-0,007636	-0,03818	-0,02727581	-0,022955842
0,942	0,00794	0,008734	0,00794	0,016476549	0,0163393	0,058	-0,03764	-0,007528	-0,03764	-0,02708092	-0,022791504
0,944	0,00768	0,008448	0,00768	0,015973301	0,0158375	0,056	-0,0371	-0,00742	-0,0371	-0,02687381	-0,022616598
0,946	0,00741	0,008151	0,00741	0,015468542	0,0153339	0,054	-0,03654	-0,007308	-0,03654	-0,02665378	-0,022430542
0,948	0,00714	0,007854	0,00714	0,014962269	0,0148285	0,052	-0,03596	-0,007192	-0,03596	-0,02642007	-0,022232702
0,95	0,00688	0,007568	0,00688	0,01445448	0,0143213	0,05	-0,03537	-0,007074	-0,03537	-0,02617186	-0,022022381
0,952	0,00661	0,007271	0,00661	0,013945174	0,0138123	0,048	-0,03476	-0,006952	-0,03476	-0,02590821	-0,021798814
0,954	0,00634	0,006974	0,00634	0,013434347	0,0133015	0,046	-0,03413	-0,006826	-0,03413	-0,02562811	-0,021561154
0,956	0,00607	0,006677	0,00607	0,012921998	0,0127889	0,044	-0,03348	-0,006696	-0,03348	-0,02533045	-0,021308465
0,958	0,00581	0,006391	0,00581	0,012408124	0,0122745	0,042	-0,03281	-0,006562	-0,03281	-0,02501395	-0,021039699
0,96	0,00554	0,006094	0,00554	0,011892722	0,0117583	0,04	-0,03212	-0,006424	-0,03212	-0,02467723	-0,020753688
0,962	0,00527	0,005797	0,00527	0,011375791	0,0112403	0,038	-0,0314	-0,00628	-0,0314	-0,02431869	-0,020449111
0,964	0,00499	0,005489	0,00499	0,010857327	0,0107204	0,036	-0,03066	-0,006132	-0,03066	-0,02393654	-0,020124477
0,966	0,00472	0,005192	0,00472	0,010337328	0,0101987	0,034	-0,02989	-0,005978	-0,02989	-0,02352875	-0,019778082
0,968	0,00445	0,004895	0,00445	0,009815793	0,0096752	0,032	-0,02909	-0,005818	-0,02909	-0,02309295	-0,019407969
0,97	0,00418	0,004598	0,00418	0,009292717	0,0091499	0,03	-0,02826	-0,005652	-0,02826	-0,02262645	-0,019011871
0,972	0,0039	0,00429	0,0039	0,008768099	0,0086228	0,028	-0,0274	-0,00548	-0,0274	-0,02212604	-0,018587138
0,974	0,00363	0,003993	0,00363	0,008241936	0,0080938	0,026	-0,02649	-0,005298	-0,02649	-0,02158797	-0,018130638
0,976	0,00335	0,003685	0,00335	0,007714226	0,007563	0,024	-0,02554	-0,005108	-0,02554	-0,02100776	-0,017638623
0,978	0,00308	0,003388	0,00308	0,007184965	0,0070304	0,022	-0,02454	-0,004908	-0,02454	-0,02037993	-0,017106548
0,98	0,0028	0,00308	0,0028	0,006654151	0,0064959	0,02	-0,02349	-0,004698	-0,02349	-0,01969777	-0,016528809
0,982	0,00253	0,002783	0,00253	0,006121782	0,0059596	0,018	-0,02237	-0,004474	-0,02237	-0,01895283	-0,015898362
0,984	0,00225	0,002475	0,00225	0,005587855	0,0054215	0,016	-0,02117	-0,004234	-0,02117	-0,01813421	-0,015206139
0,986	0,00197	0,002167	0,00197	0,005052366	0,0048815	0,014	-0,01988	-0,003976	-0,01988	-0,01722753	-0,014440132
0,988	0,00169	0,001859	0,00169	0,004515314	0,0043397	0,012	-0,01849	-0,003698	-0,01849	-0,01621297	-0,013583852
0,99	0,00141	0,001551	0,00141	0,003976695	0,0037961	0,01	-0,01696	-0,003392	-0,01696	-0,01506207	-0,012613562
0,992	0,00113	0,001243	0,00113	0,003436506	0,0032506	0,008	-0,01524	-0,003048	-0,01524	-0,01373111	-0,011492833
0,994	0,00085	0,000935	0,00085	0,002894745	0,0027032	0,006	-0,01328	-0,002656	-0,01328	-0,01214651	-0,010160349
0,996	0,00057	0,000627	0,00057	0,002351409	0,002154	0,004	-0,01091	-0,002182	-0,01091	-0,0101648	-0,008496559
0,998	0,00028	0,000308	0,00028	0,001806495	0,0016029	0,002	-0,00778	-0,001556	-0,00778	-0,00741562	-0,006192824
						0	0	0	0	0	0