



**KARABÜK İLİ KIRSAL KESİMLERİ İÇİN KÜÇÜK
ÖLÇEKLİ RÜZGAR TÜRBİN TASARIMI VE
AERODİNAMİK PERFORMANS
OPTİMİZASYONU**

MEHMET TAYYİP ÖZDEMİR

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Refik POLAT**

**KARABÜK İLİ KIRSAL KESİMLERİ İÇİN KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGAR
TÜRBİN TASARIMI VE AERODİNAMİK PERFORMANS
OPTİMİZASYONU**

Mehmet Tayyip ÖZDEMİR

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Refik POLAT**

**KARABÜK
Haziran 2021**

Mehmet Tayyip ÖZDEMİR tarafından hazırlanan “KARABÜK İLİ KIRSAL KESİMLERİ İÇİN KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGAR TÜRBİN TASARIMI VE AERODİNAMİK PERFORMANS OPTİMİZASYONU” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Refik POLAT

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 18/06/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Refik POLAT (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN (KTÜN)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mehmet Tayyip ÖZDEMİR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARABÜK İLİ KIRSAL KESİMLERİ İÇİN KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGAR TÜRBİN TASARIMI VE AERODİNAMİK PERFORMANS OPTİMİZASYONU

Mehmet Tayyip ÖZDEMİR

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Refik POLAT

Haziran 2021, 96 sayfa

Ülkemizde artan nüfusla birlikte enerjiye olan ihtiyaç da artmaktadır. Bundan dolayı yenilenebilir ve temiz enerjiye olan ilgi son yıllarda önem arz etmektedir. Rüzgar türbini ise yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgar enerjisinden elektrik elde etmektedir. Bu tezde 1 kW/h elektrik üretebilen küçük ölçekli yatay eksenli rüzgar türbin tasarımı yapılmıştır. Öncelikle elektrik şebekesinin olmadığı veya zor ulaştığı bölgeler araştırılmıştır. Karabük ili Ovacık ilçesi buna uygun bir bölge olarak karar verilmiştir. Daha sonra Ovacık ilçesinin yıllık rüzgar istatistik bilgileri incelenmiştir. Bunun sonucunda 3 kanatlı ve 3 metre kanat uzunluğuna sahip bir türbin tasarlanmıştır. Kanat geometrisi belirlenirken Schmitz formülleri kullanılmıştır. Farklı airfoillerin aerodinamik performansları incelenmiştir. İncelenen airfoiller arasında NACA 4412 airfoilin en iyi performans gösterdiği anlaşılmıştır. Ancak literatürde 1 metre giriş uzunluğunda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada ise giriş uzunluğu 0,2

metre olarak belirlendiği için Ansys analiz programı kullanılarak 2 boyutlu CFD analizi yapılmıştır. Farklı hücum açılarında analiz edilen NACA 4412 airfoilin aerodinamik performansı incelenmiştir. Weibull dağılım yöntemi kullanılarak Ovacık ilçesinin rüzgar enerji potansiyeli belirlenmiş ve tasarlanan rüzgar türbininin elektrik üretimi hesaplanmıştır. Hesaplamalar neticesinde yılda 2734,8 kW/h elektrik üretimi sağlanmıştır.

1 kW/h'tan daha fazla elektrik enerjisi üretimine ihtiyaç duyulması halinde ikinci bir rüzgar türbin tasarımı yapılmıştır. Öncelikle daha yüksek rüzgar hızlarından faydalanmak için rüzgar türbini daha yükseğe konumlandırılmış ve kanat uzunluğu 10 metre olarak belirlenmiştir. Ansys analiz programı kullanılarak rüzgar türbini 3 boyutlu tasarlanmıştır. Aynı özelliklere sahip rüzgar türbini BEM teoreminde de tasarlanmıştır. Analizi yapılan rüzgar türbininin kanatlarında oluşan kuvvet, hız ve basınç değerleri elde edilmiştir. Farklı uç hız oranlarındaki güç katsayı değerleri hesaplanmıştır. BEM ve CFD sonuçları karşılaştırılmış ve BEM teoremiyle elde edilen değerlerin daha yüksek olduğu vurgulanmıştır. Hem BEM hem de CFD ile yapılan analizlerde optimum uç hız oranı 9 olarak bulunmuştur. 10 metre kanat boyundaki rüzgar türbininin güç verimi BEM yöntemiyle %56, CFD ile %43 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Sözcükler : Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, aerodinamik, rüzgar türbini

Bilim Kodu : 91411

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

SMALL SCALE WIND TURBINE DESIGN AND AERODYNAMIC PERFORMANCE OPTIMIZATION FOR RURAL SECTIONS OF KARABUK PROVINCE

Mehmet Tayyip ÖZDEMİR

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Refik POLAT

June 2021, 96 pages

With the increasing population in our country, the need for energy is also increasing. Therefore, the interest in renewable and clean energy has become important in recent years. The wind turbine obtains electricity from wind energy, which is a renewable energy source. In this thesis, a small scale horizontal axis wind turbine that can generate 1 kW/h of electricity is designed. First of all, areas where there is no electricity network or where it is difficult to reach were investigated. Karabük province Ovacık district has been decided as a suitable region. Then, annual wind statistics of Ovacık district were examined. As a result, a turbine with 3 blades and a blade length of 3 meters was designed. While determining the blade geometry, Schmitz formulas were used. The aerodynamic performances of different airfoils were investigated. Among the airfoils examined, it was found that the NACA 4412 airfoil performed the best. However, studies with a beam length of 1 meter have been carried out in the

literature. In this study, since the beam length was determined as 0.2 meters, 2-dimensional CFD analysis was performed using the Ansys analysis program. The aerodynamic performance of the NACA 4412 airfoil, which was analyzed at different angles of attack, was investigated. By using the Weibull distribution method, the wind energy potential of the Ovacık district was determined and the electricity production of the designed wind turbine was calculated. As a result of the calculations, 2734.8 kW/h of electricity was produced annually.

If more than 1 kW/h of electrical energy is needed, a second wind turbine is designed. First of all, in order to benefit from higher wind speeds, the wind turbine was positioned higher and the blade length was determined as 10 meters. The wind turbine was designed in 3D using Ansys analysis program. The wind turbine with the same features is also designed in the BEM theorem. The force, speed and pressure values formed in the blades of the analyzed wind turbine were obtained. Power coefficient values at different tip speed ratios were calculated. BEM and CFD results were compared and it was emphasized that the values obtained with the BEM theorem were higher. The optimum tip velocity ratio was found to be 9 in the analyzes performed with both BEM and CFD. The power efficiency of the wind turbine with a blade length of 10 meters was calculated as 56% by BEM method and 43% by CFD.

Key Word : Computational fluid dynamics, aerodynamics, wind turbine

Science Code : 91411

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Refik POLAT'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Bilgisayar analizlerinin yapımında ve genel tez konusunda yol göstermede yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakóltesi Makine Mühendisliği bölümü Dr. Öğr. Üyesi Mehmet BAKIRCI'ya teşekkür ederim.

Sevgili eőime ve aileme maddi manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. TEZİN AMACI	1
1.2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ	2
1.3. KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ	4
1.4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
BÖLÜM 2	8
MATERYAL VE METOT	8
2.1. KARABÜK İLİ RÜZGÂR POTANSİYELİ	8
2.2. RÜZGARDAKİ GÜÇ	11
2.3. AIRFOIL AERODİNAMİĞİ	17
2.4. AIRFOIL SEÇİMİ	22
2.5. KANAT GEOMETRİSİ	33
2.6. KANAT ELEMAN MOMENTUM (BEM) TEORİSİ	35
2.7. İKİ BOYUTLU AIRFOIL CFD ANALİZİ	40
2.8. ÜÇ BOYUTLU RÜZGÂR TÜRBİN CFD ANALİZİ	43

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3	47
BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	47
3.1. İKİ BOYUTLU CFD ANALİZ SONUÇLARI.....	47
3.2. YILLIK ENERJİ ÜRETİMİ VE RÜZGAR DAĞILIMI.....	60
3.3. BEM SONUÇLARI.....	63
3.3.1. Yüksek Performanslı Airfoil Sonuçları	63
3.3.2. Düşük Performanslı Airfoil Sonuçları	68
3.3.3. Düşük Performanslı ve Yüksek Performanslı Airfoillerin Karşılaştırması.....	72
3.4. ÜÇ BOYUTLU CFD ANALİZİ SONUÇLARI	73
3.4.1 CFD; Airfoil Etrafındaki Basınç ve Hız	74
3.4.2. CFD; Havanın Akış Yönündeki Basınç ve Hız Değişimi.....	76
3.4.3. CFD; Kanat Üzerindeki Basınç	77
3.4.4. CFD; Rüzgar Türbin Kanadına Çarpan Havanın Hız Vektörü	79
3.4.5. CFD; Havanın Kanatlara Göre Relatif (Göreceli) Hızı	80
3.4.6. BEM ve CFD Güç Katsayısı Sonuçları	81
3.4.7. BEM ve CFD Güç-Tork Sonuçları.....	82
BÖLÜM 4	88
SONUÇLAR.....	88
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Yatay eksenli rüzgar türbini [6].....	3
Şekil 1.2. Düşey eksenli rüzgar türbini [8].....	4
Şekil 2.1. Karabük ilinin 50 metre yükseklikteki rüzgar hız dağılımı [22].	8
Şekil 2.2. Karabük ilinde rüzgar türbini kurulabilir alanlar [22].	9
Şekil 2.3. Rüzgar türbini ve rüzgar arasındaki ilişki [25].....	12
Şekil 2.4. İdealleştirilmiş bir rüzgar türbini için güç katsayısı C_p ve eksenel kuvvet C_T katsayısı [25].	15
Şekil 2.5. Airfoil çeşitleri [30].	17
Şekil 2.6. Airfoilin bölümleri [30].	18
Şekil 2.7. Kaldırma ve sürükleme oranı [31].....	19
Şekil 2.8. Tasarım hücum açısı grafiği [32].	20
Şekil 2.9. Polar grafikler.....	20
Şekil 2.10. Airfoil yüzeyinde stall öncesi ve sonrası oluşan akış ayrılması [34]	21
Şekil 2.11. Akış ayrılması ve stall durumu [34].	21
Şekil 2.12. NACA 4412 ve NREL S 809 kaldırma katsayısı [35,36].....	29
Şekil 2.13. NACA 4412 ve NREL S 809 kaldırma katsayısı. [35,36].....	29
Şekil 2.14. NACA 4412 ve NREL S 809 süzülme oranı [35,36].	30
Şekil 2.15. Matris Yöntemiyle kaldırma kuvvet polinom katsayılarının hesabı	31
Şekil 2.16. Matris Yöntemiyle sürükleme kuvvet polinom katsayılarının hesabı	32
Şekil 2.17. NACA 4412 airfoili giriş uzunluğu.	35
Şekil 2.18. NACA 4412 airfoili bağlanma açısı.	35
Şekil 2.19. Hız ve açılar [25].	36
Şekil 2.20. Airfoil akış alanı [54].....	42
Şekil 2.21. Yapılandırılmış mesh.....	43
Şekil 2.22. Rüzgar türbin akış alanı.	44
Şekil 2.23. Geometri yüzeylerinin isimlendirilmesi.	44
Şekil 2.24. Akış alanına uygulanan mesh işlemi.	45

Şekil 2.25. Rüzgar türbin kanadına uygulanan lokal mesh yöntemi.....	45
Şekil 3.1. NACA 4412 kaldırma katsayısı.....	47
Şekil 3.2. NACA 4412 sürükleme katsayısı.	48
Şekil 3.3. NACA 4412 süzülme oranı (C_L/C_D).....	49
Şekil 3.4. NACA 4412 stall sonrası kaldırma katsayı değerleri	51
Şekil 3.5. NACA 4412 stall sonrası sürükleme katsayı değerleri.....	51
Şekil 3.6. NACA 4412 airfoilin 0° hücum açısındaki hızı	52
Şekil 3.7. NACA 4412 airfoilin 0° hücum açısındaki basıncı.	52
Şekil 3.8. NACA 4412 airfoilin 2° hücum açısındaki hızı	53
Şekil 3.9. NACA 4412 airfoilin 2° hücum açısındaki basıncı.	53
Şekil 3.10. NACA 4412 airfoilin 5° hücum açısındaki hızı.	54
Şekil 3.11. NACA 4412 airfoilin 5° hücum açısındaki basıncı.	54
Şekil 3.12. NACA 4412 airfoilin 8° hücum açısındaki hızı	55
Şekil 3.13. NACA 4412 airfoilin 8° hücum açısındaki basıncı.	55
Şekil 3.14. NACA 4412 airfoilin 10° hücum açısındaki hızı	56
Şekil 3.15. NACA 4412 airfoilin 10° hücum açısındaki basıncı	56
Şekil 3.16. NACA 4412 airfoilin 12° hücum açısındaki hızı	57
Şekil 3.17. NACA 4412 airfoilin 12° hücum açısındaki basıncı.	57
Şekil 3.18. NACA 4412 airfoilin 15° hücum açısındaki hızı.	58
Şekil 3.19. NACA 4412 airfoilin 15° hücum açısındaki basıncı.	58
Şekil 3.20. NACA 4412 airfoilin 18° hücum açısındaki hızı.	59
Şekil 3.21. NACA 4412 airfoilin 18° hücum açısındaki basıncı.	59
Şekil 3.22. Karabük İli Ovacık İlçesine ait aylık rüzgar dağılımı.....	61
Şekil 3.23. Karabük İli Ovacık ilçesine ait yıllık rüzgar dağılımı.	61
Şekil 3.24. Güç eğrisi.	62
Şekil 3.25. Yıllık enerji üretimi dağılımı.....	62
Şekil 3.26. Yüksek performanslı airfoilin aerodinamik katsayıları.	64
Şekil 3.27. Stall öncesi a) kaldırma katsayısı b) sürükleme katsayısı c) süzülme oranı	64
Şekil 3.28. Stall sonrası a) kaldırma katsayısı b) sürükleme katsayısı c) süzülme oranı	65
Şekil 3.29. Yüksek performanslı airfoil kullanılan BEM sonuçları.	65

Sayfa

Şekil 3.30. Kanat boyunca airfoil boyu ve bağlanma açısının değişimi.	66
Şekil 3.31. Eksenel (a) ve teğetsel (a') hız indüksiyon katsayı değerleri.	66
Şekil 3.32. Airfoil kaldırma katsayı C_L değerinin kanat boyunca değişimi.	67
Şekil 3.33. Eksenel ve teğetsel kuvvetin kanat boyunca değişimi.....	67
Şekil 3.34. Kanat boyunca güç verimi ve torkun değişimi.....	68
Şekil 3.35. Düşük performanslı airfoilin aerodinamik katsayıları	68
Şekil 3.36. Stall öncesi a) kaldırma katsayısı b) sürüklenme katsayısı c) süzülme oranı	69
Şekil 3.37. Stall sonrası a) kaldırma katsayısı b) sürüklenme katsayısı c) süzülme oranı	69
Şekil 3.38. Kanat boyunca airfoil boyu ve bağlanma açısının değişimi.	70
Şekil 3.39. Eksenel (a) ve teğetsel (a') hız indüksiyon katsayı değerleri	70
Şekil 3.40. Airfoil kaldırma katsayı C_L değerinin kanat boyunca değişimi.	71
Şekil 3.41. Eksenel ve teğetsel kuvvetin kanat boyunca değişimi.....	71
Şekil 3.42. Kanat boyunca güç verimi ve torkun değişimi.....	72
Şekil 3.43. Rüzgar türbin kanat kesit etrafındaki basınç konturları.	74
Şekil 3.44. Rüzgar türbin kanat kesit etrafındaki hız konturları.	75
Şekil 3.45. Havanın basınç değerinin akış doğrultusunda değişimi.....	76
Şekil 3.46. Havanın hız değerinin akış doğrultusunda değişimi.....	77
Şekil 3.47. Kanat Üzerindeki Basınç.	78
Şekil 3.48. Kanat boyunca oluşan basınç katsayısı.	79
Şekil 3.49. Kanat Etrafında Oluşan Hız Vektörleri.....	79
Şekil 3.50. Havada oluşan dönme hareketi.....	80
Şekil 3.51. C_p - λ ; BEM ve CFD sonuçları.....	81

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Ovacık ilçesi 2020 yılı şubat ayı saatlik rüzgar verileri [23].....	10
Çizelge 2.2. NACA63-215 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.	22
Çizelge 2.3. NACA63-218 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.	23
Çizelge 2.4. NACA63-221 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.	23
Çizelge 2.5. NACA63-415 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.	24
Çizelge 2.6. NACA63-421 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.	24
Çizelge 2.7. NREL S 809 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.	25
Çizelge 2.8. DU 91-W2-250 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.....	25
Çizelge 2.9. NACA 4412 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.....	26
Çizelge 2.10. RISø-A1-18 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.	26
Çizelge 2.11. FX66-S 196-V1 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.	27
Çizelge 3.1. NACA 4412 Stall öncesi aerodinamik katsayılar	50
Çizelge 3.2. NACA 4412 stall sonrası aerodinamik katsayılar	50
Çizelge 3.3. BEM teoremi tork sonuçları.....	82
Çizelge 3.4. BEM teoremi güç sonuçları	83
Çizelge 3.5. BEM teoremi güç katsayı değerleri.....	83
Çizelge 3.6. CFD analizi tork sonuçları.....	84
Çizelge 3.7. CFD analizi güç sonuçları.....	84
Çizelge 3.8. CFD analizi güç katsayı değerleri.	84
Çizelge 3.9. BEM teoremi tork sonuçları.....	85
Çizelge 3.10. BEM teoremi güç sonuçları	85
Çizelge 3.11. BEM teoremi güç katsayı değerleri.....	86
Çizelge 3.12. CFD analizi tork sonuçları.....	86
Çizelge 3.13. CFD analizi güç sonuçları.....	86
Çizelge 3.14. CFD analizi güç katsayı değerleri.	87

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- α : hücum açısı
(α)_T : tasarım hücum açısı
 β : burulma açısı
 ω : açısal hız(rad/s)
R : rotor yarıçapı (m)
V : rüzgâr hızı (m/s)
W : bağıl rüzgâr hızı (m/s)
 λ : uç hız oranı (-)
 λ_T : tasarım uç hız oranı (-)
 σ : normal gerilme
 σ_c : tek eksenli basınç dayanımı
(C_L)_T : tasarım kaldırma katsayısı (-)
B : kanat sayısı
 μ : dinamik viskozite (Pa.s)
 α : aksenal indüksiyon faktörü (-)
 α' : teğetsel indüksiyon faktörü (-)
A : türbin kanatları tarafında süpürülen alan (m²)
 C_D : sürüklenme kuvveti katsayısı (-)
 C_L : kaldırma kuvveti katsayısı (-)
 C_P : güç katsayısı (-)
 C_y : aksenal kuvvet katsayısı (-)
 C_x : teğet kuvvet katsayısı (-)
C : airfoil giriş uzunluğu (kanat genişliği) (m)
 P_{max} : maksimum güç (W)
r : kanat eleman uzaklığı (m)
 F_x : itme kuvveti (aksenal kuvvet) (N)

- T : tork (N.m)
- F_y : rotor üzerindeki teğetsel kuvvet (N)
- V_2 : rotor üzerindeki aksenal rüzgâr hızı (m/s)
- V_1 : serbest (rotor düzlemine yaklaşan) rüzgâr hızı (m/s)
- V_3 : rotor düzlemini terkeden rüzgâr hızı (m/s)
- β : kanadın rotor düzlemine bağlanma açısı (derece)
- φ : akış açısı; bağıl hız ile rotor düzlemi arasındaki açı (derece)
- ρ : hava yoğunluğu (kg/m³)

KISALTMALAR

HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

CFD : Computational Fluid Dynamics

BEM : Blade Element Momentum Theory

NACA : National Advisory Committee for Aeronautics

NREL : National Renewable Energy Laboratory

DU : Delft University

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Ülkemizdeki hızlı nüfus artışıyla birlikte rüzgârdan enerji elde etme, son yıllarda önemli ölçüde gelişme göstermektedir. Rüzgâr enerjisinin yenilenebilir, temiz ve sonsuz olması bu gelişmenin önemli sebeplerindendir. Bununla birlikte sanayisi gelişmiş ülkelerin birbirleri ile olan rekabetleri de rüzgâr enerjisine olan önemi artırmıştır. Bu bağlamda rüzgâr türbinlerinin daha da geliştirilmesi önem arz etmektedir. Rüzgâr türbinlerinin dayanıklılığının artırılması, verimliliğinin artırılması ve farklı rüzgâr hızlarında en uygun tasarımın yapılması için tüm dünyada çalışmalar devam etmektedir [1–3].

Rüzgârdan elde edilen enerjinin çok büyük bir bölümü geniş arazilerde kurulan ve şebekeye bağlı olan büyük ticari rüzgâr türbinlerinden elde edilmektedir. Oysa, dünya nüfusunun büyük çoğunluğu kırsal kesimlerde yaşamakta ve büyük bölümü şebekeden elektrik enerjisi temin edememektedir. Bu nedenle küçük ve şebekesiz yerlerde rüzgâr yardımıyla enerji temini yüksek bir potansiyele sahiptir.

Özellikle ülkemizin kırsal kesimlerinde kendi elektriğini kendi arazisinde veya binasının üstünde üretmek isteyenler için verimi yüksek küçük rüzgâr türbinlerine ihtiyaç vardır. Ayrıca, küçük rüzgâr türbinlerinin kullanımı için çiftlik evleri, tarım arazileri, radyo ve orman kuleleri, balık çiftlikleri, seralar vb. yerler de söz konusudur.

1.1. TEZİN AMACI

Ülkemizdeki kırsal kesimlerde yaşayan ve tarımla uğraşan birçok aile mevcuttur. Bu ailelerin bir kısmı ise Karabük'te bulunmaktadır. Karabük il nüfusunun %30'u kırsalda yaşamaktadır ve bu oranın büyük bir kısmı ise tarımla uğraşmaktadır. Karabük

iline bağılı Ovacık ilçesinde toplam tarım ve orman alanı yaklaşık 33,000 hektardır [4]. Bu bölgede küçük kulübe ve çiftlik evlerinde yaşayan aileler mevcuttur. Bu bölgedeki bazı yaşam alanlarına elektrik şebekesi ulaşmamakta veya elektrik enerjisini temin etmekte sorun yaşamaktadırlar. Bu bağlamda bölgede yaşayan insanların temel ihtiyaçlarını karşılaması için gerekli elektrik enerjisi küçük ölçekli rüzgâr türbinleriyle elde edilebilir.

Bu tezde ise temel ihtiyaçların karşılanabilmesi için 1 Kw/h elektrik enerjisi üretebilen küçük ölçekli rüzgâr türbini tasarlanacak ve aerodinamik performansı analiz edilecektir. Ardından daha yüksek elektrik enerjisine ihtiyaç duyulması durumunda ikinci bir rüzgâr türbini tasarlanacaktır. İlk olarak Karabük iline ait rüzgâr verileri incelenerek rüzgâr potansiyeli açısından uygun bir bölge seçilecektir. Daha sonra Schmitz formülleri kullanılarak rüzgâr türbin kanatları tasarlanacak ve düşük rüzgâr hızlarında yüksek performans gösteren airfoil (kanat kesiti) seçilecektir. BEM (kanat eleman momentum) teoremi ve CFD (HAD:hesaplamalı akışkanlar dinamiği) kullanılarak aerodinamik hesaplamalar yapılacaktır. 2 boyutta ve 3 boyutta tasarlanacak olan rüzgâr türbinlerinin güç verimleri hesaplanacaktır. Literatürdeki birçok çalışmada aynı airfoillerin aerodinamik değerlerinin farklı olduğu anlaşılmış olup düşük performans ve yüksek performans gösteren airfoillerin aerodinamik değerleri BEM teoremiyle hesaplanarak bu farklılığın sebepleri ortaya konulacaktır.

1.2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

Rüzgâr türbinleri her geçen gün enerji alanında daha da önemli hale gelmektedir. Rüzgâr türbinleri, rüzgârdan aldıkları kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir [3]. Tarihte yel değirmenleri olarak başlayan ve günümüzde önemli bir elektrik enerjisi üretimi haline gelen rüzgâr türbinleri farklı tasarımlar içermektedir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri ve düşey eksenli rüzgâr türbinleri olarak iki çeşittir.

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde rotor kanatları rüzgârın yönüne dik şekilde konumlandırılır. Böylelikle rüzgârdan maksimum enerji kazanılır. En yaygın olarak kullanılan rüzgâr türbin tipi yatay eksenli rüzgâr türbinleridir [5]. Yatay eksenli rüzgâr

türbinlerinin rotor kanat sayıları tasarımlara göre 2,3,5 kanatlı vb. olarak farklılık gösterir.

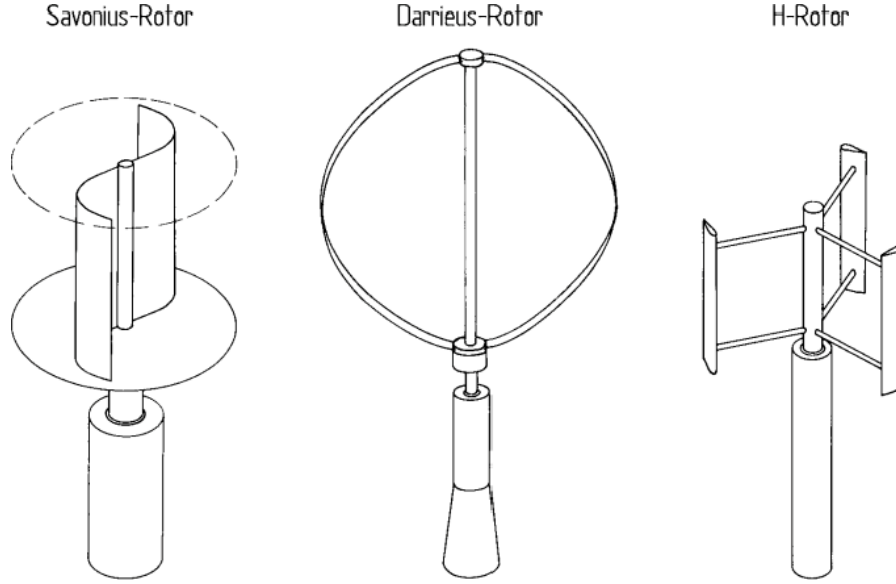


Şekil 1.1. Yatay eksenli rüzgâr türbini [6].

Yatay eksenli bir rüzgâr türbini sistemi için, sistem dönüşümünün verimliliği kanat şekli ile ilgilidir. Bu nedenle, mümkün olan en verimli kanat şeklini tasarlamak çok önemlidir. BEM teoremi, bir yatay eksenli rüzgâr türbini kanat şeklini tasarlariken yaygın olarak kullanılır ve oldukça basit bir işlem kullanarak performansını tahmin eder [7]. Bu teori ile optimum kanat şeklini elde etmek için, airfoil kiriş uzunluğunun ve bağlanma açısının kanat boyunca değişim ölçüleri ile iki boyutlu airfoil aerodinamik verileri birleştirilir. Yatay eksenli bir rüzgâr türbininin kanat optimizasyonu, airfoil tasarım uç hız oranında (λ_T) ve tasarım hücum açısında (α_T) gerçekleştirilir. Türbin performansının tahmin edilebilmesi için kanat aerodinamiğinin tahmin edilebilmesi gerekir. Sayısal aerodinamik tahmin için iki ana yöntem vardır. Birincisi, Kanat Elemanı Momentum (Blade Element Momentum; BEM) teorisini kullanmak. İkincisi ise Navier-Stokes denklemlerini çözmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği kullanmak.

Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde ise yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin aksine rotor dönme eksenine yere dik olarak konumlandırılır. Darrieus ve Savinuous olmak üzere iki tipi vardır. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin aksine

farklı yönden gelen rüzgarlarla da rotor mili dönme hareketi yapar. Ancak yüksek hızlı rüzgarlarda yatay eksenli rüzgâr türbinleri kadar performans göstermez.



Şekil 1. 2. Düşey eksenli rüzgar türbini [8].

Rüzgâr türbinleri, kanatları döndüren kuvvetlere göre sınıflandırıldığında kaldırma tipi rüzgâr türbinleri ve sürüklenme tipi rüzgâr türbinleri olmak üzere iki çeşit türbinden bahsedilir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin hepsi kaldırma tipi rüzgâr türbinleridir. Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin ise bir kısmı kaldırma, bir kısmı da sürüklenme kuvvetini kullanarak enerji üretirler. Savonius rüzgâr türbinleri sürüklenme tipi, Darrieus rüzgâr türbinleri ise kaldırma tipi rüzgâr türbinlerine örnek olarak gösterilebilir.

1.3. KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

Küçük ölçekli rüzgâr türbinleri, 200 m² den daha az rotor süpürme alanına sahip genel gücü 50 kW'a kadar ulaşan türbinlerdir [9]. Bu tip rüzgâr türbinleri elektrik şebekesinin ulaşmadığı orman köylerindeki kulübeler, tarımla uğraşan kişilerin çiftlik evleri vb. için kendi kendine yetebilen ve bağımsız güç üretebilen güvenilir sistemlerdir [10]. Basit olan yapısı, küçültülmüş tasarımı ve taşınabilir olması bu rüzgâr türbinlerinin kırsal alanlar, banliyö bölgesi ve hatta büyük çapta rüzgâr türbinlerinin çeşitli nedenler ile kabul alamadığı nüfuslu, şehir alanlarında hayati

önem taşıyan güç üreticisi olmasını sağlamıştır [11]. Küçük ölçekli rüzgâr türbinleri, büyük rüzgâr türbinlerine göre daha yüksek dönme hızlarına sahiptir. Bundan dolayı daha yüksek kanat uç hız oranına sahiptirler [12]. Küçük rüzgâr türbinlerinde 0.25 veya üzeri güç katsayısı değerlerine günümüzde ulaşılmaktadır. Büyük rüzgâr türbinlerinde bu değer 0.45 civarlarındadır [13].

1.4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Rüzgâr türbini tasarımı ve optimizasyonunda birçok parametre mevcuttur. Bunlardan bazıları rüzgâr türbininin kurulacağı alanın rüzgâr potansiyeli, türbinin boyutu, kanadın aerodinamik performansdır.

Koşar vd. Kayseri-Pınarbaşı bölgesine uygun küçük ölçekli rüzgar türbini aerodinamik tasarımı yapmışlardır. Bölgenin rüzgar potansiyeline uygun olabilecek 3 metre kanat boyunda ve sabit hızlı bir türbin tasarlanmıştır. Aerodinamik performanslarını elde etmek için ise BEM teoremi kullanılmıştır. Düşük Reynolds sayısına sahip kanat profilleri kullanılmıştır. Yıllık rüzgar dağılımını hesaplamak için ise Rayleigh yöntemi kullanılmıştır. Yıllık 1295,5 kW/h enerji üreteceği sonucuna ulaşılmıştır [12].

Bilir vd. yaptıkları çalışmada İzmir bölgesine uygun 2 kW/h kapasiteli 3 farklı türbinin saatlik güç üretimini hesaplamışlardır. En düşük nominal hıza sahip olan rüzgar türbininin daha yüksek güç ürettiği vurgulanmıştır. Yıllık elektrik üretimi ise 1239,5 kW/h bulunmuştur [14].

Bakırcı, doktora çalışmasında yatay eksenli rüzgâr türbin optimizasyonu yapmıştır. BEM teoremi, CFD simülasyonu ve deneysel çalışmalarla elde ettiği sonuçların uyumunu irdelemiştir. Tasarladığı türbinin tasarım ve uç hız oranlarını hesaplamıştır [15].

Kumar, farklı airfoil çeşitlerinden olan NACA4412 ile NREL S 809 airfoillerinin aerodinamik performanslarını hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile simüle etmiş ve karşılaştırmıştır. Sonuç olarak ise NACA serisi aerodinamik performansının NREL serisine göre daha iyi olduğunu vurgulamıştır [16].

Ravi vd., yaptıkları çalışmada NACA4412 airfoilinın kaldırma ve sürüklenme katsayılarını CFD ile hesaplamışlardır. Airfoil üzerindeki akışın laminerden türbülansa geçişini irdelemek için türbülans modelini k-omega SST transition olarak tercih etmişlerdir. Bu türbülans modeli ile elde ettikleri değerleri, Spalart Almaras türbülans modeli ve rüzgar tünel deneyi sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmanın sonucunda ise bir uyum olduğunu gözlemlemişlerdir [17].

Ajao vd., küçük ölçekli ve 3 kanatlı yatay eksenli rüzgar türbininin teorik ve deneysel güç değerlerini incelemişlerdir. 14,9 metre yüksekliğindeki bir kulenin üzerine 2,15 metre uzunluğundaki kanatları yerleştirmişlerdir. Bölgede rüzgar hızı genelde 3,5 m/s'den düşük olduğu için türbinin güç üretme zamanı beklenenden düşük olmuştur. Aynı rüzgar türbinini bilgisayar ortamında analiz etmişler ve elde edilen güç değeri 536 watt iken deneysel sonuçlar 80 watt olarak ölçülmüştür. Buldukları sonuçları kullanarak hem deneysel hem de teorik güç değerlerini dördüncü dereceden polinom fonksiyon olarak ifade etmişlerdir. Güç değerleri üzerinde havanın yoğunluğunun hiçbir etkisi olmadığını göstermişlerdir [18].

Mahari vd., Kanat Eleman Momentum teorisiyle tasarlanan rüzgar türbininin kanat performans hesabında, değişken parametreler arasındaki bağlantıyı kuran eksenel indüksiyon faktörünün iterasyonla hesaplanmasında yakınsama ve ıraksama sorunlarının giderilmesi için formüller geliştirmişlerdir [19].

Kogaki vd., yaptıkları çalışmada rüzgar türbinlerinde airfoil performansını etkileyen vortex (girdap) üreticilerini incelemişlerdir. CFD yöntemi ve rüzgar tüneline yaptıkları çalışmaların sonucunda, küçük ölçekli rüzgar türbinlerinde kanat kesit geometrisine sahip vortex üreticilerinin dikdörtgen kesitlilere göre daha verimli olduğunu gözlemlemişlerdir [20].

Bakırcı, yüksek lisans tezi olarak kanat eleman ve momentum teoremlerini kullanarak maksimum güç oluşturabilecek kanat geometrisinin ölçülerini hesaplamıştır. Daha sonra oluşturduğu bu kanattan elde edilecek performansı BEM teoremi kullanarak hesaplamıştır [21].

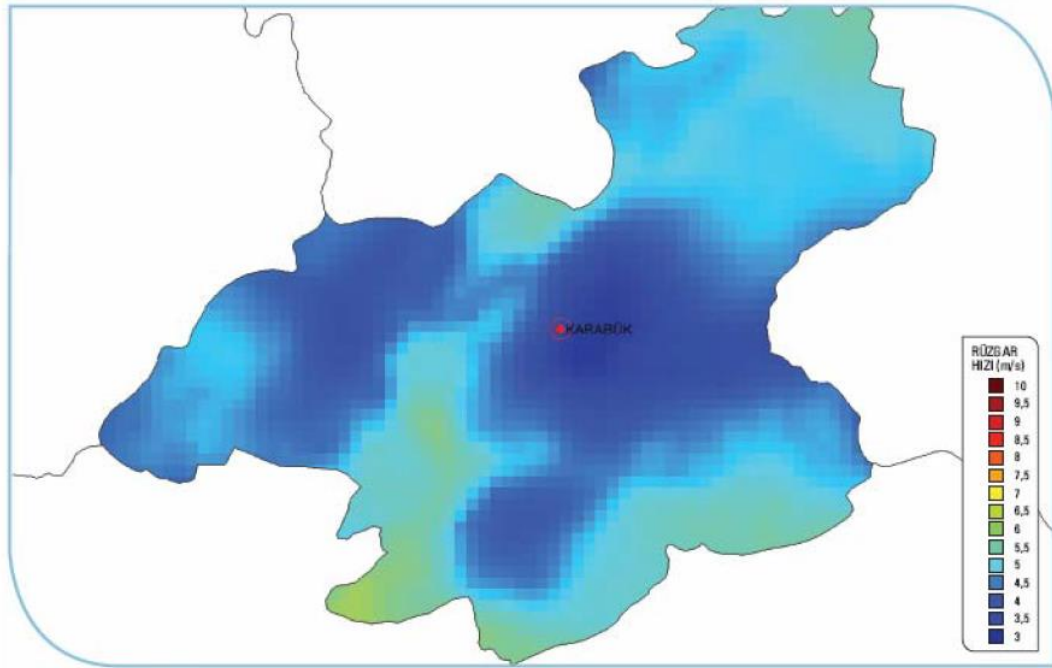
McCosker, çalışmasında küçük ölçekli rüzgar türbininin tasarımı ve optimizasyonunu incelemiştir. İncelediği rüzgar türbinini için airfoil, kanat açısı ve kiriş uzunluğunu belirlemiştir. Bunun için açısal momentum korunumu ve airfoil üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetlerden faydalanmıştır. İki farklı airfoil için analizler yaparak maximum verimli olacak türbin tasarımı parametrelerini incelemiştir. Küçük lekli rüzgar türbin tasarımının verimliliğini etkileyen en önemli etkenin kanadın boyu ve gövde merkezinin yüksekliliği olduğunu ifade etmiştir [22]

BÖLÜM 2

MATERYAL VE METOT

2.1. KARABÜK İLİ RÜZGÂR POTANSİYELİ

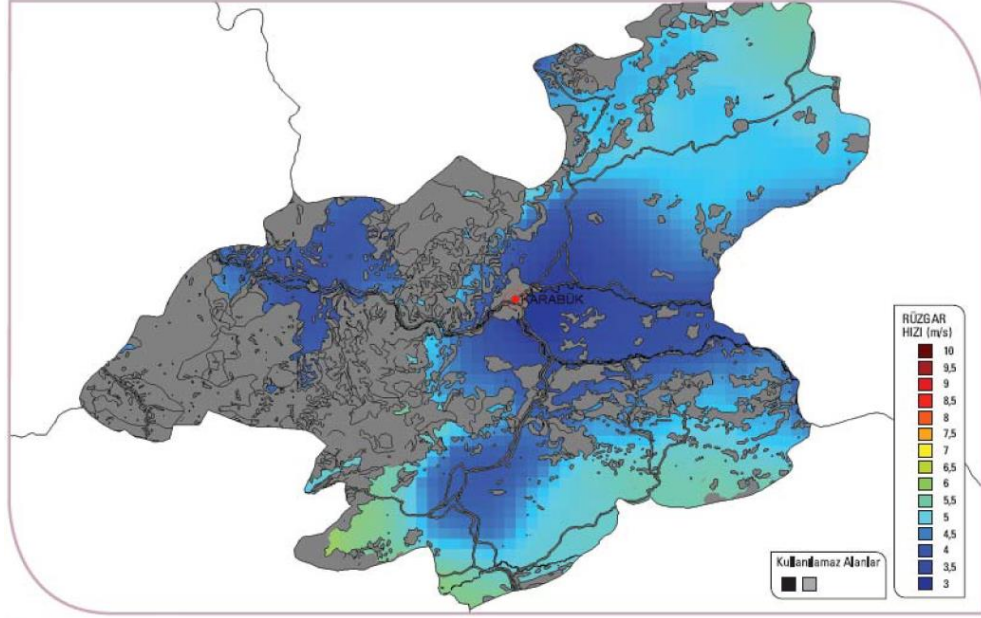
Karabük, Türkiye'nin Karadeniz bölgesinde bulunan bir ildir. Rüzgâr potansiyeli açısından düşük rüzgâr hızına sahiptir. Karabük ili için rüzgar verileri Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Karabük ilinin 50 metre yükseklikteki rüzgar hız dağılımı [23].

Şekil 2.1'de verilen rüzgâr hız dağılımına bakıldığında Eskipazar ve Ovacık ilçelerinde rüzgâr hızı potansiyeli diğer alanlara göre daha yüksektir. Bu bölgelerde tarım ve ormanla uğraşan birçok aile mevcut olduğu için küçük ölçekli rüzgâr türbini kurulmasıyla birlikte birçok aile elektrik enerjisine sahip olacaktır.

Karabük ilinin diğer bölgeleri incelendiğinde rüzgâr türbininin kurulabileceği potansiyel alanlar Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Karabük ilinde rüzgar türbini kurulabilir alanlar [23].

Şekil 2.2’de gri renkte gösterilen alanlar yeterli rüzgâr hızı potansiyeline sahip olmadığı için rüzgâr türbinini kurulamaz. Eskipazar ve Ovacık ilçelerine bakıldığında rüzgâr hızı potansiyeli daha yüksek olduğu için rüzgâr türbini kurulması uygun olabilir.

Çizelge 2.1. Ovacık ilçesi 2020 yılı şubat ayı saatlik rüzgar verileri [24].

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü																								
Yıl/Ay: 2020/2 İstasyon Adı/No: KARABÜK/OVACIK/18266																								
Saatlik Ortalama Rüzgar hızı m/sn																								
Gün/Saat	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	8,1	8,4	7,0	7,2	6,2	6,5	5,1	6,3	5,7	4,9	5,6	4,7	4,5	4,9	4,3	3,6	4,0	4,2	5,8	6,3	6,8	6,8	6,6	6,9
2	4,0	5,5	5,0	7,0	7,5	4,5	2,9	2,9	3,2	4,7	4,6	5,0	6,7	8,1	7,0	7,2	8,7	8,2	6,7	6,6	5,7	6,1	5,7	5,3
3	4,9	4,1	4,8	5,1	4,9	4,6	4,0	4,5	7,0	6,4	6,9	7,3	7,5	8,2	8,1	7,6	6,4	7,4	7,0	7,0	4,4	6,3	8,8	8,5
4	7,5	6,1	2,3	1,6	1,5	3,3	1,8	0,9	1,7	3,7	3,4	3,4	5,0	4,2	5,1	6,7	8,8	7,5	5,8	6,4	7,2	7,0	7,8	8,9
5	9,9	9,6	9,2	8,8	8,0	9,9	7,4	6,7	7,6	7,3	8,4	9,2	6,6	7,1	5,8	8,0	7,7	9,0	7,3	6,4	6,6	10,1	9,1	8,7
6	8,1	8,2	6,5	5,4	3,6	4,9	5,2	4,8	2,6	3,8	4,4	3,4	3,7	4,1	7,1	8,3	8,1	8,0	5,4	5,1	5,8	5,7	4,3	4,4
7	4,1	3,7	3,8	3,9	4,1	5,0	3,8	4,0	3,5	5,2	4,9	5,0	4,9	4,9	5,7	3,4	4,7	7,0	6,2	5,8	4,2	5,2	4,0	3,6
8	3,3	4,1	5,2	5,9	6,0	5,4	4,7	4,6	4,3	5,7	5,5	6,0	5,0	6,4	6,8	5,2	3,2	3,5	3,7	4,3	5,0	4,6	4,7	4,9
9	5,2	5,1	5,2	5,5	5,1	4,4	3,9	4,9	5,3	5,1	5,2	5,6	5,0	4,2	4,3	3,9	3,2	3,2	4,0	5,2	5,5	4,3	4,9	1,5
10	1,2	1,5	0,09	0,6	0,6	0,5	0,7	1,3	1,3	1,7	1,0	2,5	3,7	3,1	3,0	4,6	6,8	7,2	7,8	7,2	7,2	6,1	6,4	8,5
11	8,8	8,3	8,6	9,2	9,8	10,2	9,5	7,5	7,5	9,6	7,7	6,8	4,9	3,7	3,1	4,4	5,4	4,5	6,6	8,2	8,1	8,5	7,3	5,9
12	4,5	2,0	3,4	3,2	5,3	5,6	5,1	4,4	6,1	8,7	5,9	4,8	4,4	3,7	3,5	2,9	3,2	2,3	3,3	4,7	3,5	2,3	3,6	3,6
13	3,8	4,7	4,6	4,6	4,6	4,5	6,5	5,9	5,2	3,8	4,5	4,1	4,2	4,6	5,0	3,5	4,3	4,5	5,3	6,4	6,4	5,9	6,2	6,7
14	6,0	5,9	5,1	4,3	2,4	3,9	2,2	5,4	4,3	3,9	6,8	8,1	7,7	5,4	9,0	11,0	9,0	5,4	5,1	3,8	4,6	2,4	3,6	5,8
15	3,2	3,3	2,9	1,7	1,8	1,0	1,6	1,6	1,3	1,5	1,7	1,2	1,2	1,0	0,4	0,7	1,6	0,8	0,5	0,8	0,8	1,3	1,3	1,6
16	1,0	1,4	1,6	1,9	1,6	2,4	2,2	2,1	2,6	3,1	3,3	2,6	2,0	1,5	1,3	2,7	2,4	1,5	2,1	2,3	2,2	3,1	3,1	3,3
17	1,8	1,5	1,3	1,2	0,9	0,7	1,1	1,0	1,0	1,4	1,7	1,0	1,1	0,9	0,9	1,4	1,8	1,5	1,6	1,9	1,4	1,2	1,3	1,8
18	1,7	2,4	2,1	2,2	2,2	1,4	1,2	2,4	3,3	3,2	3,5	2,5	2,5	2,5	3,2	2,2	1,9	2,4	4,7	6,1	5,7	2,7	1,7	1,8
19	1,8	1,8	2,4	1,3	0,9	0,9	0,8	1,1	2,2	2,4	3,9	2,7	3,0	2,9	1,9	1,8	1,1	1,4	2,1	1,9	2,1	1,1	1,4	1,0
20	1,1	1,2	1,6	1,2	0,7	0,9	1,4	3,3	3,8	4,1	3,5	2,3	2,3	1,8	1,2	1,1	1,2	1,0	0,8	1,5	1,4	4,5	1,8	0,9
21	0,6	0,9	0,3	0,5	1,6	0,9	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7	1,3	0,9	1,2	1,6	1,5	1,4	3,4	3,9	3,5	3,6	3,1	3,5	3,3
22	3,4	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,2	3,7	3,2	3,1	4,8	4,8	3,8	4,0	4,2	3,6	3,4	3,7	3,4	2,0	1,6	2,3	2,2	0,6
23	0,3	0,6	1,1	1,3	0,9	0,8	0,7	0,8	0,4	1,3	1,7	0,9	1,5	1,0	0,8	1,4	1,4	1,9	2,8	4,1	3,5	5,1	4,5	9,1
24	8,8	8,7	9,2	9,1	8,8	8,7	8,9	7,7	10,4	9,2	7,9	8,0	8,8	6,7	6,6	7,5	5,0	6,2	7,2	4,1	3,4	6,2	6,0	5,5
25	4,7	2,2	2,5	2,3	1,9	1,8	1,5	1,5	1,7	1,0	1,0	1,8	2,5	2,5	1,3	1,8	3,1	3,5	4,2	3,5	4,9	4,2	4,9	3,9
26	2,0	2,5	2,6	2,4	2,8	3,7	4,4	8,2	7,0	8,6	9,4	9,0	6,3	9,4	10,7	9,2	9,2	12,0	9,3	7,5	9,2	7,2	5,4	5,8
27	7,4	6,2	5,3	5,8	7,5	6,8	5,7	5,8	7,7	8,2	5,3	7,5	6,8	8,7	10,1	4,7	5,3	4,3	4,6	4,6	6,1	5,8	7,6	9,1
28	5,2	5,2	5,1	5,4	5,3	5,9	4,3	3,2	3,0	2,7	3,7	4,6	5,5	4,4	5,1	4,0	3,9	3,1	2,4	2,8	3,5	2,2	1,0	1,6
29	0,9	1,5	2,2	2,3	1,8	1,0	1,1	1,7	1,1	1,8	2,1	1,8	3,3	4,7	5,0	4,1	3,7	4,3	3,6	4,0	2,6	3	3,1	3,3

Karabük Meteoroloji İl Müdürlüğünden Karabük iline ait tüm ilçelerin 10 metre yükseklikten ölçülen detaylı rüzgâr verileri alınmıştır [24]. Rüzgâr türbini kurulabilecek alanların verileri incelenmiştir. Bu veriler arasında yıllık, aylık ve saatlik rüzgâr değerleri mevcuttur. Eskipazar, Ovacık ve Safranbolu ilçelerinin 2020 yılına ait 12 ay boyunca saatlik rüzgâr verileri incelenmiştir. İncelemeler neticesinde Ovacık ilçesinin ortalama rüzgâr potansiyeli diğer ilçelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. 9-10 metre yükseklikte ortalama rüzgar hızı 5 m/s olarak görülmektedir. Bu yüzden Ovacık ilçesinin verileri baz alınarak rüzgâr türbininin tasarımı ve incelenmesi yapılacaktır. Bu tezde kurulacak olan rüzgâr türbini küçük ölçekli bir rüzgâr türbini olduğu için yüksekliği düşük olacaktır. Bunun için düşey rüzgâr profili için güç yasası denklemi kullanılarak, ilgili yükseklikteki ortalama rüzgâr hızı hesaplanabilir [22].

$$V_2 = V_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1’de V_1 hızı, rüzgâr hızının ölçüldüğü h_1 yüksekliğine karşılık gelmektedir. V_2 hızı ise rüzgâr türbinin tasarlanacağı yükseklik olan h_2 yüksekliğine karşılık gelen rüzgâr hızıdır. Son olarak ise α değeri genel koşullar için geçerli olan $1/7$ ’dir [25].

Tasarlanacak olan rüzgâr türbini küçük ölçekli olacağı için yerden yüksekliği de düşük olmalıdır. Türbinin yüksekliği ile türbin kanat uzunluğu arasında bir denge vardır. Çünkü kanatlar yerden ne kadar yüksek olursa karşılaşacakları rüzgâr hızı da o kadar yüksek olacaktır. Ovacık ilçesinin kırsal kesimlerine bakıldığında yerleşim yerleri ortalama 2 katlıdır. Bu da yaklaşık 5-6 metreye karşılık gelmektedir. Bu yerleşim yerlerinin yükseklikleri ve rüzgâr hızının yüksek kesimlerde daha hızlı olduğu göz önünde bulundurularak rüzgâr türbinin yüksekliğinin 9 metre olmasına karar verilmiştir. Şekil 2.1’de ölçülen rüzgâr hızı 50 metre yükseklikte yaklaşık 6,5 m/s olduğu için 9 metre yükseklikteki hız, Eşitlik 2.1 kullanılarak 5 m/s olarak bulunmuştur. Hem Şekil 2.1’e göre hem de Ovacık iline ait verilere göre 9 metre yüksekliğinde tasarlanacak olan rüzgâr türbini, ortalama 5 m/s rüzgâr hızıyla karşılaşacaktır.

2.2. RÜZGARDAKİ GÜÇ

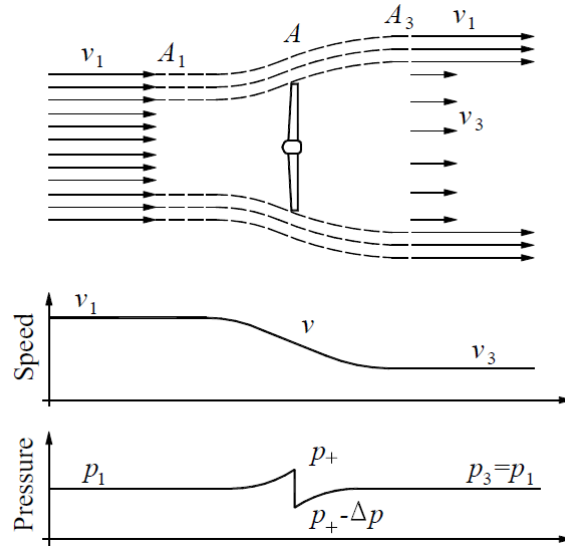
Rüzgâr türbinleri rüzgârı yavaşlatarak rüzgardaki kinetik enerjiyi azaltır. Ancak rüzgâr hızı sıfıra inmez. İlk kez Betz tarafından gösterilen, rüzgâr hızının düşürülmesi için bir optimum vardır. Bu bölümde belirtilen durum ana hatlarıyla açıklanmıştır [26]. Şekil 2.3’te bir rüzgâr türbini içinden geçen havanın akış çizgileri gösterilmiştir.

Rotorun önündeki rüzgârın hızı V_1 ’dir. Havanın rotoru geçtikten sonraki rüzgâr hızı ise V_3 ’e düşmektedir. Bu durumda oluşan rüzgâr hızı ve basıncı için eğriler Şekil 2.3’te gösterilmiştir. Başlangıç basıncı P_1 ’dir. Hava rotora doğru hareket ederken, basınç $P+$ basıncına yükselir ve rotoru tam geçerken basınç aniden ΔP kadar düşer. Yani havanın rotordan geçerken ki basıncı $P = P + - \Delta P$ ’dir. Hava, rotoru geçtikten sonra basınç tekrar $P_3=P_1$ ’e yükselir.

Rotor düzlemine doğru hareket eden havaya bakıldığında, Bernoulli denklemini kullanarak basınç P ile hız V arasındaki ilişki bulunabilir. Akışın sürtünmesiz olduğu varsayımı yapılmaktadır.

$$\frac{1}{2}\rho V^2 + P = P_{top} \quad [\text{Pa}] \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2’de P_{top} sabit olan toplam basınçtır. Akış hızı artarsa basınç düşer veya bunun tam tersi durum geçerlidir.



Şekil 2.3. Rüzgar türbini ve rüzgar arasındaki ilişki [26].

Basınç değişiklikleri ortamdaki basınca kıyasla nispeten küçüktür (1 atm yaklaşık 101325 Pa), bu nedenle yoğunluğun sabit olduğu varsayılmaktadır.

Rotorun yukarı akışı için Eşitlik 2.2 kullanılırsa,

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_+ + \frac{1}{2}\rho V^2 \quad [\text{Pa}] \quad (2.3)$$

ve rotor düzleminin aşağı akışı için Eşitlik 2.2 kullanılırsa,

$$P_+ - \Delta P + \frac{1}{2}\rho V^2 = P_1 + \frac{1}{2}\rho V_3^2 \quad [\text{Pa}] \quad (2.4)$$

elde edilir. Eşitlik 2.3'ten Eşitlik 2.4 çıkarılırsa,

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_3^2) \quad [\text{Pa}] \quad (2.5)$$

elde edilir.

Bu diferansiyel basınç “momentum değişimi” temelinde de hesaplanabilir. Rotor düzleminin bir metrekaresine bakıldığında, kütle akışı $\rho \cdot V$ 'ye eşittir. Momentum, kütle ile hızın çarpımına eşittir ve birimi N'dir. Basınç yüzey başına kuvvete eşittir. Bu durumda diferansiyel basınç aşağıdaki gibi hesaplanabilir,

$$\Delta P = \rho V(V_1 - V_3) \quad [\text{Pa}] \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.5 ile 2.6 eşitlendiğinde,

$$V = \frac{1}{2}(V_1 + V_3) \quad [\text{m/s}] \quad (2.7)$$

bulunur. Bu da rotor düzlemindeki hava hızının, rotorun yukarı ve aşağı akış hızının ortalama değerine eşit olduğunu gösterir.

Türbinin gücü, havadaki kinetik enerjinin değişimine eşittir. Bu durum aşağıdaki eşitlikle ifade edilir,

$$P = \frac{1}{2}\rho V(V_1^2 - V_3^2)A \quad [\text{W}] \quad (2.8)$$

Bu eşitlikteki A, rotor tarafından taranan yüzey alanını ifade eder.

Rotor üzerindeki aksel kuvvet (itme) şu şekilde hesaplanır,

$$T = \Delta P \times A \quad [\text{N}] \quad (2.9)$$

Eksenel indüksiyon faktörü “ α ” aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$V = (1 - \alpha)V_1 \quad [\text{m/s}] \quad (2.10)$$

Eşitlik 2.7 ile Eşitlik 2.10 kullanılarak $V_3 = (1 - 2\alpha)V_1$ elde edilir. Daha sonra Eşitlik 2.8 ve Eşitlik 2.9 şu şekilde ifade edilir,

$$P = 2\rho \alpha(1 - \alpha)^2 V_1^3 A \quad [\text{W}] \quad (2.11)$$

$$T = 2\rho \alpha(1 - \alpha)V_1^2 A \quad [\text{N}] \quad (2.12)$$

Güç üretimi katsayısı Eşitlik 2.13 ve aksenal kuvvetler katsayısı Eşitlik 2.14 aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$C_p = 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad [-] \quad (2.13)$$

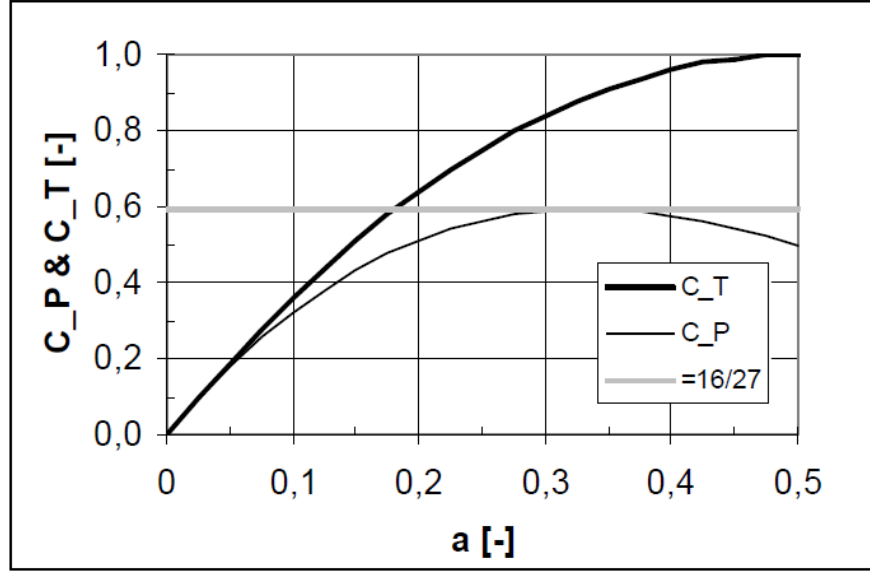
$$C_T = 4\alpha(1 - \alpha) \quad [-] \quad (2.14)$$

Daha sonra Eşitlik 2.11 ve 2.12 şu şekilde ifade edilebilir,

$$P = \frac{1}{2}\rho V_1^3 A C_p \quad [\text{W}] \quad (2.15)$$

$$T = \frac{1}{2}\rho V_1^2 A C_T \quad [\text{N}] \quad (2.16)$$

Şekil 2.4'te C_p ve C_T için eğriler gösterilmektedir.



Şekil 2.4. İdealleştirilmiş bir rüzgar türbini için güç katsayısı C_p ve eksenel kuvvet C_T katsayısı [26].

Şekil 2.4'te gösterildiği gibi C_p 0,333'lük (tam olarak 1/3) eksenel indüksiyon faktöründe yaklaşık 0,593'te (tam olarak 16/27) bir optimuma sahiptir. Betz'e göre güç şu şekilde ifade edilir [26],

$$C_{P,Betz} = \frac{16}{27} \text{ için } P_{Betz} = C_{P,Betz} \frac{1}{2} \rho V_1^3 A \quad [W] \quad (2.17)$$

Yatay eksenli rüzgar türbinleri, rüzgardaki enerjiyi kullanarak elektrik enerjisine çevirmektedir. Bunun için rüzgar verileri önem arz etmektedir. Yıllık, aylık, günlük ve saatlik olan rüzgar verileri kullanılarak enerji üretimi hesaplanabilir. Yıllık rüzgar dağılımını ve yıllık enerji üretim dağılımını belirlemek için Weibull dağılımı yöntemi kullanılmaktadır. Weibull dağılım fonksiyonu, rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemede en sık kullanılan yöntemlerdendir [27]. Ortalama rüzgar hızı ve ortalama rüzgar gücü kullanılarak bir fonksiyon oluşturulur. Bu fonksiyon ise yıllık, aylık, günlük veya saatlik rüzgar ve enerji dağılımlarını ifade etmektedir. Bu çalışmada, Karabük ili Ovacık ilçesinin 2020 yılına ait rüzgar verileri kullanılarak ilçenin rüzgar enerji potansiyeli hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar aşağıdaki gibi yapılır [26]:

$$p(v_i < v < v_{i+1}) = \exp\left(-\left[\frac{v_i}{A}\right]^k\right) - \exp\left(-\left[\frac{v_{i+1}}{A}\right]^k\right) [-] \quad (2.18)$$

Bu eşitlik rüzgar dağılımını ifade etmektedir. Bu denklemdeki $v_i < v < v_{i+1}$ ifadesi rüzgar hızı aralıklarıdır ve bu hız aralıklarındaki rüzgarın olma olasılığı hesaplanmıştır. Denklemde belirtilen k ve A ifadeleri sırasıyla şekil ve ölçek parametreleridir. k parametresinin düşük olması o bölgenin daha fırtınalı olduğunu gösterir. Yüksek k parametresi ise o bölgede daha istikrarlı rüzgârların olduğunu ifade eder. k şekil parametresi genellikle 1,5 ile 3 değerleri arasında olmalıdır [28]. A parametresi ise rüzgâr verisinin yatay olarak dağılımının genişliğini göstermektedir [29]. Standart sapma ve ortalama yöntemi kullanılarak rüzgâr hızının ortalamasının ve standart sapmasının, Weibull parametrelerine bağlı olduğu fonksiyonlar ile şekil ve ölçek parametreleri bulunabilmektedir. Şekil ve ölçek parametreleri şu şekilde hesaplanmıştır [30].

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_{ort}} \right)^{-1,086} \quad (2.19)$$

$$A = \frac{V_{ort}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2.20)$$

Eşitlik 2.19'da σ ifadesi rüzgar hızının standart sapmasını göstermektedir. V_{ort} ise rüzgar hızının ortalamasını temsil etmektedir. Yapılan bu çalışmada rüzgar verileri incelenerek bir yılda esen rüzgarların hızının yıllık oranları hesaplanarak grafik haline getirilmiştir. Bu grafiklerle Weibull dağılımı grafikleri karşılaştırılarak istenen bölge için en uygun k ve A değerleri belirlenmiştir.

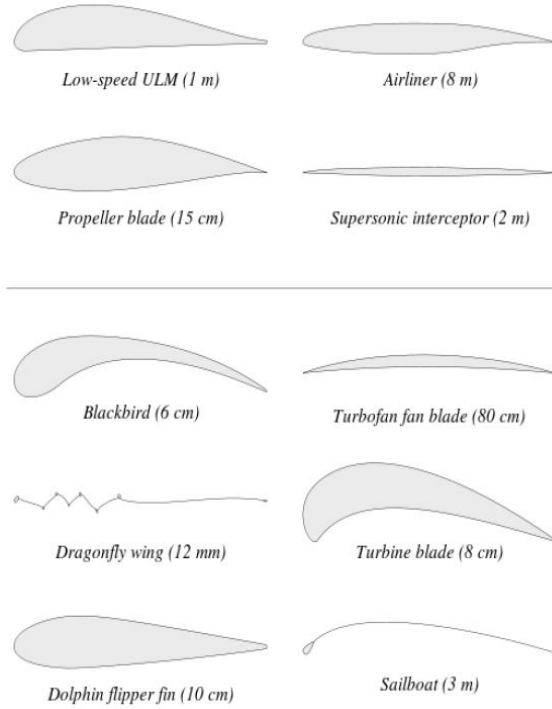
Yıllık enerji üretimi ise şu şekilde gösterilir [26]:

$$E_{ann} = \sum \{8766h \cdot p(v_i < v < v_{i+1}) P(V_m)\} [J] \quad (2.21)$$

Burada V_m ifadesi v_i ile v_{i+1} değerlerinin ortalamasıdır. 1 m/s ile en büyük rüzgar hızı arasındaki tüm hızlar için ayrı ayrı hesaplamalar yapılarak her bir rüzgar hızındaki enerji üretimi hesaplanmıştır. Rüzgar türbininin güç üretimine başlama hızı 2 m/s ve devreden çıkma hızı 15 m/s olarak belirlenmiştir. 1 kW/h enerji üretme hızı ise 5 m/s olarak ayarlanmıştır. Bu değerler bölgeye ait rüzgar istatistikleri incelenerek belirlenmiştir [24].

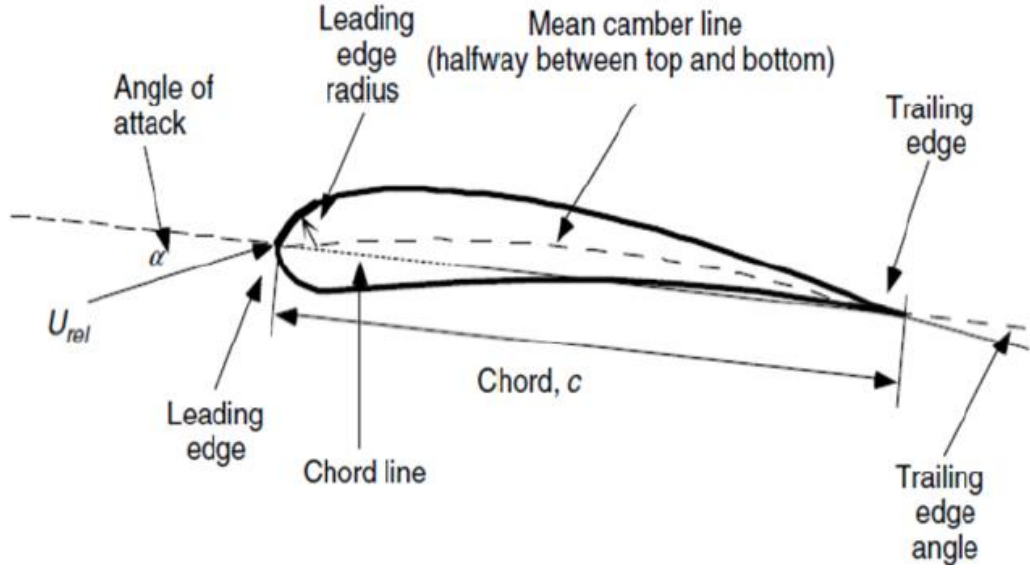
2.3. AIRFOIL AERODİNAMİĞİ

Kanat kesiti olarak adlandırılan airfoil, bir akışkan içinde hareket eden uçak kanatları, pervaneleri, rüzgâr türbin kanatları gibi nesnelerin 2 boyutlu kesitleridir. Akışkan içinde hareket eden airfoiller, aerodinamik bir kuvvet üretir. Bu kuvvetin hareket yönüne dik olan bileşene kaldırma denir. Hareket yönüne paralel olan bileşene ise sürükleme denir. Ses altı uçuş airfoilleri yuvarlatılmış bir ön kenara sahip karakteristik bir şekle ve ardından genellikle asimetric bombeli keskin bir arka kenara sahiptir. Bir airfoildeki kaldırma, öncelikle hücum açısının ve şeklinin sonucudur. Uygun bir açıyla yönlendirildiğinde, airfoil, karşıdan gelen havayı saptırarak, kanat üzerinde sapmanın tersi yönde bir kuvvet oluşturur. Çoğu airfoil şekli, kaldırma oluşturmak için pozitif bir hücum açısı gerektirir, ancak bombeli airfoiller, sıfır hücum açısında kaldırma oluşturabilir [31].



Şekil 2.5. Airfoil çeşitleri [31].

Aerodinamik performanslar, airfoilin farklı geometrisi nedeniyle farklıdır ve farklı airfoilin davranışına göre, rüzgâr türbini kanadı için uygulanabilir bir kanat seçmek verimliliği artıracaktır. Bir airfoili karakterize etmek için Şekil 2.6 incelenmiştir.



Şekil 2.6. Airfoilin bölümleri [31].

Ortalama kamber çizgisi: airfoilin üst ve alt yüzeylerinin ortasındaki noktaların konumudur.

Ön kenar: airfoilin en ön noktasıdır.

Arka kenar: airfoilin en arka noktasıdır.

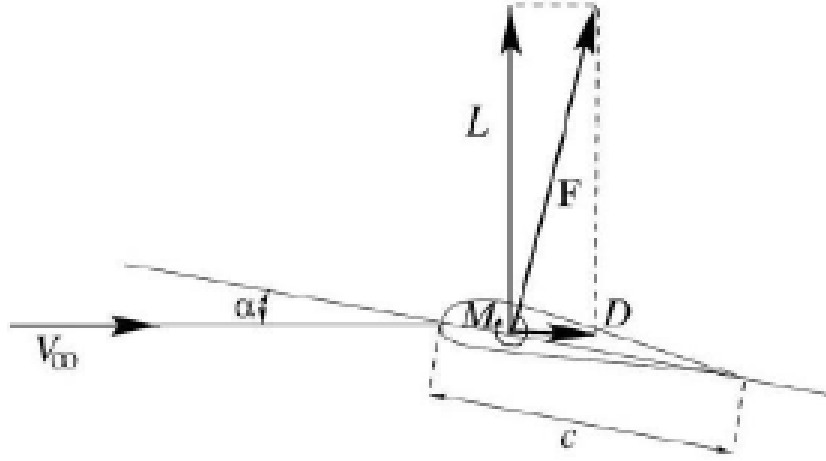
Akor çizgisi: airfoilin ön kenarını arka kenara bağlar. Akor çizgisi düz bir çizgidir ve mesafesi, airfoilin akoru “c” olarak bilinir.

Kambur: akor çizgisi ile akor çizgisine dik olarak ölçülen ortalama kamber çizgisini temsil eden konum arasındaki mesafedir.

Kalınlık: akor çizgisi boyunca herhangi bir noktada airfoilin kalınlığı, akor çizgisine dik olarak ölçülen üst ve alt yüzey arasındaki mesafedir.

Hücum açısı (α): akor çizgisi ile göreceli rüzgâr yönü arasında oluşturulan açıdır.

Genel olarak airfoile etki eden iki kuvvet ve bir moment vardır. Bunlar kaldırma, sürüklenme ve momenttir.



Şekil 2.7. Kaldırma ve sürükleme oranı [32].

Kaldırma, yer çekiminin üstesinden gelmek için kullanılan kuvettir ve yaklaşmakta olan hava akışının yönüne dik olarak tanımlanır. Üst ve alt kanat yüzeylerindeki eşit olmayan basınç sonucu oluşur. Kaldırma ne kadar yüksek olursa, yerden kaldırılabilen kütle de o kadar yüksek olur. Sürükleme kuvveti, gelen hava akışının yönüne paralel bir kuvvet olarak tanımlanır. Sürükleme kuvveti, hem airfoilin yüzeyindeki viskoz sürtünme kuvvetlerinden hem de gelen akışa doğru ve uzağa bakan kanat yüzeylerindeki eşit olmayan basınçtan kaynaklanır.

Kaldırma kuvveti,

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho V^2 c \quad (2.22)$$

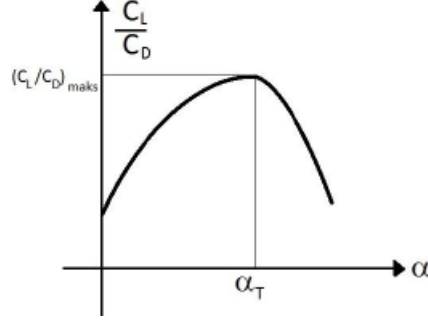
Sürükleme kuvveti,

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 c \quad (2.23)$$

Moment,

$$M = C_M \frac{1}{2} \rho V^2 c \quad (2.24)$$

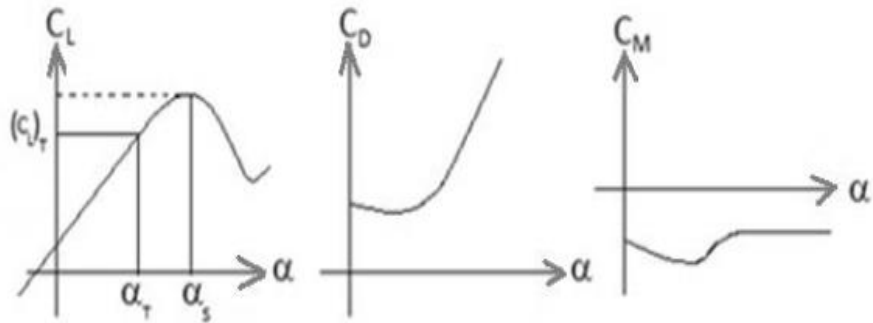
olarak tanımlanır. Burada C_L kaldırma kuvvet katsayısı, C_D sürüklenme kuvvet katsayısı ve C_M moment katsayısıdır. C_L/C_D oranı süzülme oranı olarak adlandırılır. Rüzgâr türbinlerinde ve uçak kanatlarında yüksek süzülme oranı olması istenmektedir. Maksimum süzülme oranı genelde 5° ile 10° hücum açıları arasında olmaktadır.



Şekil 2.8. Tasarım hücum açısı grafiği [33].

Yukarıda verilen grafikte süzülme oranının en yüksek olduğu açı değeri (α_T), rüzgâr türbinlerinin tasarımında tasarım açısı olarak kullanılmaktadır [32].

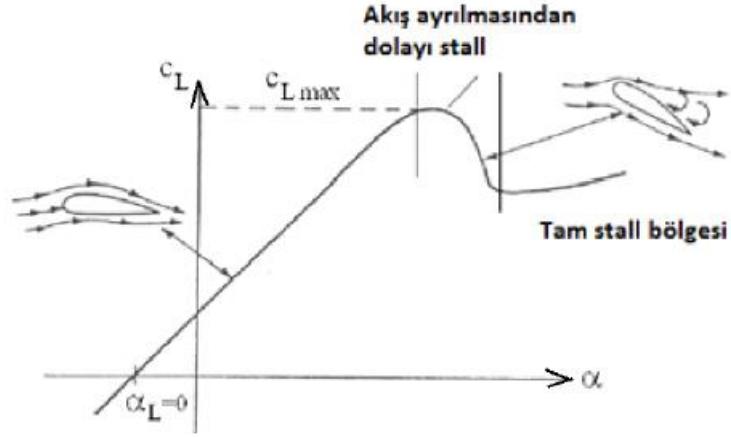
Kaldırma ve sürüklenme katsayıları hücum açısıyla değişmektedir. Bu katsayı değerlerinin hücum açısıyla değişmesini gösteren polar grafikler Şekil 2.9'da gösterilmiştir [34].



Şekil 2.9. Polar grafikler.

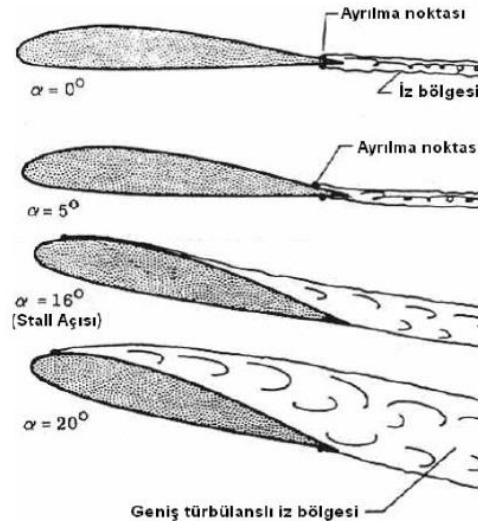
Hücum açısı arttıkça kaldırma ve sürüklenme katsayı değerleri de artar. Bu artış hücum açısının belli bir değerine kadar artar ve sonrasında kaldırma katsayı değeri azalmaya başlar. Sürüklenme katsayı değeri ise hızlı bir şekilde artmaya devam eder. Airfoil bu kritik hücum açısına ulaşana kadar akış, airfoilin üst kısmında yüzeye uyumlu bir

şekilde hareket eder. Hücüm açısı daha fazla arttıkça ise akış yüzeyden ayrılmaya başlar. Akış ayrılması, airfoilin ön ucuna yaklaştıkça kaldırma katsayı değeri azalmaya başlar. Bu duruma ise stall ya da tutunma kaybı denir. Hücüm açısının bu kritik değerine stall (durma) açısı denir [33].



Şekil 2.10. Airfoil yüzeyinde stall öncesi ve sonrası oluşan akış ayrılması [35].

Akış ayrılması, airfoilin arka kısmında başlayıp hücüm açısının artmasıyla birlikte ön kısmına doğru kaymaktadır (Şekil 2.10). Hücüm açısının artmasıyla oluşan akış ayrılması ve stall durumu daha detaylı olarak Şekil 2.11’de verilmiştir. Hücüm açısı arttıkça akış ayrılması olan yerlerde girdaplar meydana gelmektedir. Bu bölgelerde de sürüklenme katsayısı artmaktadır.



Şekil 2.11. Akış ayrılması ve stall durumu [35].

2.4. AIRFOIL SEÇİMİ

Yapılan çalışmada NACA 63-215, NACA 63-218, NACA 63-221, NACA 63-415, NACA 63-471, NACA 4412, NREL S 809, RISØ-A1-18, FX 66-S 814, DU 91-W2-250 airfoillerinin geometrileri ve aerodinamik katsayı değerleri incelenmiştir [36,37]. Rüzgâr türbininin güç hesabını yapmak için kullanılan BEM teoreminin uygulanmasında airfoillerin C_L ve C_D katsayılarına ihtiyaç vardır. Bundan dolayı özellikleri incelenen airfoillerin C_L , C_D ve C_L/C_D değerleri çizelge halinde gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. NACA63-215 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.

NACA 63-215			
α (Hücum Açısı)	C_L	C_D	C_L/C_D
0°	0,1	0,008	12,5
2°	0,3	0,005	60
5°	0,65	0,008	81
6°	0,82	0,01	82
9°	1,00	0,012	83,3
10°	1,16	0,013	89,2
12°	1,3	0,015	86,6
14°	1,42	0,017	83,5
18°	1,3	0,018	72,2

Çizelge 2.3. NACA63-218 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.

NACA 63-218			
α (Hücum Açısı)	C_L	C_D	C_L/C_D
0°	0,2	0,005	40
2°	0,4	0,006	66,6
5°	0,7	0,007	100
6°	0,85	0,0075	113,33
9°	1,15	0,012	95,83
10°	1,18	0,015	78,66
12°	1,3	0,02	65
13°	1,3	0,021	62
15°	1,3	0,022	59
18°	1,15	0,020	57,5

Çizelge 2.4. NACA63-221 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.

NACA 63-221			
α (Hücum Açısı)	C_L	C_D	C_L/C_D
0°	0,2	0,005	40
2°	0,3	0,0055	54,5
5°	0,75	0,007	107,14
6°	0,85	0,008	106,25
9°	1,13	0,016	70,6
10°	1,17	0,018	65
13°	1,2	0,017	69,5
15°	1,18	0,017	69,4
20°	1,16	0,017	68,23

Çizelge 2.5. NACA63-415 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.

NACA 63-415			
α (Hücum Açısı)	C_L	C_D	C_L/C_D
0°	0,38	0,005	76
2°	0,5	0,006	83,3
5°	0,95	0,0095	100
6°	1	0,01	100
9°	1,3	0,015	86
10°	1,38	0,02	69
14°	1,57	0,025	62,8
15°	1,5	0,028	53,5
16°	1,45	0,03	48,3

Çizelge 2.6. NACA63-421 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.

NACA 63-421			
α (Hücum Açısı)	C_L	C_D	C_L/C_D
0°	0,4	0,007	57
2°	0,45	0,0075	60
5°	0,9	0,009	100
6°	1,05	0,01	105
9°	1,3	0,019	68,4
10°	1,4	0,02	70
12°	1,38	0,018	76
15°	1,23	0,014	87

Çizelge 2.7. NREL S 809 airfoilin kaldırma-sürükleme katsayı değerleri.

NREL S 809			
α (Hücum Açısı)	C_L	C_D	C_L/C_D
0°	0,15	0,007	21,5
2°	0,28	0,01	28
5°	0,7	0,012	58
6°	0,8	0,013	65,5
9°	1	0,013	77
10°	0,95	0,02	47,5
12°	0,9	0,025	36
14°	1	0,05	20
15°	1,05	0,06	17,5
18°	0,9	0,01	9

Çizelge 2 8. DU 91-W2-250 airfoilin kaldırma-sürükleme katsayı değerleri.

DU 91-W2-250			
α (Hücum Açısı)	C_L	C_D	C_L/C_D
0°	0,35	0,01	35
2°	0,55	0,011	50
5°	0,9	0,013	69,2
6°	1,1	0,014	78,5
9°	1,35	0,016	84,3
10°	1,42	0,018	78,8
12°	1,2	0,03	40
15°	1,15	0,1	11,5
18°	1,148	0,14	8,2

Çizelge 2.9. NACA 4412 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.

NACA 4412			
α (Hücum Açısı)	C_L	C_D	C_L/C_D
0°	0,5	0,008	62,5
2°	0,53	0,0083	63,85
5°	1,01	0,0095	106,3
6°	1,2	0,01	120
7°	1,33	0,011	121
8°	1,35	0,012	112,5
12°	1,45	0,022	66
15°	1,5	0,055	27,3
18°	1,45	0,08	18

Çizelge 2.10. RISØ-A1-18 airfoilin kaldırma-sürüklenme katsayı değerleri.

RISØ-A1-18			
α (Hücum Açısı)	C_L	C_D	C_L/C_D
0°	0,4	0,008	50
2°	0,53	0,01	53
5°	0,95	0,013	73
6°	1,1	0,014	78,5
9°	1,3	0,02	65
10°	1,4	0,025	56
11°	1,45	0,038	38
15°	1,2	0,085	14
18°	1,18	0,17	7
20°	1,1	0,16	6,8

Çizelge 2.11. FX66-S 196-V1 airfoilin kaldırma-sürükleme katsayı değerleri.

FX66-S 196-V1			
α (Hücum Açısı)	C_L	C_D	C_L/C_D
0°	0,5	0,01	50
2°	0,65	0,012	54
5°	1,05	0,014	75
6°	1,18	0,015	78
9°	1,4	0,015	93
10°	1,48	0,018	82
12°	1,38	0,019	72,6
15°	1,22	0,02	61
20°	1,2	0,025	48

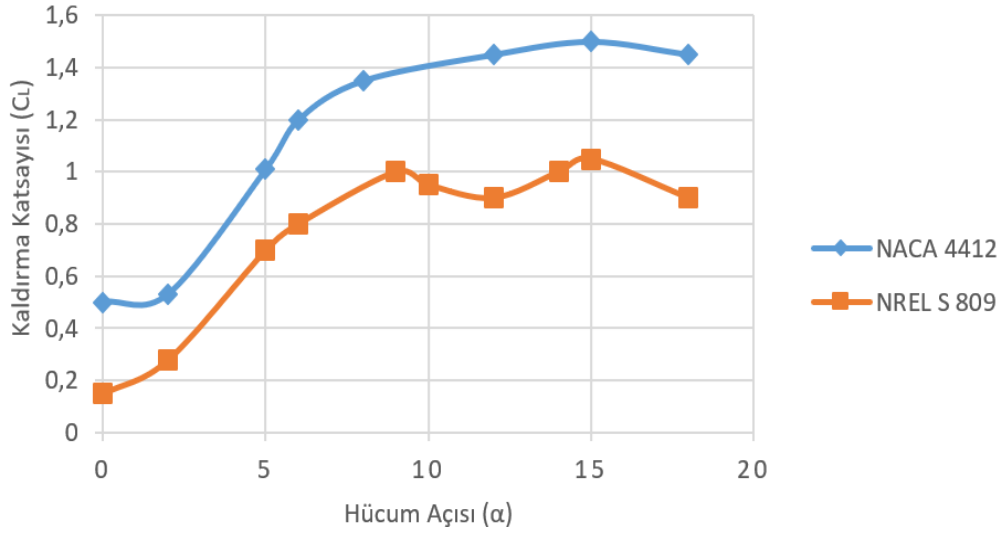
Tablo haline getirilen airfoillerin aerodinamik performansları incelendiğinde,

- NACA 63-215 airfoilin en yüksek C_L/C_D değeri 89,2'dir. Bu değere 10°'lik hücum açısında ulaşmaktadır ve kaldırma katsayısı 1,16 iken sürükleme katsayısı 0,013'tür.
- NACA 63-218 airfoilin en yüksek C_L/C_D değeri 113,33'tür. Bu değere 6°'lik hücum açısında ulaşmaktadır ve kaldırma katsayısı 0,85 iken sürükleme katsayısı 0,075'tir.
- NACA 63-221 airfoilin en yüksek C_L/C_D değeri 106,25'tir. Bu değere 6°'lik hücum açısında ulaşmaktadır ve kaldırma katsayısı 0,85 iken sürükleme katsayısı 0,008'dir.
- NACA 63-415 airfoilin en yüksek C_L/C_D değeri 100'dür. Bu değere 5° ve 6°'lik hücum açılarında ulaşmaktadır ve 5° hücum açısında kaldırma katsayısı

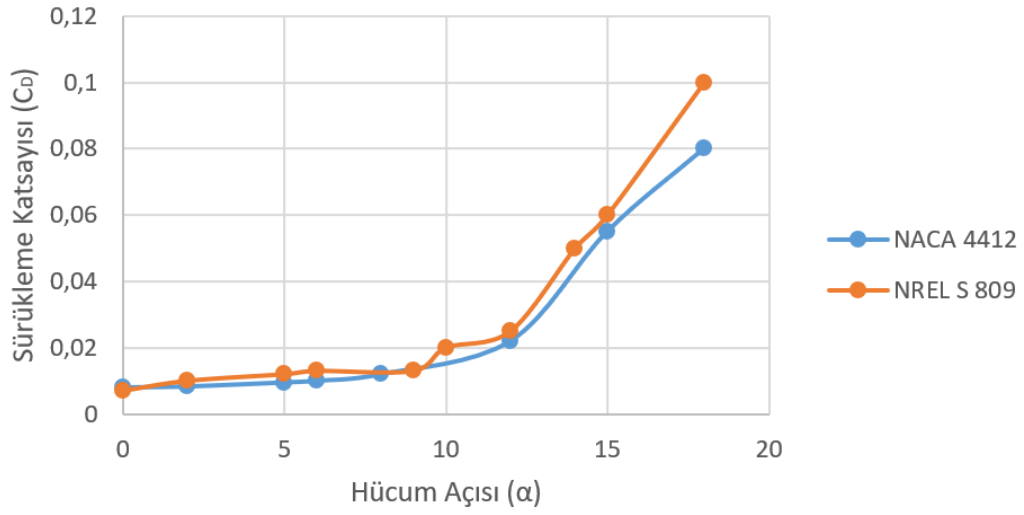
0,95 iken sürükleme katsayısı 0,0095'tir. 6° hücum açısında ise kaldırma katsayısı 1 iken sürükleme katsayısı 0,01'dir.

- NACA 63-421 airfoilinin en yüksek C_L/C_D değeri 105'tir. Bu değere 6°'lik hücum açısında ulaşmaktadır ve kaldırma katsayısı 1,05 iken sürükleme katsayısı 0,01'dir.
- NREL S 809 airfoilinin en yüksek C_L/C_D değeri 77'dir. Bu değere 9°'lik hücum açısında ulaşmaktadır ve kaldırma katsayısı 1 iken sürükleme katsayısı 0,013'tür.
- DU 91-W2-250 airfoilinin en yüksek C_L/C_D değeri 84,3'tür. Bu değere 9°'lik hücum açısında ulaşmaktadır ve kaldırma katsayısı 1,35 iken sürükleme katsayısı 0,016'dır.
- NACA 4412 airfoilinin en yüksek C_L/C_D değeri 121'dir. Bu değere 7°'lik hücum açısında ulaşmaktadır ve kaldırma katsayısı 1,33 iken sürükleme katsayısı 0,011'dir.
- RISØ-A1-18 airfoilinin en yüksek C_L/C_D değeri 78,5'tir. Bu değere 6°'lik hücum açısında ulaşmaktadır ve kaldırma katsayısı 1,1 iken sürükleme katsayısı 0,014'tür.
- FX66-S 196-V1 airfoilinin en yüksek C_L/C_D değeri 93'tür. Bu değere 9°'lik hücum açısında ulaşmaktadır ve kaldırma katsayısı 1,4 iken sürükleme katsayısı 0,015'tir.

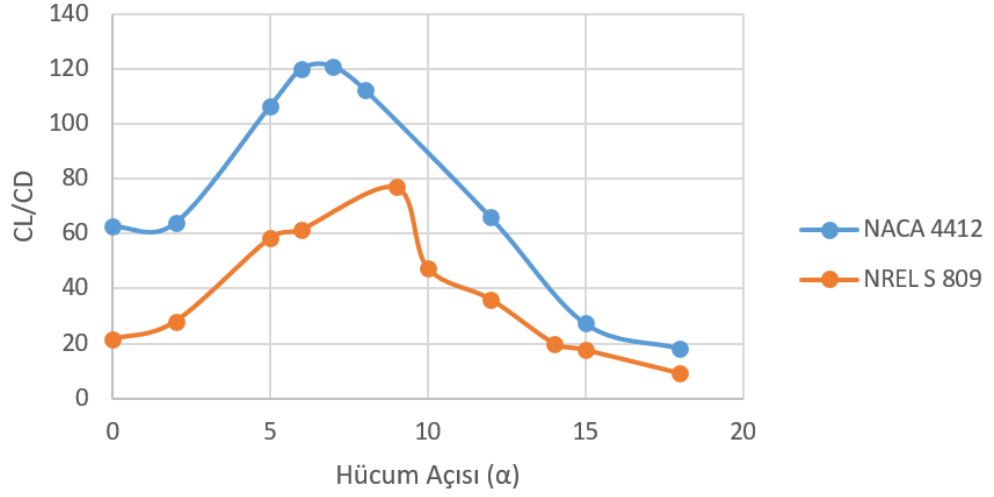
Bu bulgulara göre NACA 4412 airfoilinin aerodinamik performansı daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Ancak literatürde NREL serilerinin rüzgâr türbin tasarımında yaygın tercih edildiği gözlemlenmiştir [38,39]. Yapılan literatür araştırmasında aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 2.12. NACA 4412 ve NREL S 809 kaldırma katsayısı [36,37].



Şekil 2.13. NACA 4412 ve NREL S 809 kaldırma katsayısı. [36,37].



Şekil 2.14. NACA 4412 ve NREL S 809 süzülme oranı [36,37].

NACA 4412 ile NREL S 809 airfoilleri Şekil 2.14'te karşılaştırıldığında NACA 4412 airfoilinin daha yüksek süzülme oranına sahip olduğu görülmektedir. NACA 4412 airfoilinin kaldırma katsayısı NREL S 809 airfoiline göre daha yüksektir. Ayrıca sürüklenme katsayısı NREL S 809 airfoiline göre daha yüksektir. Bir diğer faktör ise NACA 4412 airfoili daha ince bir yapıya sahiptir. Bundan dolayı da daha düşük ağırlığa sahip olacağı için daha yüksek verim sergilemektedir. Bu sebeplerden dolayı yatay eksenli rüzgâr türbini tasarımında NACA 4412 kullanılmasına karar verilmiştir.

Deneysel çalışmada Reynolds sayısı yaklaşık 6000000'dur [37]. Bu çalışmada ise airfoil boyu 0,2 m alınmıştır. Bu yüzden Reynolds sayısı değişeceği için yeniden bir analiz yapma gereği duyulmuştur. Ansys 19.1 analiz programı kullanılarak NACA 4412 airfoilinin 2 boyutlu akış analizi yapılmıştır. Yaklaşık 140000 Reynolds sayısında yapılan akış analizden elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar grafik halinde gösterilmiştir.

Oluşturulan grafiklerde kaldırma ve sürüklenme katsayıları 90 derecelik hücum açısına kadar bilinmesi gerekmektedir. Ansys programında yapılan analizler sonucunda 15 derecelik hücum açısından sonraki açılarda doğru sonuçlar alınamamıştır. NACA 4412 için stall durumu hücum açısı 15 derecedir. 15 derecelik hücum açısına kadar olan ve 15 dereceden 90 dereceye kadar olan değerlerin polinom fonksiyonları bazı

teorik hesaplamalarla elde edilmiştir. Öncelikle Ansys programından elde edilen stall öncesi hücum açılarındaki aerodinamik katsayı değerleri kullanılarak polinom fonksiyonları elde edilmiştir. 0°, 5°, 10°, 15°, 18° hücum açılarındaki C_L ve C_D değerleri kullanılarak 4.dereceden bir fonksiyon tanımlanmıştır [15].

$$C_L(\alpha) = k_0 + k_1\alpha + k_2\alpha^2 + k_3\alpha^3 + k_4\alpha^4 \quad (2.25)$$

$$C_D(\alpha) = t_0 + t_1\alpha + t_2\alpha^2 + t_3\alpha^3 + t_4\alpha^4 \quad (2.26)$$

Oluşturulan bu fonksiyonda k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 ifadeleri kaldırma kuvvet polinomundaki katsayıları, t_0, t_1, t_2, t_3, t_4 ifadeleri ise sürükleme kuvvet polinomundaki katsayıları temsil etmektedir. Maplesoft programı kullanılarak bu polinomlardaki katsayılar matris yoluyla bulunmuştur.

```
[> restart:
> alpha:=<<1 | 0 | 0 | 0| 0>> ,<1 |5 | 25 | 125 | 625>> , <1 |10 |
100 | 1000 | 10000>> , <1 |15 | 225 | 3375 | 50625>> , <1 |18 |
324 | 5832 | 104946>>;
alpha :=
[ 1 0 0 0 0
 1 5 25 125 625
 1 10 100 1000 10000
 1 15 225 3375 50625
 1 18 324 5832 104946 ]

> k:=<<k0,k1, k2, k3, k4>>;
k :=
[ k0
 k1
 k2
 k3
 k4 ]

> eq1:=alpha.k;
eq1 :=
[ k0
 k0+5 k1+25 k2+125 k3+625 k4
 k0+10 k1+100 k2+1000 k3+10000 k4
 k0+15 k1+225 k2+3375 k3+50625 k4
 k0+18 k1+324 k2+5832 k3+104946 k4 ]

> CL:=<<0.35, 0.87, 1.39, 1.43, 1.3>>;
CL :=
[ 0.35
 0.87
 1.39
 1.43
 1.3 ]

> sys := { eq1(1,1)=CL(1,1), eq1(2,1)=CL(2,1),
eq1(3,1)=CL(3,1),eq1(4,1)=CL(4,1),eq1(5,1)=CL(5,1) };
sys := { k0=0.35, k0+5 k1+25 k2+125 k3+625 k4=0.87,
k0+10 k1+100 k2+1000 k3+10000 k4=1.39,
k0+15 k1+225 k2+3375 k3+50625 k4=1.43,
k0+18 k1+324 k2+5832 k3+104946 k4=1.3 }

> solve( sys, {k0,k1,k2,k3,k4} );
{k0=0.3500000000, k1=0.03493233083, k2=0.02319147870, k3=-0.002122706767,
k4=0.00004942355890 }
```

Şekil 2.15. Matris Yöntemiyle kaldırma kuvvet polinom katsayılarının hesabı.

```

[> restart:
> alpha:=<<1 | 0 | 0 | 0| 0> , <1 |5 | 25 | 125 | 625> , <1 |10 |
100 | 1000 | 10000> , <1 |15 | 225 | 3375 | 50625> , <1 |18 |
324 | 5832 | 104946>>;

      1  0  0  0  0
      1  5  25 125 625
      1 10 100 1000 10000
      1 15 225 3375 50625
      1 18 324 5832 104946

> t:=<<t0,t1, t2, t3, t4>>;

      t0
      t1
      t2
      t3
      t4

> eq1:=alpha.t;

      t0
      t0+5 t1+25 t2+125 t3+625 t4
      t0+10 t1+100 t2+1000 t3+10000 t4
      t0+15 t1+225 t2+3375 t3+50625 t4
      t0+18 t1+324 t2+5832 t3+104946 t4

> CD:=<<0.018, 0.023, 0.034, 0.083, 0.139>>;

      0.018
      0.023
      0.034
      0.083
      0.139

[> sys := { eq1(1,1)=CD(1,1), eq1(2,1)=CD(2,1),
eq1(3,1)=CD(3,1),eq1(4,1)=CD(4,1),eq1(5,1)=CD(5,1) };
sys := { t0 = 0.018, t0 + 5 t1 + 25 t2 + 125 t3 + 625 t4 = 0.023,
t0 + 10 t1 + 100 t2 + 1000 t3 + 10000 t4 = 0.034,
t0 + 15 t1 + 225 t2 + 3375 t3 + 50625 t4 = 0.083,
t0 + 18 t1 + 324 t2 + 5832 t3 + 104946 t4 = 0.139 }

> solve( sys, {t0,t1,t2,t3,t4} );
{t0 = 0.01800000000, t1 = 0.003198209810, t2 = -0.0007637880415, t3 = 0.00006926172574,
t4 = -0.8865019692 10^-6}

```

Şekil 2.16. Matris Yöntemiyle sürükleme kuvvet polinom katsayılarının hesabı.

Stall sonrasındaki hücum açıları için aerodinamik katsayı değerlerinin hesaplanmasında ise Viterna eşitlikleri kullanılmıştır [26,40]. Viterna eşitlikleri 15° ile 90° arasındaki hücum açıları için hesaplanmıştır. Bu eşitlikler aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$C_L = A_1 \sin(2\alpha) + \frac{A_2 \cos^2 \alpha}{\sin^2 \alpha} \quad (2.27)$$

$$C_D = B_1 \sin^2 \alpha + B_2 \cos(\alpha) \quad (2.28)$$

$$A_1 = \frac{B_1}{2} \quad (2.29)$$

$$A_2 = [(C_L)_{stall} - (C_{D_{max}})\sin(\alpha_{stall})\cos(\alpha_{stall})] \left[\frac{\sin(\alpha_{stall})}{\cos^2(\alpha_{stall})} \right] \quad (2.30)$$

$$B_1 = C_{D_{max}} \quad (2.31)$$

$$B_2 = C_{D_{stall}} - \frac{(C_{D_{max}})\sin^2(\alpha_{stall})}{\cos(\alpha_{stall})} \quad (2.32)$$

$$C_{D_{max}} = 1,11 + 0,18 AR \quad (2.33)$$

Bu eşitliklerde kullanılan AR ifadesi airfoilin en-boy oranını ifade etmektedir. Bu eşitliklerdeki stall ifadesi kaldırma katsayısının azalmaya başladığı durumu ifade etmektedir. α_{stall} ifadesi stall durumundaki hücum açısını belirtmektedir. $(C_L)_{stall}$ ifadesi stall durumunda hücum açısındaki kaldırma katsayısını göstermektedir. $(C_D)_{max}$, hücum açısı 90° olduğunda airfoilde oluşan sürüklenme kuvvet katsayısını, $(C_D)_{stall}$ ise stall durumunda hücum açısındaki sürüklenme kuvvet katsayısını belirtmektedir.

2.5. KANAT GEOMETRİSİ

Rüzgâr türbini oluşturulurken kanatların geometrisi en yüksek güç elde edecek biçimde tasarlanmalıdır. Bu tezdeki amaç küçük ölçekli rüzgâr türbininden 1 kW/h enerji elde etmek olduğu için geometrileri belirlerken aşağıdaki denklem kullanılır,

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho V_1^3 \pi R^2 C_p \quad (2.34)$$

Burada P_{max} ifadesi maximum gücü ifade etmektedir. Havanın yoğunluğu ρ ile ifade edilmiştir. Karabük ili Ovacık ilçesinin yıllık ortalama hız potansiyeli ise 5 m/s olarak bilinmektedir. Kanatlar tarafından rüzgârdan elde edilen gücün, rüzgâr gücüne oranı olarak ifade edilen güç katsayısı (C_p) 0,4 olarak alınmıştır. Rüzgâr türbin kanadının yarıçapı (R) ise bu eşitlik kullanılarak 3 metre olarak hesaplanmıştır.

Kanat geometrisi belirlenirken maksimum güç elde edilecek şekilde tasarlanması önemlidir. Açıl momentum teoremi olarak bilinen Schmitz formülleri, rüzgârın rüzgâr türbininden geçtikten sonraki dönme hareketlerini hesaba katarak en uygun kanat geometrilerini belirler [26]. Schmitz formülleri aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir:

$$C_{(r)} = \frac{16\pi r}{B(C_L)_T} \sin^2 \left[\frac{1}{3} \arctan \left(\frac{R}{r\lambda_T} \right) \right] \quad (2.35)$$

$$\beta_{(r)} = \frac{2}{3} \arctan \left[\frac{R}{r\lambda_T} \right] - \alpha_T \quad (2.36)$$

Bu eşitliklerle kanat geometrisini belirleyen faktörler belirtilmiştir. Bu faktörler airfoilin genel şekli, kanat boyunca airfoil boyunun $C_{(r)}$ nasıl değiştiği ve rüzgâr türbin düzlemine airfoilin hangi bağlanma açılarıyla $\beta_{(r)}$ konumlandırılacağıdır [41]. Yerleştirme açısı $\beta_{(r)}$ ve airfoil boyu $C_{(r)}$ hesaplanırken Schmitz formülünde airfoilin tasarım kaldırma katsayısı $(C_L)_T$ ve tasarım hücum açısı α_T kullanılmaktadır [33,42].

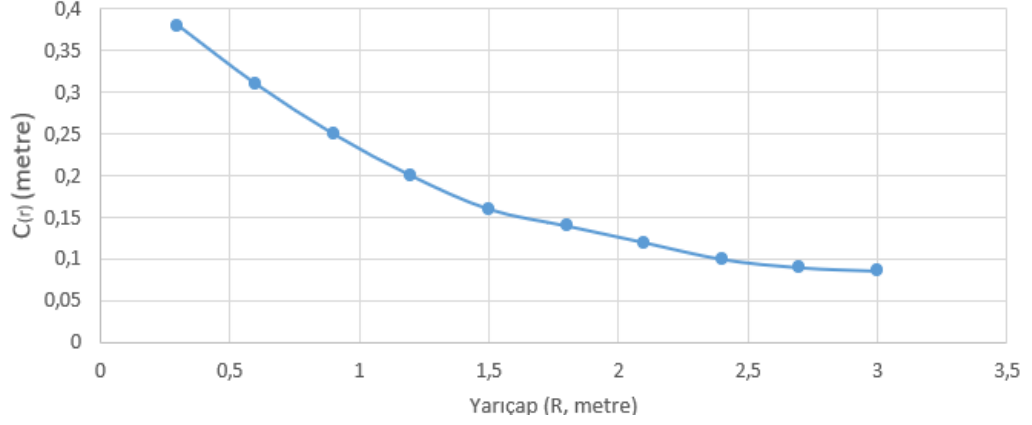
Airfoilin tasarım kaldırma katsayısı ve tasarım hücum açısı $(C_L)_T$, süzülme oranının (C_L/C_D) en yüksek olduğu durumdaki değerlerdir. NACA 4412 airfoili için süzülme oranının en yüksek olduğu hücum açısı 7 derece ve kaldırma katsayısı 1,3 olarak belirlenmiştir. λ_T olarak ifade edilen tasarım uç hız oranı değeri genelde 6 ile 8 arasında seçilmektedir [43,44]. Tasarım uç hız oranı ise aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\lambda_T = \frac{\omega.R}{V} \quad (2.37)$$

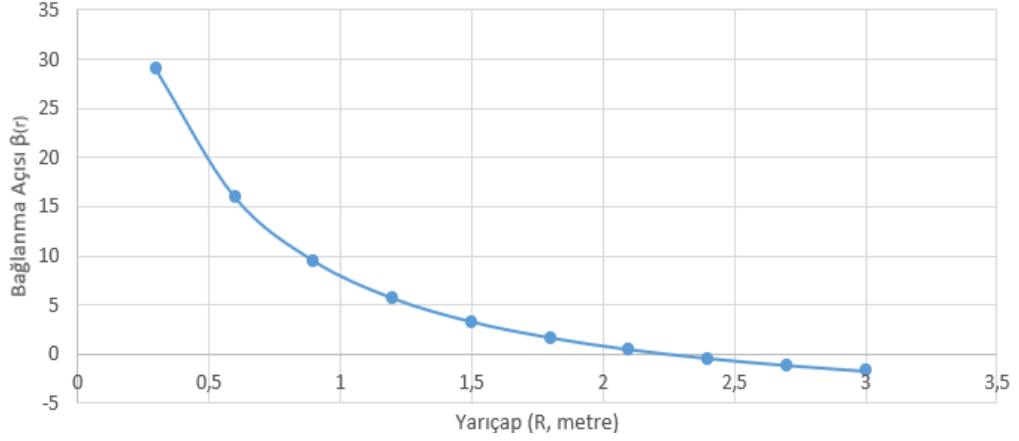
Bu eşitlikte ω açısal hızı, R rüzgar türbin yarıçapını, V ise rüzgar hızını göstermektedir.

Bu çalışmada ise tasarım uç hız oranı literatürde en sık kullanılan değer olan 7 alınmıştır [15,26]. Formülde B ile ifade edilen değer ise rüzgâr türbininin kanat sayısıdır. Yapılan bu çalışmada kanat sayısı 3 olarak belirlenmiştir.

Rüzgâr türbin kanadının yarı çapı (R) daha önce 3 metre olarak hesaplanmıştır. Yerleştirme açısı ve airfoil boyunu hesaplarken r değeri olarak sırasıyla 0,3, 0,6, 0,9, 1,2, 1,5, 1,8, 2,1, 2,4, 2,7 ve 3 metre alınmıştır.



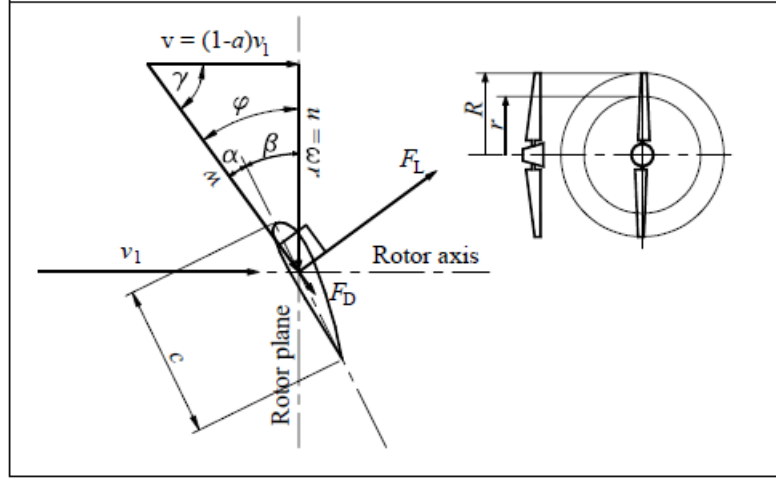
Şekil 2.17. NACA 4412 airfoili kiriş uzunluğu.



Şekil 2.18. NACA 4412 airfoili bağlanma açısı.

2.6. KANAT ELEMAN MOMENTUM (BEM) TEORİSİ

Kanat eleman teoremi ile momentum teoreminin birleşmesiyle oluşan BEM teoremi, yatay eksenli rüzgâr türbin kanat tasarımında, güç hesabında kullanılan faktörlerin hesaplanması için kullanılan bir teoremdir [45]. Bu teoremin algoritması oluşturularak Excel programında görüntülenmiştir. BEM teoreminde, kanat tarafından taranan akış alanı bir dizi eş merkezli halka elemanına bölünmüştür. Halkalar, bir halkadaki iki komşu halkaya giden akışlar arasında radyal girişim olmadığı varsayımı altında ayrı ayrı değerlendirilir.



Şekil 2.19. Hız ve açılar [26].

Şekil 2.19, bir halkadaki profili ve rüzgâr hızlarını göstermektedir. Hücüm açısı α ile ifade edilmiştir.

$$\alpha = \varphi - \beta \quad [\text{rad}] \quad (2.38)$$

Şekil 2.19'dan,

$$\tan(\varphi) = \frac{1 - a}{1 + a'} \frac{v_1}{r\omega} \quad (2.39)$$

elde edilir.

Kanat sayısı "B" ile ifade edildiğinde, yarıçapı r ve genişliği dr olan bir halka elemanı üzerindeki aksenal kuvvet dT ve tork dU şu şekilde hesaplanmıştır,

$$dT = \frac{1}{2} \rho w^2 c B C_y dr \quad [\text{N}] \quad (2.40)$$

$$dU = \frac{1}{2} \rho w^2 c B C_x r dr \quad [\text{Nm}] \quad (2.41)$$

Momentum ve açısal momentum yasaları kullanılarak dT ve dU ,

$$dT = 2 \pi r \rho v_2 (v_1 - v_3) dr \quad [\text{N}] \quad (2.42)$$

$$dU = 2 \pi r^2 \rho v_2 u_3 dr \quad [\text{Nm}] \quad (2.43)$$

olarak ifade edilmiştir.

Eşitlik 2.43'te rüzgârın bir miktar teğet dönüşü olmasına rağmen, rotor düzleminin çok gerisindeki teğetsel hız için u_3 kullanılmıştır. Rüzgârın dönüşü normalde küçük olduğu için, bu kabul edilebilir bir yaklaşım olarak gösterilebilir.

Eşitlik 2.40 ile 2.42 ve Eşitlik 2.41 ile 2.43 birleştirildiğinde,

$$\frac{\alpha}{\alpha - 1} = \frac{c B C_y}{8 \pi r \sin^2(\phi)} \quad [-] \quad (2.44)$$

$$\frac{\alpha'}{\alpha' + 1} = \frac{c B C_y}{8 \pi r \sin(\phi) \cos(\phi)} \quad [-] \quad (2.45)$$

denklemleri elde edilmiştir.

Burada,

$$w = \frac{v_1(1 - \alpha)}{\sin(\phi)} \quad [m/s] \quad (2.46)$$

veya

$$w = \frac{\omega r(1 + \alpha')}{\cos(\phi)} \quad [m/s] \quad (2.47)$$

ifadeleri kullanılmıştır.

Daha sonra “katı oranı” şu şekilde tanımlanır,

$$\sigma = \frac{c B}{2\pi r} \quad [-] \quad (2.48)$$

Eşitlik 2.44 ve 2.46 çözümlerse,

$$\alpha = \frac{1}{\frac{4\sin^2(\varphi)}{\sigma C_y} + 1} \quad [-] \quad (2.49)$$

$$\alpha' = \frac{1}{\frac{4\sin(\varphi)\cos(\varphi)}{\sigma C_c} - 1} \quad [-] \quad (2.50)$$

Birkaç kanatlı rotorlar için, α ve α' 'nin daha iyi bir yaklaşımı olan aşağıdaki eşitlikler ifade edilebilir,

$$\alpha = \frac{1}{\frac{4F\sin^2(\varphi)}{\sigma C_y} + 1} \quad [-] \quad (2.51)$$

ve

$$\alpha' = \frac{1}{\frac{4F\sin(\varphi)\cos(\varphi)}{\sigma C_x} - 1} \quad [-] \quad (2.52)$$

buradan,

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos \left(\exp \left(-\frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin(\varphi)} \right) \right) \quad [N] \quad (2.53)$$

Bu basit momentum teorisi olan α , $\alpha_c=0,2$ 'den büyük olduğunda bozulur. Bu durumda Eşitlik 2.51 yerine aşağıdaki denklem yazılır,

$$\alpha = 1/2 (2 + K(1 - 2\alpha_c) - \sqrt{(K(1 - 2\alpha_c))^2 + 4(K\alpha_c^2 - 1)}) \quad (2.54)$$

Burada K,

$$K = \frac{4F\sin^2(\varphi)}{\sigma C_y} \quad [-] \quad (2.55)$$

BEM teoreminin hesaplama prosedürü yapılmıştır. Bu hesaplamayla rotorun bir halka elemanının aksenal kuvveti ve gücü elde edilmiştir. Bunun için iterasyon her r yarıçapı için uygulanmıştır. İterasyon adımları aşağıdaki gibidir,

1. Adım: Başla,
2. Adım: a ve a' ya bazı tahmin edilen değer verilir. İlk olarak $a=a'=0$ değeri verilir,
3. Adım: φ değeri Eşitlik 2.39'dan hesaplanır,
4. Adım: Airfoilin C_l ve C_d değerleri bulunur,
5. Adım: $C_x=C_l \sin(\varphi)-C_d \cos(\varphi)$ ve $C_y=C_l \cos(\varphi)+C_d \sin(\varphi)$ ile hesaplanır,
6. Adım: a ve a' değerleri Eşitlik 2.51 ve 2.52 kullanılarak hesaplanır. $a>0,2$ ise a değeri Eşitlik 2.54 kullanılarak hesaplanır,
7. Adım: 5. Adımda bulunan a ve a' değerleri son/ilk tahminden %1 fazlaysa a ve a' ya yeni tahmin değerler verilerek 2.adıma dönülür ve diğer adımlar tekrarlanır,
8. Adım: Durdurulur.

İterasyon işlemi sona erdiğinde, herhangi bir yarıçap için aksenal kuvvet ve teğetsel kuvvet aşağıdaki gibi ifade edilmiştir,

$$U^*(r) = 1/2 \rho w^2 c C_x \quad [N] \quad (2.56)$$

$$T^*(r) = 1/2 \rho w^2 c C_y \quad [N] \quad (2.57)$$

Toplam aksenal kuvvet ve güç ise aşağıdaki eşitliklerle gösterilmiştir,

$$T = B \int_0^R T^*(r) dr \quad [N] \quad (2.58)$$

$$P = \omega B \int_0^R r U^*(r) dr \quad [N] \quad (2.59)$$

2.7. İKİ BOYUTLU AIRFOIL CFD ANALİZİ

NACA 4412 airfoilinun deneysel incelenmesinde boyu 1 metre ve Reynolds sayısı yaklaşık 6000000'dur [37]. Bu çalışmada ise airfoil boyu 0,2 m alınmıştır. Bu yüzden Reynolds sayısı ve airfoil boyutu değişeceği için yeniden bir analiz yapma gereği duyulmuştur. Ansys Fluent analiz programı kullanılarak NACA 4412 airfoilinun CFD analizi yapılmıştır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, birçok rüzgar türbin kanat tasarımının iyileştirilmesi ve aerodinamik performansının incelenmesi için kullanılan iyi bir metottur [46,47]. CFD analizlerinin deneysel incelemelere göre çok sayıda avantajı vardır. CFD analizlerinin sonuçları, simülasyonlarla kısa sürede incelenebilir. Ayrıca sonuçlar hızlı şekilde tekrar elde edilebilir. Deneysel sonuçlara göre CFD analizinde birçok parametrenin sonucu aynı anda alınabilir. Ayrıca her hücre elemanında değerler kolay bir şekilde hesaplanabilir. Deneysel çalışmalarda tasarımın iyileştirilmesi için çok sayıda prototipin üretilmesi gerekir ve bu hem maliyet hem de zaman açısından dezavantajdır. CFD analizinde ise simülasyonlar incelenerek tasarım iyileştirilmesi yapılabilir. Bu da hem zaman açısından hem de maliyet açısından avantajlıdır [48].

CFD, Navier Stokes denklemleri ile çözülür. Navier Stokes denklemleri ise momentum korunum ve kütle korunum denklemleridir ve sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmesiyle sonuçlar elde edilir [49,50]. Bu denklemlerin iki boyutlu olarak gösterimi aşağıdaki gibidir [51]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.60)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho u'v') \quad (2.61)$$

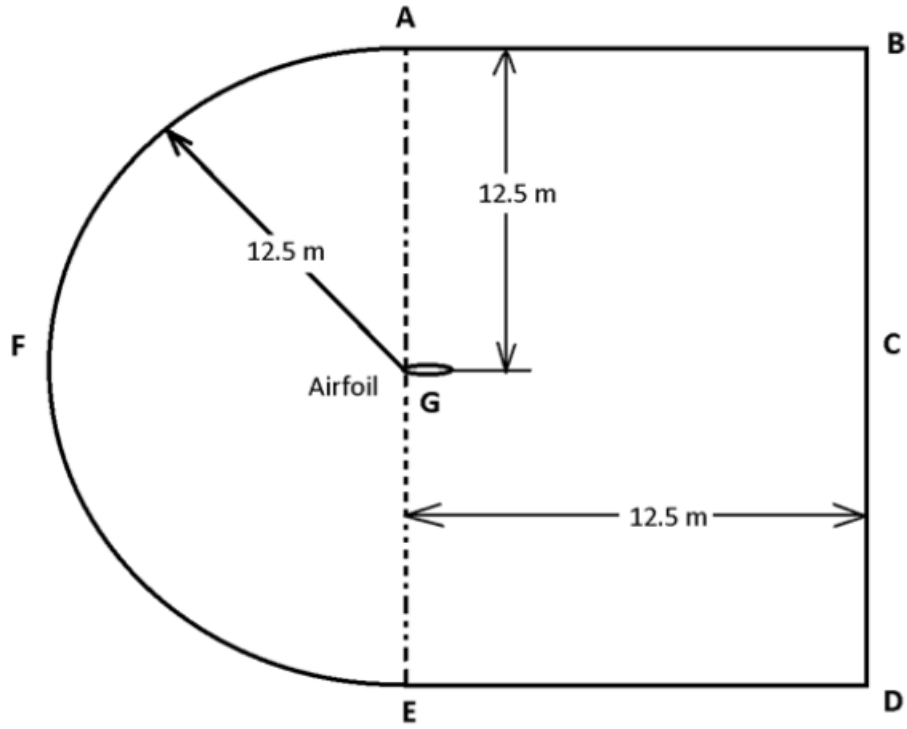
$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho u'v') \quad (2.62)$$

$$\tau_{xy} = -\rho u'v' = \eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.63)$$

Yukarıdaki eşitliklerde ifade edilen u ve v sembolleri x ve y doğrultusundaki hız bileşenlerini belirtmektedir. P harfi basıncı, ρ harfi yoğunluğu, μ harfi dinamik viskoziteyi ve τ harfi türbülans kayma gerilmesini ifade etmektedir. u' ve v' harfleri ise yatay ve düşey türbülans hız sapmalarını göstermektedir. Türbülans kayma gerilmesi denkleminde görülen η harfi ise türbülans viskoziteyi temsil etmektedir. Navier Stokes denklemlerinin üç boyutlu olanları da mevcuttur. Çeşitli durumlara göre geliştirilmiş çok sayıda türbülans modelleri mevcuttur. Bu türbülans modelleri arasında en yaygın kullanılanlar spalart allmaras, k-epsilon ve k-omega'dır. Tüm akışları kapsayan ve en doğru sonucu veren bir türbülans modeli yoktur. Bu yüzden bir akış için farklı türbülans modelleri kullanılarak alınan sonuçlar irdelenip en mantıklı sonucu veren seçilebilir. Bu tez çalışmasında ise k-epsilon türbülans modeli seçilmiştir [21].

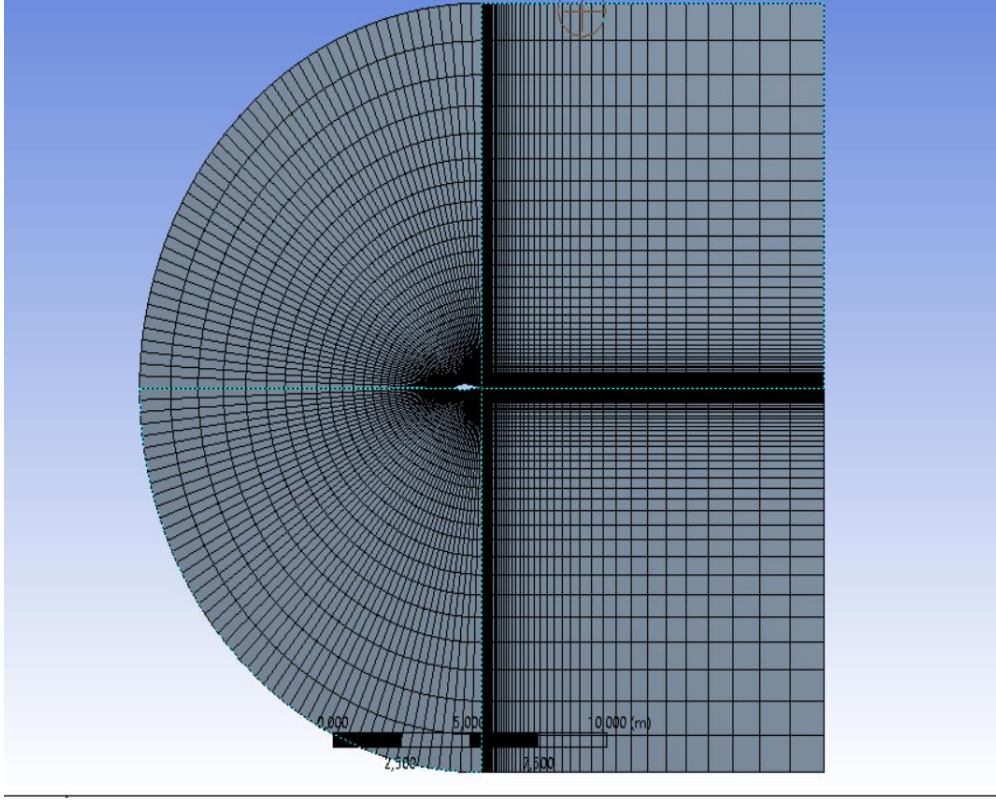
Bir airfoil etrafındaki aerodinamik katsayı değerleri (C_L , C_D , C_M) deneysel olarak, teorik formüller kullanılarak veya CFD kullanılarak hesaplanabilir [52,53]. Bu çalışmada CFD yöntemi kullanılarak airfoillerin aerodinamik katsayıları elde edilmiştir. Bu yöntem gerçekleştirilirken birçok aşama vardır.

Bu aşamalar şu şekildedir: belirlenen airfoilin 2 boyutlu koordinatları, bilgisayar programı olan Ansys Fluent analiz programına aktarılmıştır. Airfoilin geometrisi etrafında aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi C şeklindeki bir akış alanı sınırları oluşturulmuştur. Bu durum deneysel çalışmada kullanılan rüzgar tünelinin görevini yapar. Sınır koşullarını oluşturmak için F eğrisi olan inlet-giriş kısmına hız değerleri girilmiştir. C çizgisi olan outlet-çıkış kısmına ise basınç değeri girilmiştir. Airfoilin kenar çizgisi olan G eğrisi ise duvar-kaymama koşulu olarak belirtilmiştir. ED ve AB kenarları simetrik olarak tanımlanmıştır [54].



Şekil 2.20. Airfoil akış alanı [55].

Elde edilen geometri ve akış alanı, mesh kısmında hürelere bölünmüştür. İlk olarak yapılandırılmamış üçgen mesh sonrasında ise yapılandırılmış dörtgen mesh uygulanmıştır (Şekil 2.21). Mesh ile küçük hürelere bölünmesinin amacı, korunum denklemlerinin her bir hücrede çözülmesidir. Hesaplı akışkanlar dinamiği çözümünde doğruluğu artıran en önemli durumlardan birisi bu hürelere bağlıdır [54].



Şekil 2.21.Yapılandırılmış mesh.

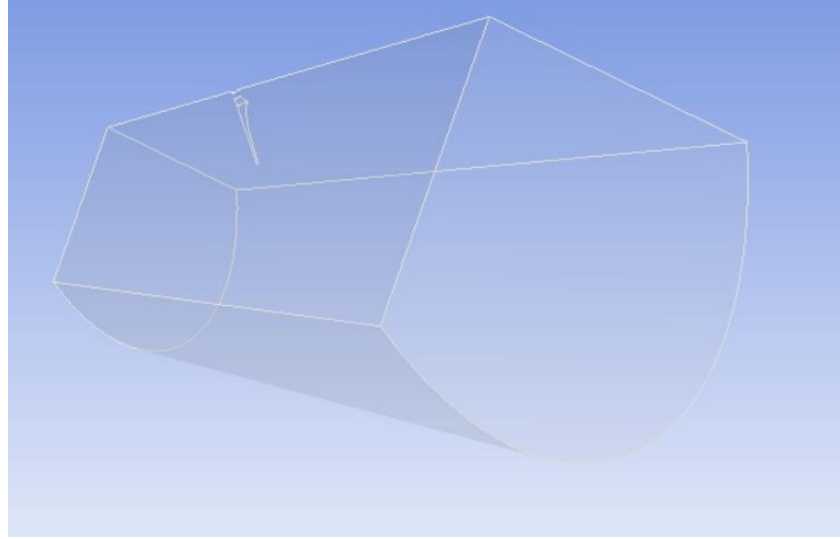
Geometri oluşturma, gerekli sınırları belirleme ve mesh işlemi tamamlandıktan sonra Ansys programının çözüm işlemi başlatılmıştır. Farklı hücum açılarında ve 10 m/s'lik hızda yapılan bu analizlerden sonuçlar elde edilmiştir.

2.8. ÜÇ BOYUTLU RÜZGÂR TÜRBİN CFD ANALİZİ

İki boyutlu CFD analizi yapılan airfoillerin oluşturduğu rüzgar türbininin üç boyutlu CFD analizi yapılmıştır. Buradaki amaç rüzgar türbininden elde edilecek güç değerlerini belirlenen boyutlardaki kanatlarda hesaplamaktır. Yatay eksenli rüzgar türbininin geometrik tasarımı, akış bölgesi oluşumu ve çözümü gibi aşamalar Ansys Fluent bilgisayar analiz programı kullanılarak yapılmıştır.

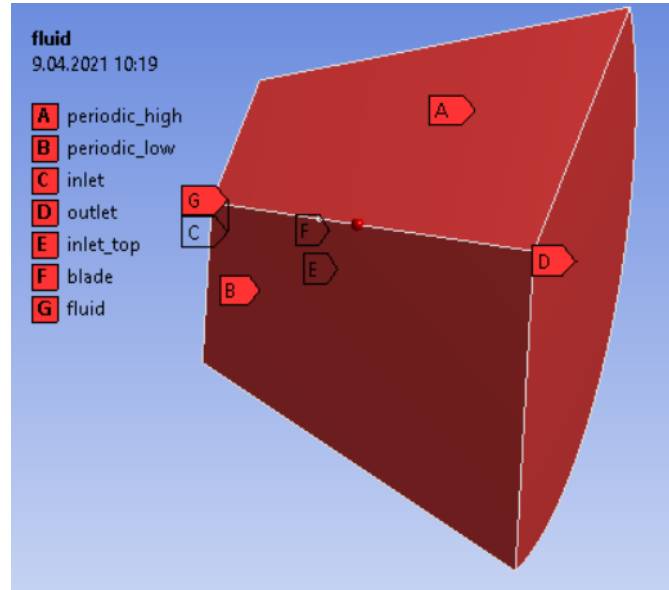
İlk olarak NACA 4412 airfoili kullanılarak rüzgar türbin kanadı geometrisi oluşturulmuştur. Analiz edilecek rüzgar türbini 3 kanatlıdır. Ancak geometri oluşturulurken 1/3 kısmı çizilmiş ve akış alanı oluşturulmuştur (Şekil 2.22). Çünkü geometrinin tamamına mesh işlemi uygulandığında bilgisayarların kapasitesinden

dolayısı sıkı bir mesh yapısı olmayacaktır. Bu amaçla geometrinin üçte birlik kısmı yani rüzgar türbininin sadece bir kanadı oluşturularak daha yoğun bir mesh yapısı uygulanıp gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmiştir [47].



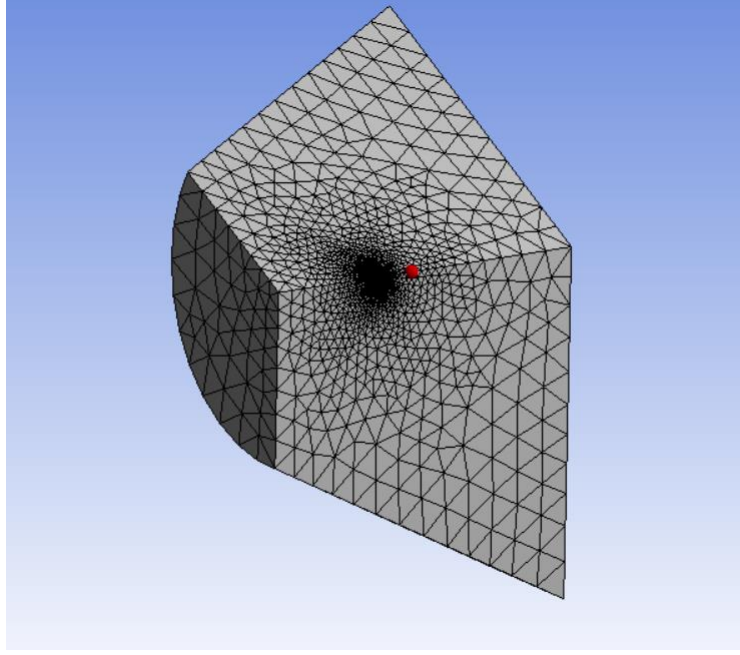
Şekil 2.22. Rüzgar türbin akış alanı.

Oluşturulan akış alanı için akış tipi daimî akış olarak belirlenmiştir. Akışkan olarak ise hava seçilerek sıkıştırılmaz akış durumu uygulanmıştır. Mesh işlemine başlamadan önce geometride bulunan yüzeylerde isimlendirme yapılmıştır (Şekil 2.23).



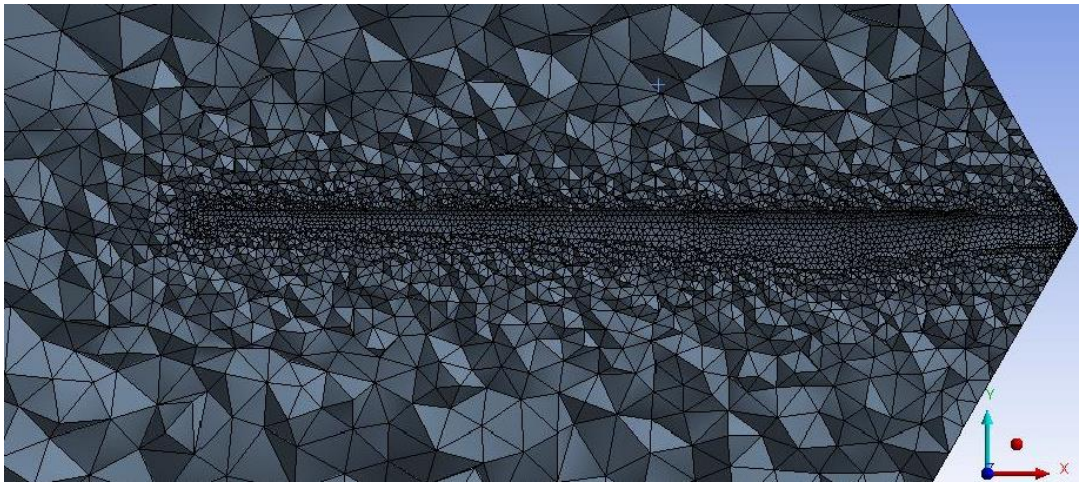
Şekil 2.23. Geometri yüzeylerinin isimlendirilmesi.

Yüzeylerinin isimlendirilmesi yapılan geometrinin mesh işlemi yapılmıştır. Mesh işlemi uygulanırken hücre oluşturmada zorluk olmaması için ve sonraki adımlarda yapılacak lokal mesh işlemlerine geçişi kolaylaştırmak için akış alanında yapılandırılmamış üçgen piramit yöntemi kullanılmıştır (Şekil 2.24).



Şekil 2.24. Akış alanına uygulanan mesh işlemi.

Akış alanına genel mesh yapıldıktan sonra mesh sayısını ve kalitesini artırmak için lokal mesh uygulanmıştır. Bu sayede rüzgâr türbin kanadının bulunduğu bölgedeki hücre sayısı artırılarak daha doğru sonuçlar bulunması sağlanmıştır (Şekil 2.25).



Şekil 2.25. Rüzgâr türbin kanadına uygulanan lokal mesh yöntemi.

Türbülans modelleri arasında standart k-epsilon türbülans modeli akış çalışmalarında çok sayıda tercih edilmektedir. Bunun nedeni gerçeğe daha yakın ve doğru sonuçları vermesidir. Bu çalışmada da bu durumlar göz önüne alınarak standart k-epsilon türbülans modeli seçilmiştir [56].

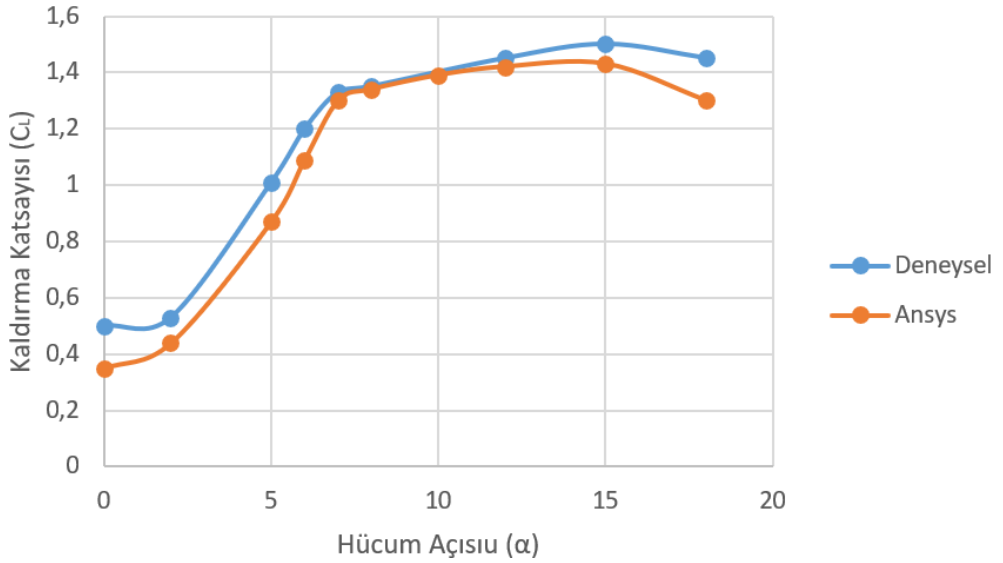
Yatay eksenli rüzgâr türbini için yapılan 3 boyutlu CFD analizi farklı mesh sayılarında yapılarak sonuçlarda karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda hücre sayısı 2000000 elemandan sonraki sayılarda sonuçların değişmediği gözlemlenmiştir. Aynı şekilde çözüm esnasında yakınsamanın 1500 iterasyondan sonra değişmediği görülmüştür.

BÖLÜM 3

BULGULAR VE TARTIŞMALAR

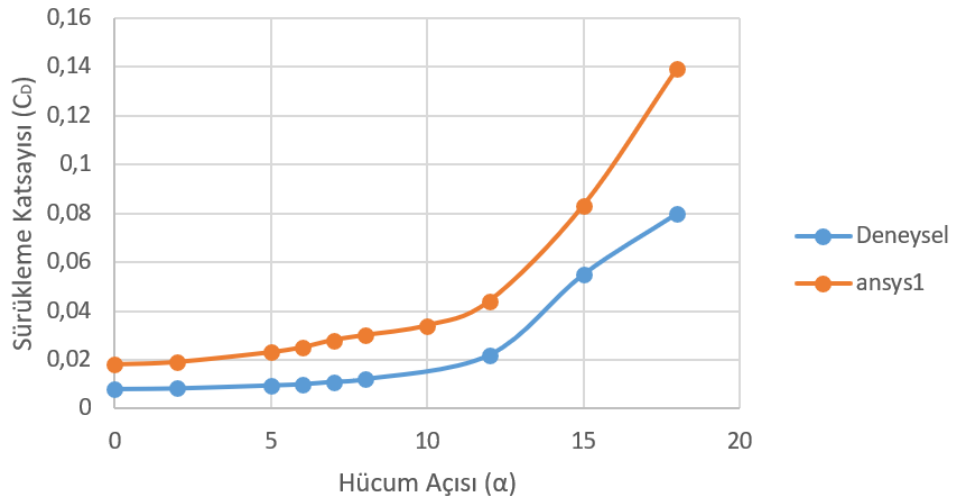
3.1. İKİ BOYUTLU CFD ANALİZ SONUÇLARI

Literatürde NACA 4412 airfoili için veriler bulunmaktadır. Ancak bu verilere airfoilin farklı boyutlarında ve yüksek Reynolds sayılarında ulaşılmıştır. Bu çalışmada ise airfoil boyutu 0,2 metre olarak belirlenmiştir. Bu yüzden Ansys bilgisayar analiz programı kullanılarak yeniden analiz yapılmıştır. Analiz yapılırken türbülans modeli olarak k-epsilon türbülans modeli seçilmiştir. Rüzgar hızı ise 10 m/s olarak belirlenmiştir. Her bir 0°, 2°, 5°, 8°, 10°, 12°, 15° ve 18°'lik hücum açısında analiz yapılmıştır. Yapılan analizlerde ilk olarak aerodinamik katsayılar elde edilmiştir. Bu katsayı değerleri 15 dereceden sonraki hücum açılarında mantıklı değerler olmadığından dolayı analiz 18 derecelik hücum açısına kadar gerçekleştirilmiştir. Bu değerler grafik haline getirilerek aşağıda gösterilmiştir.



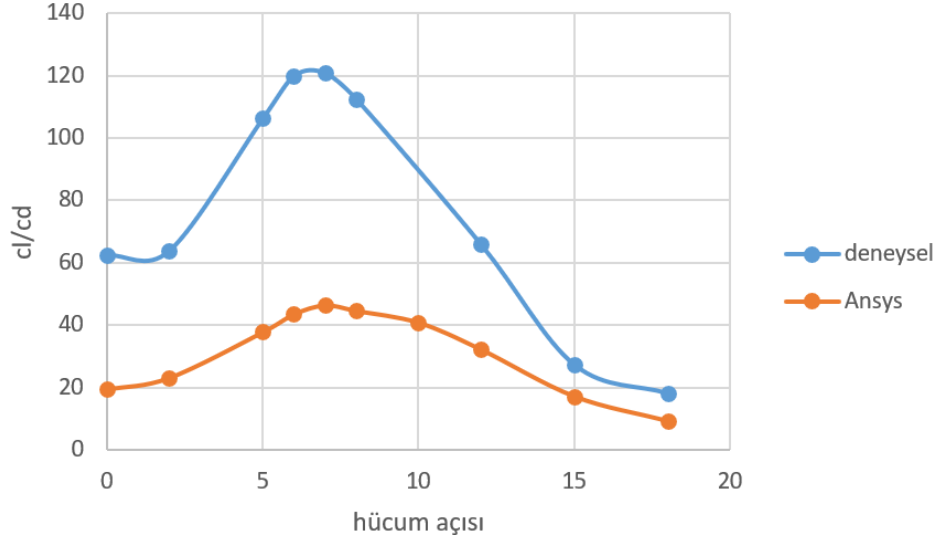
Şekil 3.1. NACA 4412 kaldırma katsayısı.

NACA 4412 airfoili için yapılan analizde kaldırma katsayısı sonuçları ile literatürde [37] yapılan deneysel çalışmadan elde edilen kaldırma katsayısı sonuçları Şekil 3.1’de verilmiştir. Literatürde airfoil boyutu 1 metre, bu çalışmada ise 0,2 metre olarak tasarlandığı için Reynolds sayıları değişmektedir. Bundan dolayı Şekil 3.1’de verilen değerler arasında sapmalar bulunmaktadır. 15 derece hücum açısı, her iki çalışmada da stall hücum açısıdır. Yani 15 derecelik hücum açısından sonra kaldırma katsayısı değeri düşmeye başlamıştır.



Şekil 3.2. NACA 4412 sürüklenme katsayısı.

NACA 4412 airfoili için yapılan analizde sürüklenme katsayısı sonuçları ile literatürde [37] yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sürüklenme katsayısı sonuçları Şekil 3.2’de verilmiştir. Reynolds sayısının değişmesinden dolayı değerler arasında sapmalar bulunmaktadır. Reynolds sayısı düştüğü için sürüklenme katsayısı değeri artmaktadır. Sürüklenme katsayısı değerinin artması aerodinamik performansı olumsuz etkilemektedir.



Şekil 3.3. NACA 4412 süzülme oranı (C_L/C_D).

Şekil 3.3'te verilen süzülme oranı grafiğine bakıldığında Ansys'de yapılan analizin değerleri daha düşüktür. Ancak her iki çalışmada da süzülme oranının en yüksek olduğu hücum açısı 7 derecedir. Bu durum yapılan analizin doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir. İki çalışma arasında değer farkının olmasının sebebi ise yine kanat boyunun ve Reynolds sayısının farklı olmasıdır.

NACA 4412 için yapılan çalışmalarda belirtildiği gibi stall açısı 15 derecedir. Bu açıdan sonra analiz programlarıyla yapılan incelemeler mantıklı sonuçlar vermemektedir. 90 dereceye kadar olan hücum açılarındaki aerodinamik katsayıları belirlemek için Viterna eşitlikleri kullanılmıştır. Stall öncesi aerodinamik katsayı değerlerini belirlemek için ise polinom fonksiyon oluşturulmuştur. Ansys 'de yapılan analizlerde 0°, 5°, 10°, 15°, 18° hücum açılarındaki C_L ve C_D değerleri kullanılarak 4.dereceden bir fonksiyon tanımlanmıştır. Bölüm 2.4'te verilen kaldırma kuvvet polinomundaki katsayılar ve sürüklenme kuvvet polinomundaki katsayılar bulunmuştur.

Çizelge 3.1. NACA 4412 Stall öncesi aerodinamik katsayılar.

	C_L		C_D
k_0	0,35	t_0	0,018
k_1	0,03493	t_1	0,003198
k_2	0,02319	t_2	-0,0007637
k_3	-0,002122	t_3	0,00006926
k_4	0,00004942	t_4	-0,8865.10 ⁻⁵

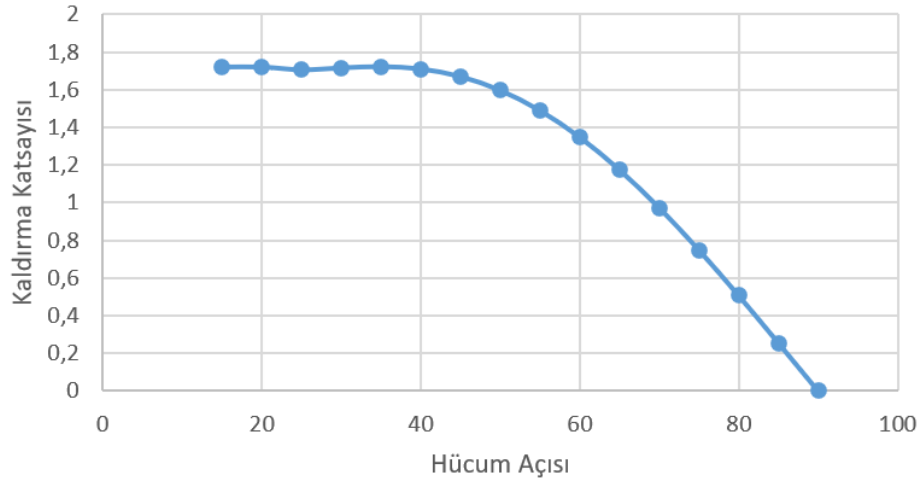
Bu veriler kullanılarak stall öncesi tüm hücum açılarındaki aerodinamik performans değerleri hesaplanabilir.

Stall sonrası hücum açılarındaki aerodinamik katsayıları belirlemek için Viterna eşitlikleri kullanılmıştır. Bu eşitliklerle elde edilen değerler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. NACA 4412 stall sonrası aerodinamik katsayılar.

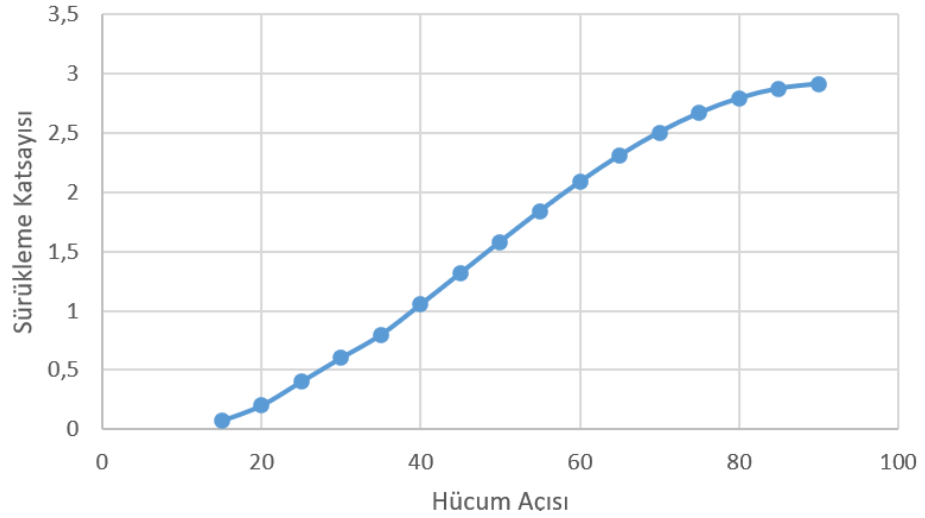
A_1	1,455
A_2	0,3044
B_1	2,91
B_2	-0,1981
$(C_L)_{stall}$	1,3
$(C_D)_{stall}$	0,011

Elde edilen katsayı değerlerine göre NACA 4412 airfoili için stall sonrası hücum açılarındaki C_L ve C_D değerlerini gösteren polar grafikler aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 3.4. NACA 4412 stall sonrası kaldırma katsayı değerleri.

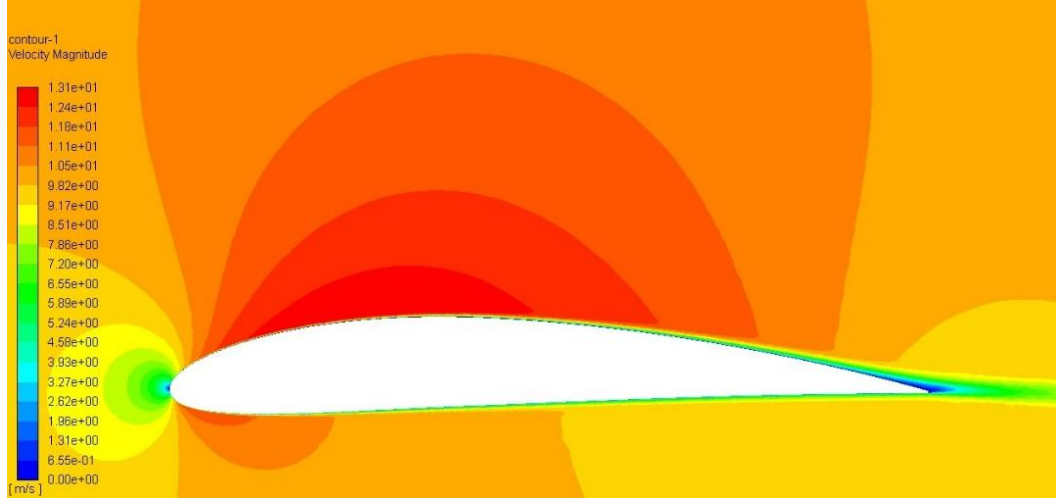
Stall sonrası durumlarda NACA 4412 airfoilin kaldırma katsayısı değerleri Şekil 3.4'te grafik olarak gösterilmiştir. 90 derece hücum açısına ulaştığında kaldırma katsayısı 0 olmaktadır. Bu yüzden 90 derece hücum açısında airfoile hiçbir şekilde kaldırma kuvveti etki etmeyecektir.



Şekil 3.5. NACA 4412 stall sonrası sürüklenme katsayı değerleri.

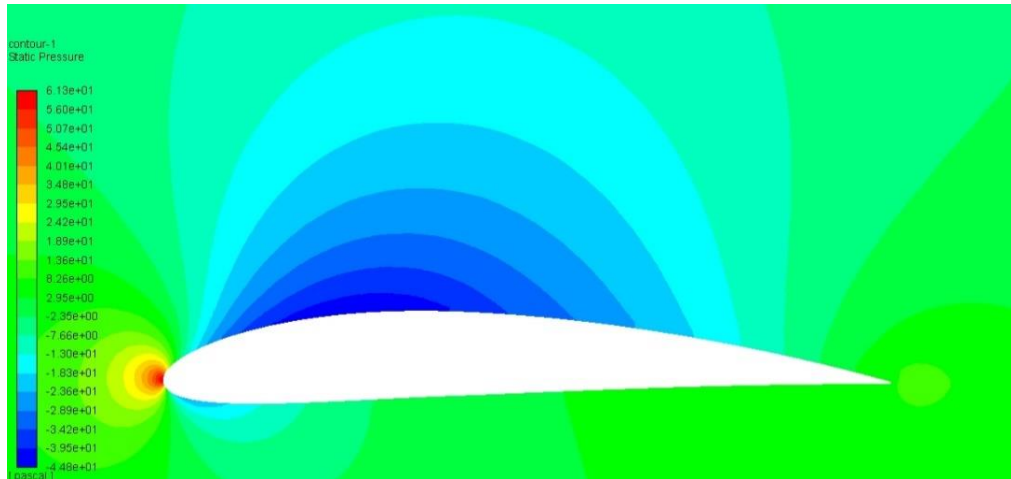
Stall sonrası durumlarda NACA 4412 airfoilin sürüklenme katsayısı değerleri Şekil 3.5'te grafik olarak gösterilmiştir. Stall durumunda sürüklenme katsayısı en düşük değerini almıştır. Bu durumda airfoilin aerodinamik performansı en yüksek durumdadır. Hücum açısı 90 dereceye ulaştığında ise sürüklenme katsayısı en yüksek değeri alarak airfoile etki eden sürüklenme kuvveti en yüksek değere ulaşmıştır.

NACA 4412 airfoilinun iki boyutlu CFD analizi ile farklı hücum açılarındaki kaldırma ve sürüklenme katsayı değerleri bulunmuştur. Bu analizle birlikte ayrıca airfoile etki eden basınç ve hız konturları da incelenmiştir. 0° , 2° , 5° , 8° , 10° , 12° , 15° ve 18° hücum açılarındaki basınç ve hız konturlarının her biri ayrı ayrı incelenmiştir.



Şekil 3.6. NACA 4412 airfoilinun 0° hücum açısındaki hızı.

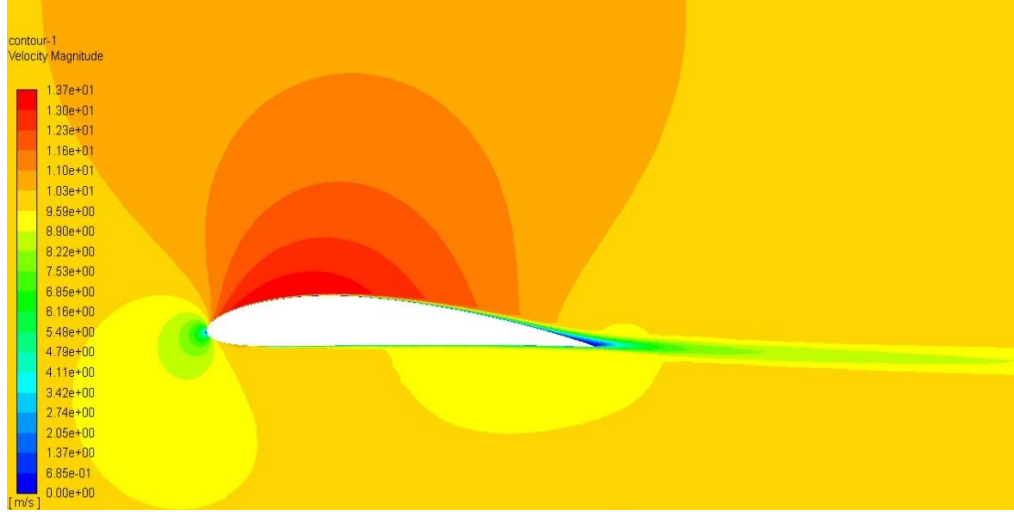
Şekil 3.6’da hücum açısı 0° iken yapılan CFD analizinde 10 m/s hava hızının, airfoilin üst kısmından geçerken 13,1 m/s hıza ulaştığı görülmektedir. Airfoilin ön ve arka kısımlarında ise rüzgar hızı 0 m/s olarak görülmektedir.



Şekil 3.7. NACA 4412 airfoilinun 0° hücum açısındaki basıncı.

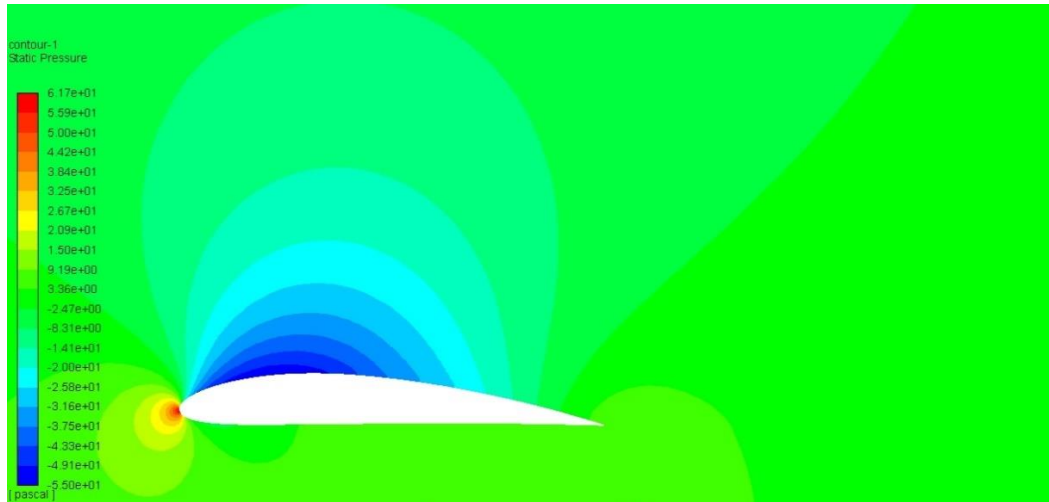
Şekil 3.7’de hücum açısı 0° iken yapılan CFD analizinde havanın statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 pascal olarak görülmektedir. Havanın statik basıncı airfoilin üst

kısından geçerken -44,8 paskal, alt kısmından geçerken ise +61,3 paskal olarak görülmektedir.



Şekil 3.8. NACA 4412 airfoilinun 2° hücum açısındaki hızı.

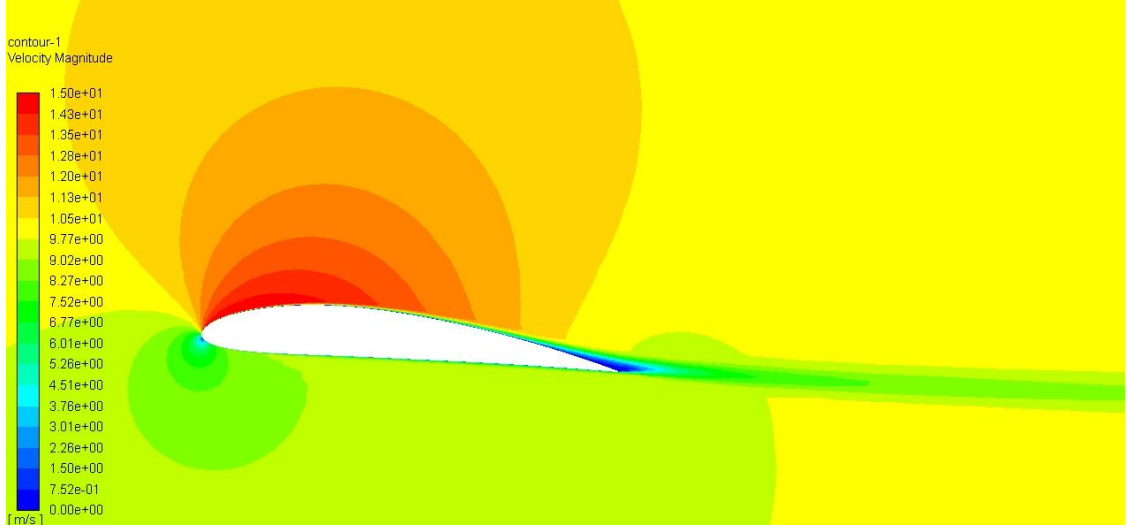
Şekil 3.8’de hücum açısı 2° iken yapılan CFD analizinde 10 m/s hava hızının, airfoilin üst kısmından geçerken 13,7 m/s hıza ulaştığı görülmektedir. Airfoilin ön ve arka kısımlarında ise rüzgar hızı 0 m/s olarak görülmektedir.



Şekil 3.9. NACA 4412 airfoilinun 2° hücum açısındaki basıncı.

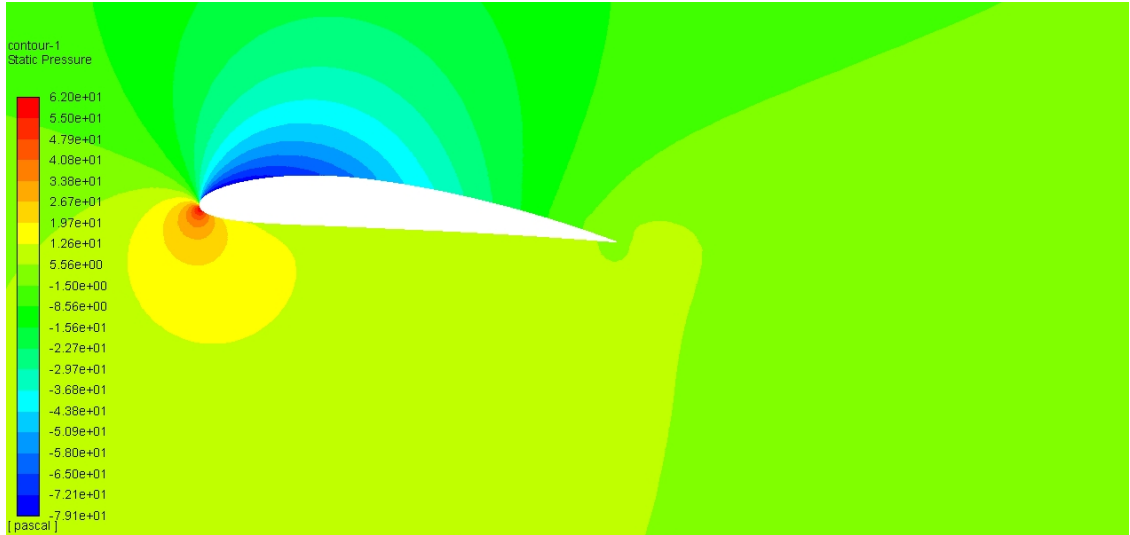
Şekil 3.9’da hücum açısı 2° iken yapılan CFD analizinde havanın statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 paskal olarak görülmektedir. Havanın statik basıncı airfoilin üst

kısından geçerken -55 paskal, alt kısmından geçerken ise +61,7 paskal olarak görülmektedir.



Şekil 3.10. NACA 4412 airfoilinin 5° hücum açısındaki hızı.

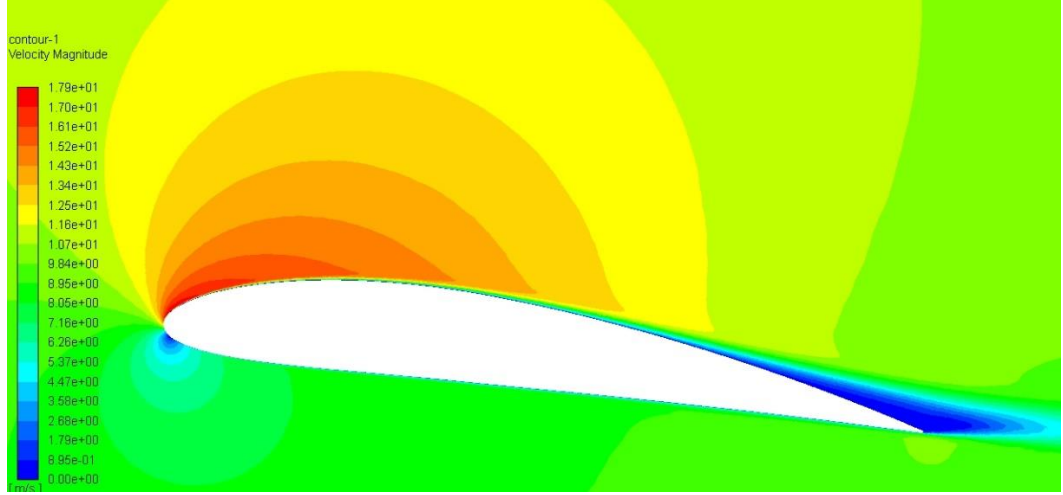
Şekil 3.10’da hücum açısı 5° iken yapılan CFD analizinde 10 m/s hava hızının, airfoilin üst kısmından geçerken 15 m/s hıza ulaştığı görülmektedir. Airfoilin ön ve arka kısımlarında ise rüzgar hızı 0 m/s olarak görülmektedir.



Şekil 3.11. NACA 4412 airfoilinin 5° hücum açısındaki basıncı.

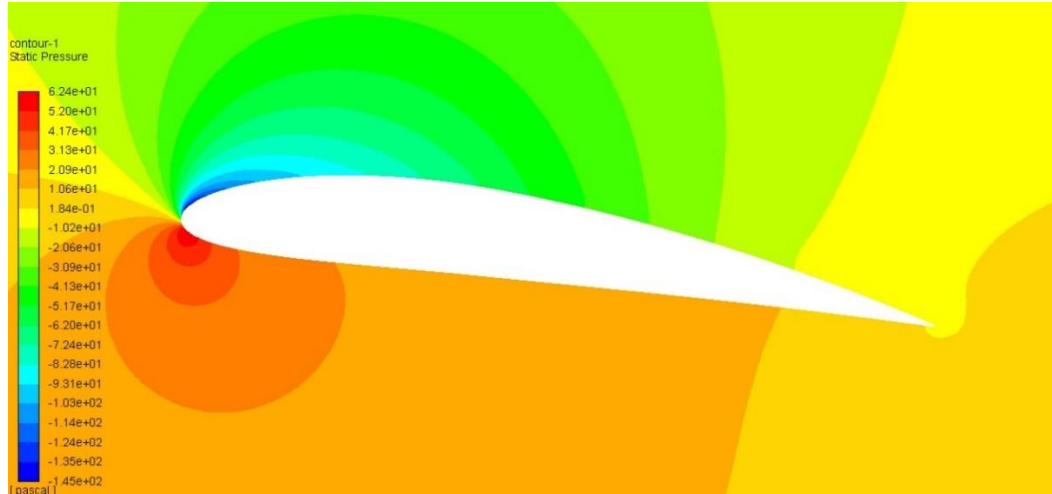
Şekil 3.11’de hücum açısı 5° iken yapılan CFD analizinde havanın statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 paskal olarak görülmektedir. Havanın statik basıncı airfoilin üst

kısından geçerken -79,1 paskal, alt kısmından geçerken ise +62 paskal olarak görülmektedir.



Şekil 3.12. NACA 4412 airfoilinin 8° hücum açısındaki hızı.

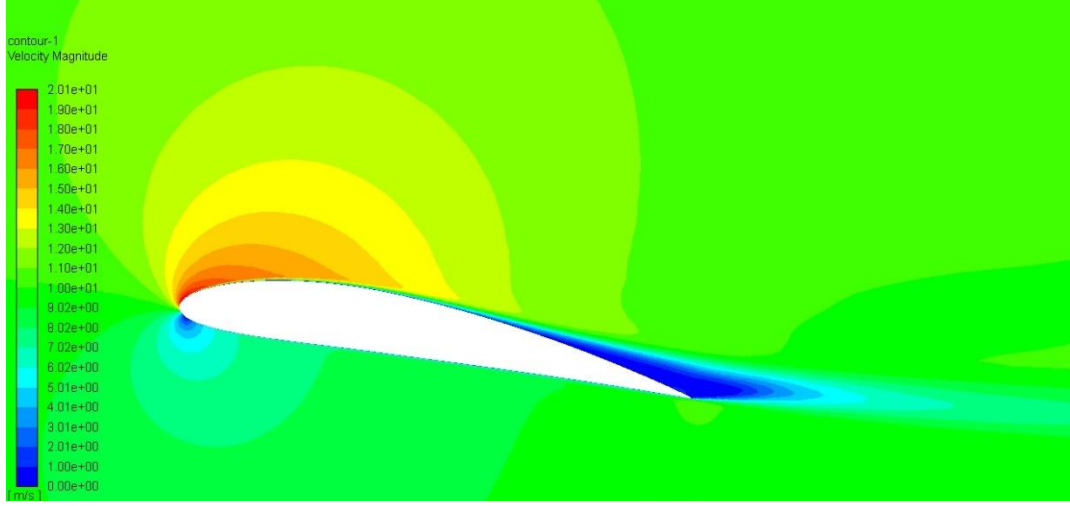
Şekil 3.12’de hücum açısı 8° iken yapılan CFD analizinde 10 m/s hava hızının, airfoilin üst kısmından geçerken 18 m/s hıza ulaştığı görülmektedir. Airfoilin ön ve arka kısımlarında ise rüzgar hızı 0 m/s olarak görülmektedir.



Şekil 3.13. NACA 4412 airfoilinin 8° hücum açısındaki basıncı.

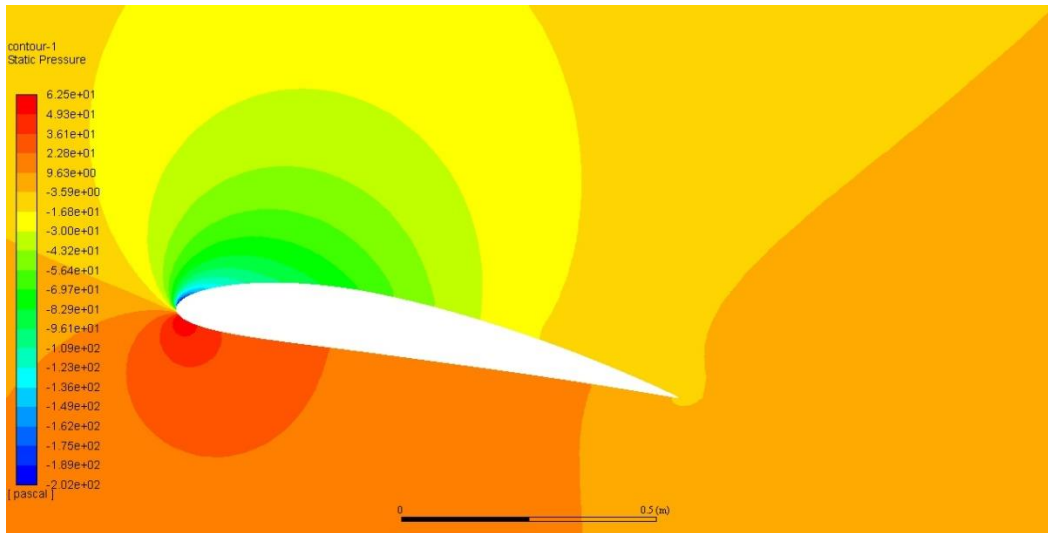
Şekil 3.13’te hücum açısı 8° iken yapılan CFD analizinde havanın statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 paskal olarak görülmektedir. Havanın statik basıncı airfoilin üst

kısından geçerken -145 paskal, alt kısmından geçerken ise +62,4 paskal olarak görülmektedir.



Şekil 3.14. NACA 4412 airfoilinun 10° hücum açısındaki hızı.

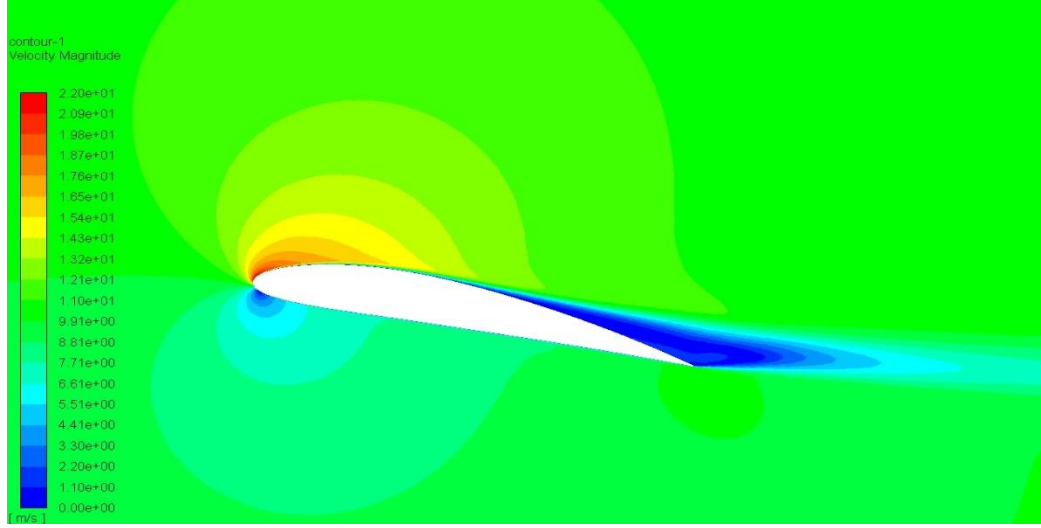
Şekil 3.14'te hücum açısı 10° iken yapılan CFD analizinde 10 m/s hava hızınının, airfoilin üst kısmından geçerken 20,1 m/s hıza ulaştığı görülmektedir. Airfoilin ön ve arka kısımlarında ise rüzgar hızı 0 m/s olarak görülmektedir.



Şekil 3.15. NACA 4412 airfoilinun 10° hücum açısındaki basıncı.

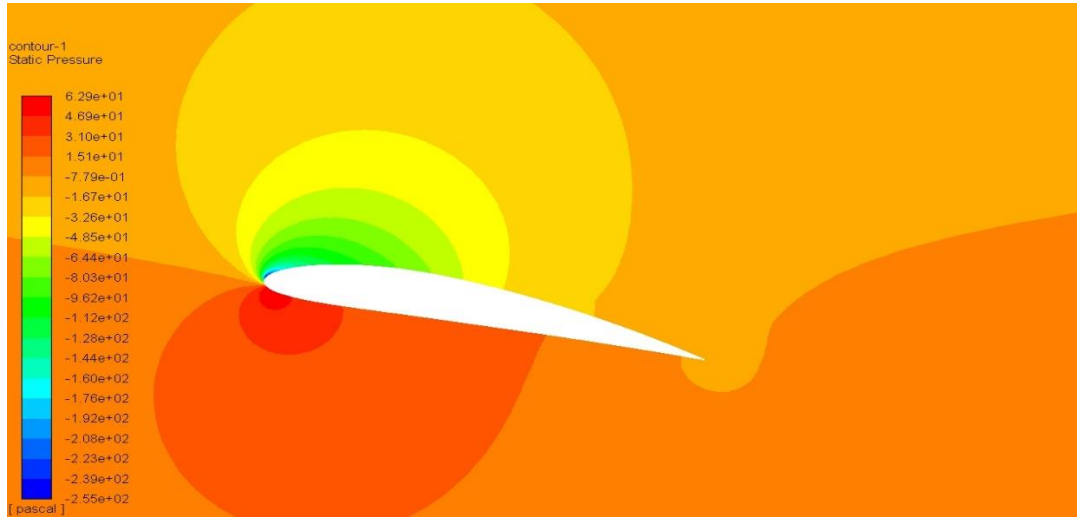
Şekil 3.15'te hücum açısı 10° iken yapılan CFD analizinde havanın statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 paskal olarak görülmektedir. Havanın statik basıncı airfoilin üst

kısından geçerken -202 paskal, alt kısmından geçerken ise +62,5 paskal olarak görülmektedir.



Şekil 3.16. NACA 4412 airfoilinın 12° hücum açısındaki hızı.

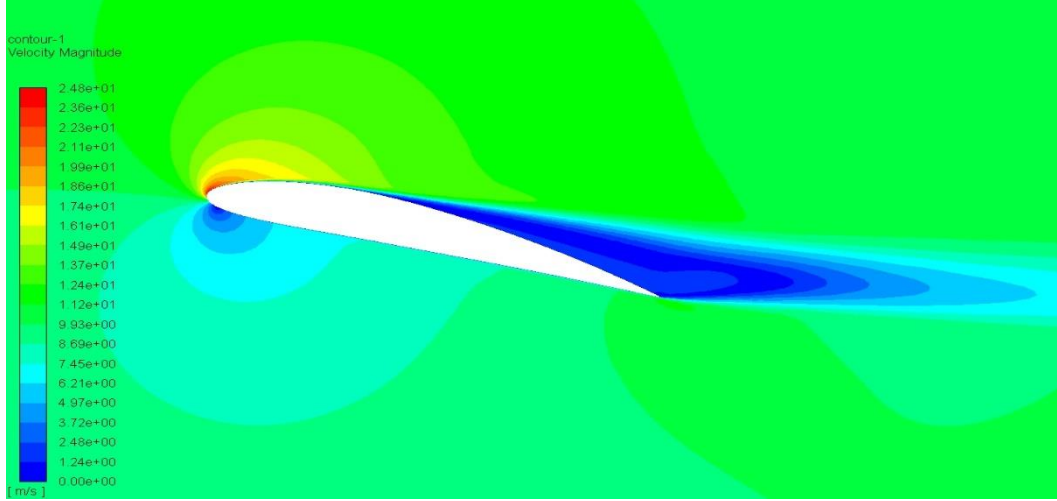
Şekil 3.16’da hücum açısı 12° iken yapılan CFD analizinde 10 m/s hava hızının, airfoilin st kısmından geçerken 22 m/s hızı ulaştığı görülmektedir. Airfoilin n ve arka kısımlarında ise rüzgar hızı 0 m/s olarak görülmektedir.



Şekil 3.17. NACA 4412 airfoilinın 12° hücum açısındaki basıncı.

Şekil 3.17’de hücum açısı 12° iken yapılan CFD analizinde havanın statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 paskal olarak görülmektedir. Havanın statik basıncı airfoilin st

kısından geçerken -202 paskal, alt kısmından geçerken ise +62,5 paskal olarak görülmektedir.



Şekil 3.18. NACA 4412 airfoilinun 15° hücum açısındaki hızı.

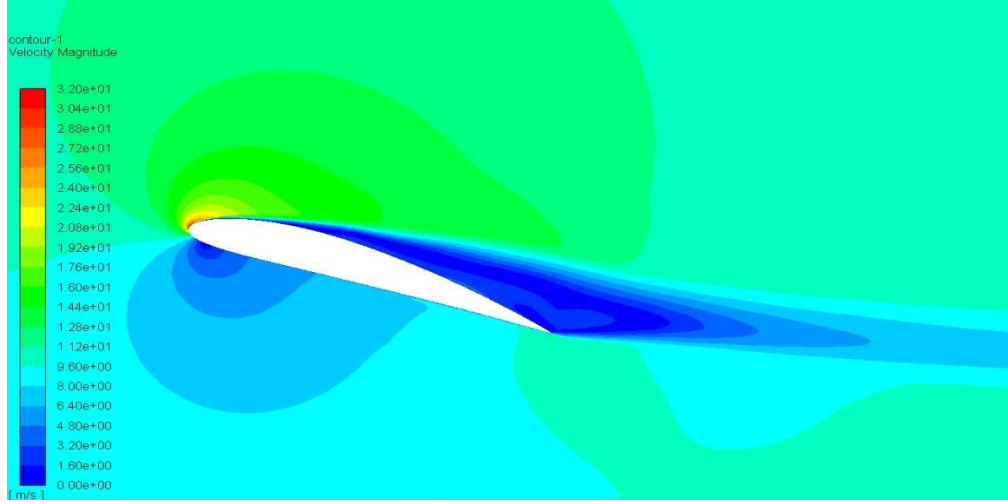
Şekil 3.18’de hücum açısı 15° iken yapılan CFD analizinde 10 m/s hava hızınının, airfoilin üst kısmından geçerken 24,8 m/s hıza ulaştığı görülmektedir. Airfoilin ön ve arka kısımlarında ise rüzgar hızı 0 m/s olarak görülmektedir.



Şekil 3.19. NACA 4412 airfoilinun 15° hücum açısındaki basıncı.

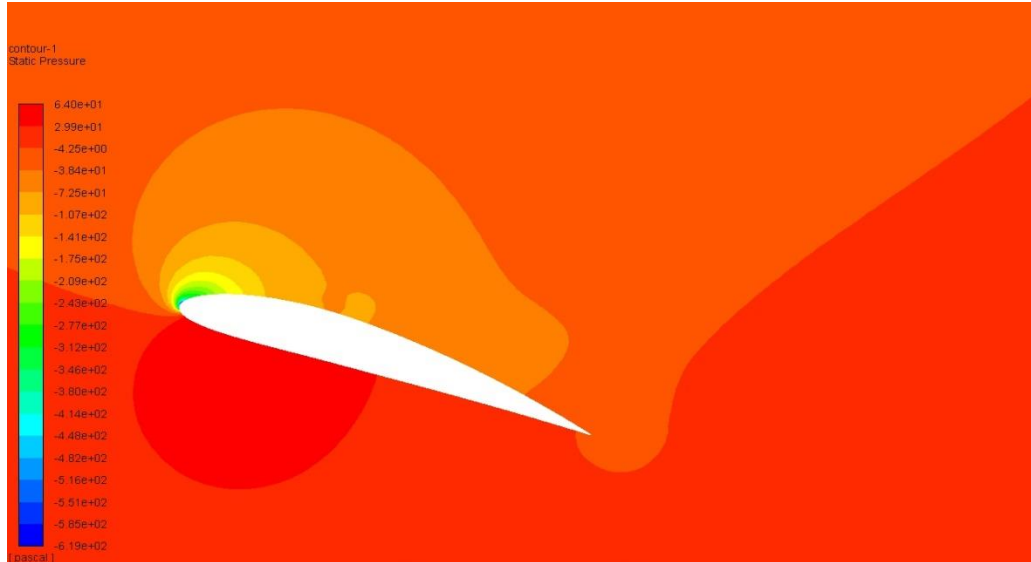
Şekil 3.19’da hücum açısı 15° iken yapılan CFD analizinde havanın statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 paskal olarak görülmektedir. Havanın statik basıncı airfoilin üst

kısından geçerken -343 paskal, alt kısmından geçerken ise +63,4 paskal olarak görülmektedir.



Şekil 3.20. NACA 4412 airfoilinin 18° hücum açısındaki hızı.

Şekil 3.20’de hücum açısı 18° iken yapılan CFD analizinde 10 m/s hava hızınının, airfoilin st kısmından geçerken 32 m/s hıza ulaştığı görülmektedir. Airfoilin n ve arka kısımlarında ise rüzgar hızı 0 m/s olarak görülmektedir.



Şekil 3.21. NACA 4412 airfoilinin 18° hücum açısındaki basıncı.

Şekil 3.21’de hücum açısı 18° iken yapılan CFD analizinde havanın statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 paskal olarak görülmektedir. Havanın statik basıncı airfoilin st

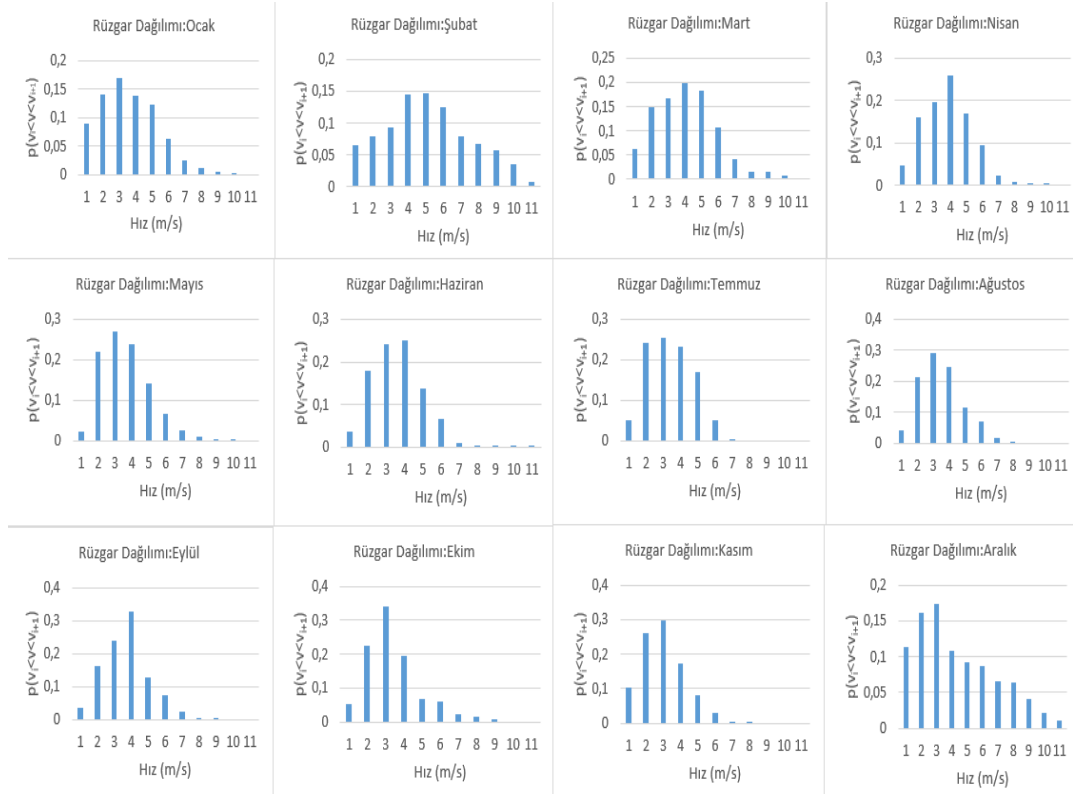
kısından geçerken -619 paskal, alt kısından geçerken ise +64 paskal olarak görülmektedir. Verilen basınç konturları kırmızı, sarı ve yeşil renkli bölgelerde basıncın yüksek, mavi bölgelerde ise basıncın düşük olduğunu göstermektedir. Airfoillerin n uçlarındaki basınç kırmızı renkle gösterilmiştir. nkn bu bölgeye çarpan rüzgar sönümlenerek hızı sıfır olmaktadır ve basınç yüksek değeri almaktadır.

Basınç konturları bir bütün olarak incelendiğinde ise airfoilin st yüzeyindeki basınç değerleri, alt yüzeyindeki basınç değerlerinden kk olduğu gözlenmiştir. Hücum açısı arttıa basınç farkı artmaktadır. Oluşan bu basınç farklı ile airfoilin alt yüzeyinden st yüzeyine doğru bir kaldırma kuvveti oluşmaktadır. Bu durumda ise airfoilin alt yüzeyindeki basınç ne kadar fazla olursa ve st yüzeyindeki basınç ne kadar düşük olursa o kadar yüksek kaldırma kuvveti oluşmaktadır.

Hız konturları incelendiğinde ise kırmızı, sarı ve yeşil renkli bölgelerde rüzgar hızı yüksek, mavi bölgelerde ise düşük olduğu anlaşılmaktadır. Airfoillerin n kısımlarına çarpan rüzgarın hızı sıfır olur. Hücum açısı arttıa rüzgar hızı, airfoilin st tarafında artar ve alt kısmında oluşun basınla birlikte airfoil kaldırma kuvvetinin etkisi altına girer. Stall durumuna girdikten sonra ise sürükleme kuvveti artıp kaldırma kuvveti azalacaktır. Bu durumda da airfoil daha fazla ykselememektedir.

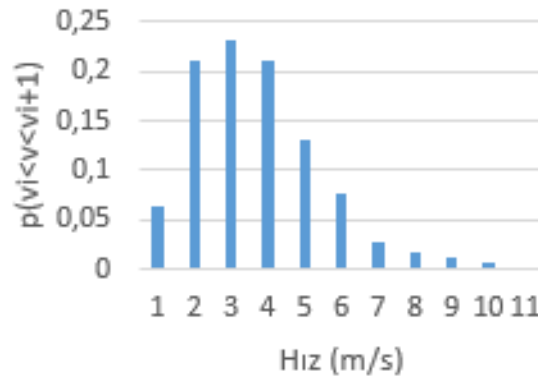
3.2. YILLIK ENERJİ ÜRETİMİ VE RÜZGAR DAğILIMI

Karabük ili Ovacık ilçesine ait bir yıllık rüzgar verileri incelenmiştir. Her ay için rüzgar dağılım grafikleri oluşturulup sonrasında ise bir yıla ait rüzgar dağılım grafiği elde edilmiştir. Aralık, Ocak ve Şubat aylarında esen rüzgarların hızı daha düşük iken yaz aylarında rüzgar hızı daha yüksektir (Şekil 3.22). Şekil parametresi $k=2$, ölçek parametresi ise $A=5$ olarak hesaplanmıştır.



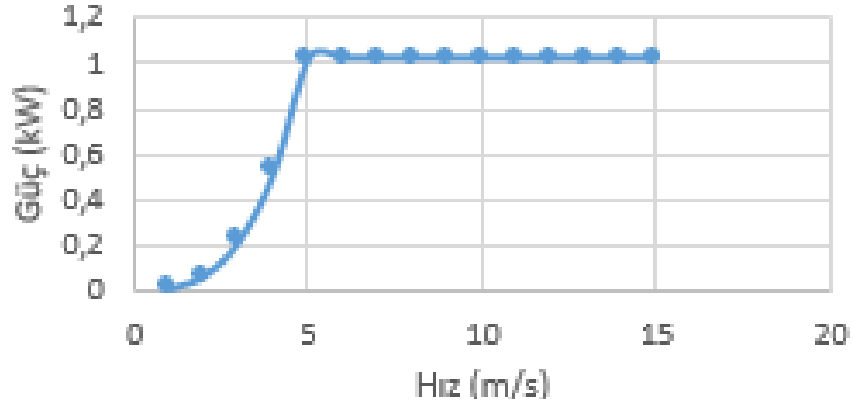
Şekil 3.22. Karabük İli Ovacık İlçesine ait aylık rüzgar dağılımı.

Şekil 3.23 bir yıla ait rüzgar dağılımını göstermektedir. Yaklaşık 2,5 m/s ile 6 m/s arası rüzgarlar bir yıl içerisinde daha uzun süre esmektedir.



Şekil 3.23. Karabük İli Ovacık ilçesine ait yıllık rüzgar dağılımı.

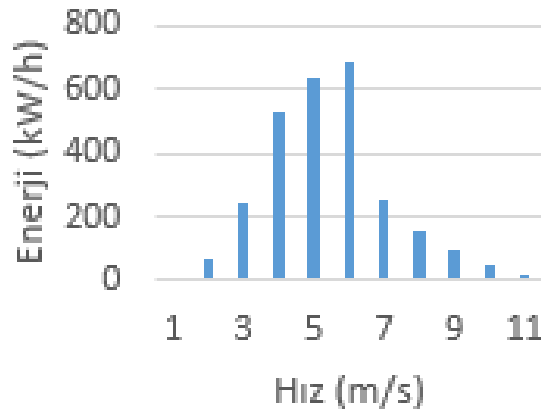
Bu çalışmadaki amaç 1 Kw/h enerji üretmek olduğu için rüzgardan elde edilecek gücün bilinmesi gerekmektedir. Bu güç ise Eşitlik 2.34’de verilen formül yardımıyla 1 kW/h için elde edilmiştir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. Güç eğrisi.

Tasarlanan rüzgar türbininde türbinin güç üretebilmesi için en az 2 m/s hıza ihtiyaç vardır. Bu hıza ulaşmasıyla birlikte güç üretmeye başlamaktadır. Rüzgar hızı değeri arttıkça türbinin ürettiği güç de artmaktadır. Rüzgar hızı, 1 kW/h enerji elde edebilmesi için belirlenen hıza yani 5 m/s'ye ulaştığında türbin de bu gücü üretmeye başlamaktadır. Rüzgar türbini için belirlenen bu hızın üzerinde olan rüzgar hızlarında güç üretiminde artış meydana gelmemektedir. Ancak 1 kW/h enerji üretmeye devam etmektedir. Rüzgar hızı, rüzgar türbini için belirlenen devreden çıkış hızına ulaştığında güç üretimi durmaktadır. Bunun sebebi ise devreden çıkış hızının üzerindeki durumlarda türbine zarar gelmemesi içindir ve güç üretimi durmaktadır.

Şekil 3.23 ile Şekil 3.24'te verilen grafikler birleştirilerek Şekil 3.25'te gösterilen yıllık enerji üretimi grafiği elde edilmiştir.



Şekil 3.25. Yıllık enerji üretimi dağılımı.

Şekil 3.25 incelendiğinde yaklaşık 2 m/s hız ve üzeri için enerji üretimi olduğu görülmektedir. Bunun sebebi düşük hızlarda rüzgar türbininin dönmemesidir. Rüzgar hızı 5 m/s ile 6 m/s'ye ulaştığında en yüksek enerji üretimi meydana geldiği görülmektedir. Çünkü 5 m/s ile 6 m/s rüzgar hızlarının yıl içerisindeki esme süresi daha fazladır.

3.3. BEM SONUÇLARI

Seçilen airfoilin boyu, maruz kaldığı havanın hızı, viskozitesi gibi özelliklerini birlikte değerlendiren Reynolds sayısının farklı değerlerinde aerodinamik performansların değişmesi söz konusudur. Ayrıca airfoillerin 2 boyutlu ve 3 boyutlu performansları birbirinden farklı olabilmektedir. Literatürde aynı airfoil için farklı aerodinamik performans değerlerinin görülmesi de bu parametrelerden kaynaklanmaktadır. Bu hususlar dikkate alındığında airfoilin mümkün olan en yüksek ve en düşük performans gösterdiği durumlarda 3 kanatlı yatay eksenli rüzgar türbin güç performansı etkilenmektedir. Bu durumun BEM teoremiyle irdelenmesi bir ihtiyaç haline gelmiştir.

Yüksek ve düşük performanslı airfoiller kullanılarak tasarlanan yatay eksenli rüzgar türbinlerinin BEM teoremiyle güç, tork ve kuvvet değerleri elde edilmiştir. Rüzgar türbin kanat uzunluğu 3 metre ve rotor göbek yarıçapı 0,15 metre olarak belirlenmiştir. Tasarım uç hız oranı 7 ve uç hız oranı 8 olarak alınmıştır. Her bir kanat 20 elemana ayrılarak hesaplamalar yapılmıştır. Rüzgar hızının düşük olduğu durumlarda elde edilecek performans irdelenmiş ve hız 4 m/s olarak belirlenmiştir. Yüksek ve düşük performansa sahip airfoillerin gerekli bilgileri BEM/Excel kılavuzuna aktarılarak hesaplama başlatılmıştır.

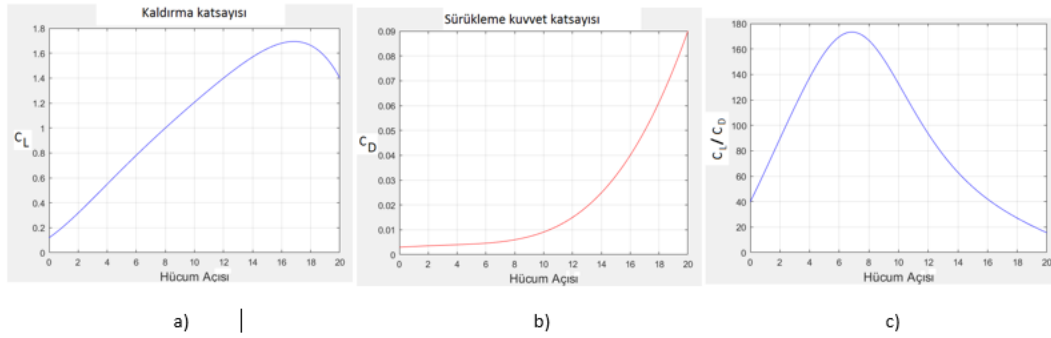
3.3.1. Yüksek Performanslı Airfoil Sonuçları

Yüksek performanslı airfoilin aerodinamik katsayıları BEM/Excel kılavuzuna girilerek hesaplamalar yapılmıştır (Şekil 3.26).

$\alpha 1$	0	$\alpha 2$	4	$\alpha 3$	8	$\alpha 4$	12	α stall	16	$\alpha 5$	20
CL ($\alpha 1$)	0.12	CL ($\alpha 2$)	0.55	CL ($\alpha 3$)	1	CL ($\alpha 4$)	1.4	CL(stall)	1.68	CL ($\alpha 5$)	1.4
CD ($\alpha 1$)	0.003	CD ($\alpha 2$)	0.004	CD ($\alpha 3$)	0.006	CD ($\alpha 4$)	0.015	CD(stall)	0.04	CD ($\alpha 5$)	0.09
Aspect Ratio	3	k0	0.12	k1	0.0806667	k2	0.0124479	k3	-0.00186849	k4	0.000120443
		l0	0.0002875	l1	-0.00036	l2	-9.76563e-06	l3	0.00000653	l4	1.46484e-06

Şekil 3.26. Yüksek performanslı airfoilin aerodinamik katsayıları.

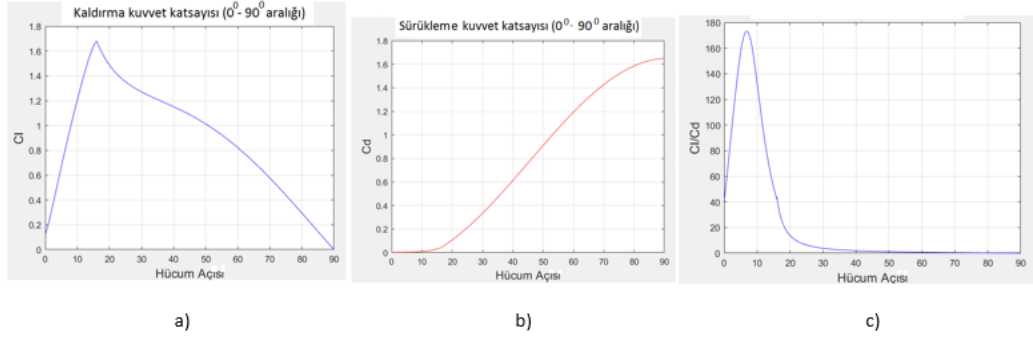
BEM hesaplamaları sonucunda yüksek performanstaki airfoilin stall öncesi kaldırma katsayı değeri, sürüklenme katsayı değeri ve süzülme oranı değerleri Şekil 3.27’de grafik halinde verilmiştir.



Şekil 3.27. Stall öncesi a) kaldırma katsayısı b) sürüklenme katsayısı c) süzülme oranı.

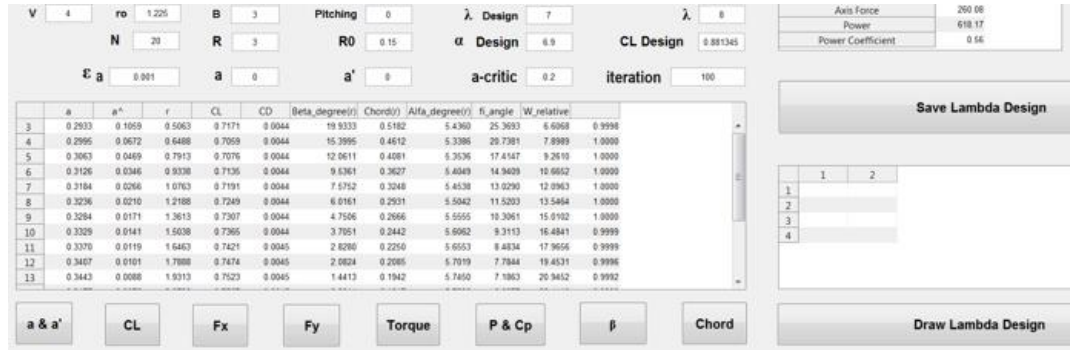
Şekil 3.27’de verilen kaldırma katsayı grafiği incelendiğinde hücum açısı yaklaşık 17 derecedeyken stall durumuna gelmiştir. Bu hücum açısındaki kaldırma katsayısı değeri 1.7 olarak ölçülmüştür. Sürüklenme katsayısı grafiği incelendiğinde hücum açısı 10 dereceden sonra hızlı bir artış göstermiştir. Süzülme oranı grafiğine bakıldığında ise hücum açısı 7 derecede iken en yüksek değer olan 170’e ulaşmıştır. Yüksek performanslı airfoil için süzülme oranının bu değeri mantıklı bir değerdir.

BEM hesaplamaları sonucunda yüksek performanstaki airfoilin stall sonrası kaldırma katsayı değeri, sürüklenme katsayı değeri ve süzülme oranı değerleri Şekil 3.28’de grafik halinde verilmiştir.



Şekil 3.28. Stall sonrası a) kaldırma katsayısı b) sürüklenme katsayısı c) süzülme oranı.

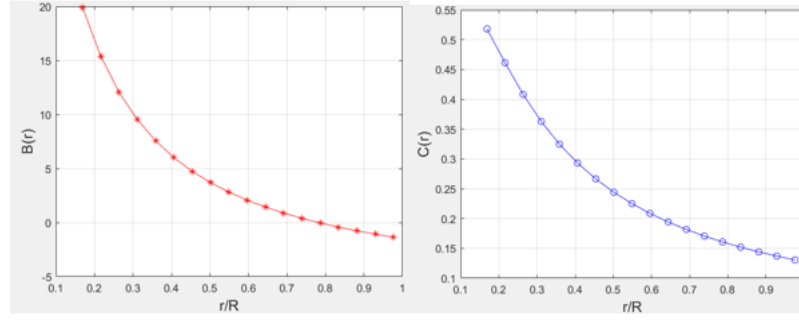
Şekil 3.28 incelendiğinde yüksek performansa sahip airfoilin 0-90 derece hücum açısı arasındaki aerodinamik katsayı değerleri görülmektedir. Kaldırma katsayısı 90 derecede 0 olurken sürüklenme katsayısı 90 derecede 1,65 olmaktadır.



Şekil 3.29. Yüksek performansa sahip airfoil kullanılan BEM sonuçları.

Şekil 3.29 irdelendiğinde giriş parametreleri olarak kanat uzunluğu 3 metre, kanat göbük yarıçapı 0,15 metre ve rüzgar hızı 4 m/s seçildiğinde rotorda elde edilen aksenal kuvvet 260 N, güç 618 W ve güç katsayı değeri 0,56 olarak görülmektedir.

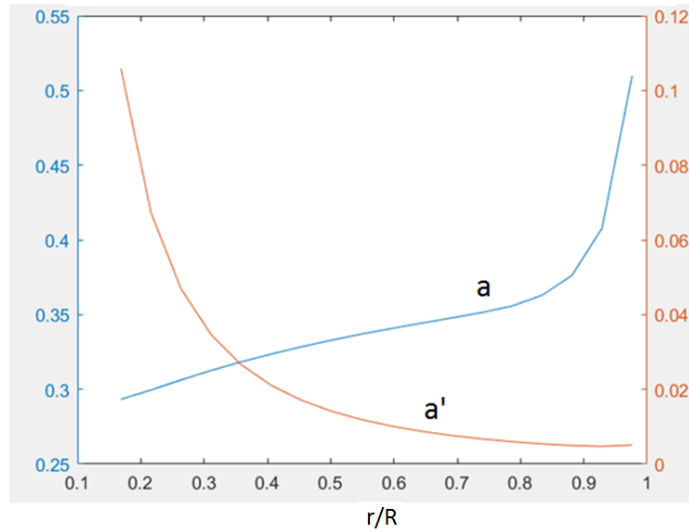
Kanat geometrisi oluşturulurken Schmitz formülüne göre hesaplanan airfoil boyu $C(r)$ ve yerleştirilme açısı $B(r)$ değerleri BEM teoremiyle bulunmuştur. Şekil 3.30'da bulunan sonuçlar grafik halinde verilmiştir.



Şekil 3.30. Kanat boyunca airfoil boyu ve bağlanma açısının değişimi.

Şekil 3.30'da verilen değerlere bakıldığında airfoilin rotorun göbek kısmında bağlanma açısı 20 derece, uç kısmında ise -2 derece olarak görülmektedir. Airfoil boyutu ise göbek kısmında 0,52 metre iken uç kısmında 0,14 metredir.

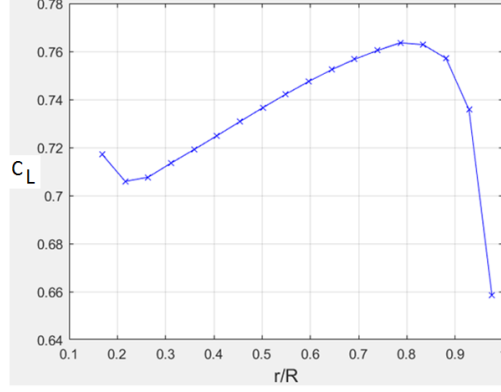
Şekil 3.31'de aksel (a) ve teğetsel (a') hız değişim indüksiyon katsayı değerlerinin kanat boyunca değişimi verilmiştir.



Şekil 3.31. Aksel (a) ve teğetsel (a') hız indüksiyon katsayı değerleri.

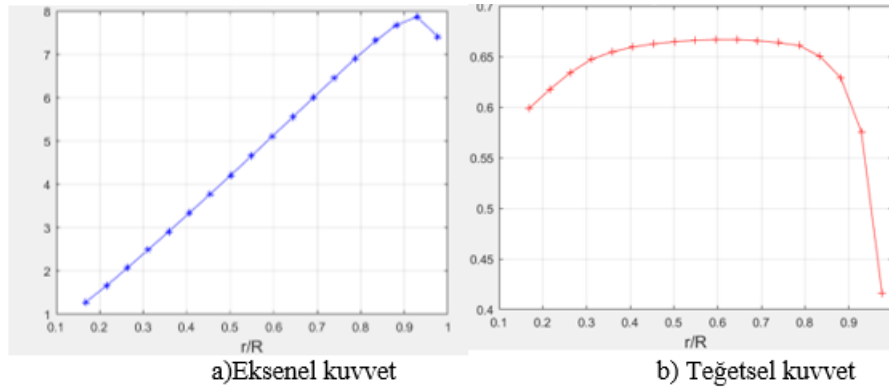
Eksenel hız indüksiyon katsayı değerine bakıldığında kanat boyunca çok fazla değişmemektedir. Ancak kanadın uç kısmında artmaktadır. Rotor göbeğinde $a=0,3$ iken uç kısmında $a=0,5$ 'tir. Teğetsel hız indüksiyon katsayı değeri ise kanadın göbek kısmında yüksek iken uç kısmında düşüktür. Rotor göbeğinde $a'=0,51$ iken uç kısmında $a'=0,26$ 'dır.

Airfoil kaldırma katsayı C_L değerinin kanat boyunca değişimi BEM teoremiyle hesaplanmıştır ve grafik haline getirilerek Şekil 3.32’de gösterilmiştir.



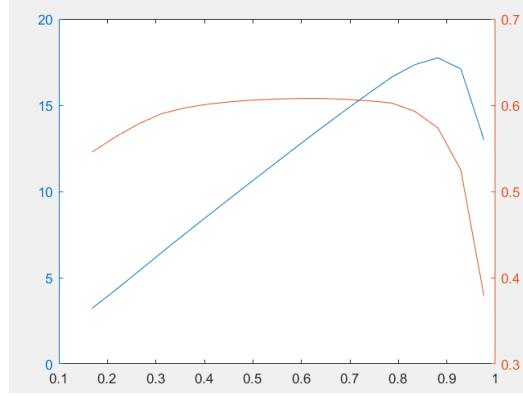
Şekil 3.32. Airfoil kaldırma katsayı C_L değerinin kanat boyunca değişimi.

Kaldırma katsayısı $r/R=0,8$ iken maximum değerine ($C_L=0,765$) ulaşmıştır. Kanadın uç kısmında ise kaldırma katsayısı 0,66’ya kadar azalmaktadır.



Şekil 3.33. Eksenel ve teğetsel kuvvetin kanat boyunca değişimi.

Şekil 3.33 aksenel ve teğetsel kuvvetin kanat boyunca olan değişimini göstermektedir. Aksenel kuvvet değeri $r/R=0,92$ iken maximum değere ulaşmıştır. Toplam aksenel kuvvet değeri ise 260 Newton olarak hesaplanmıştır. Teğetsel kuvvete bakıldığında ise kanadın uç kayıplarından dolayı değeri azalmaktadır. $r/R=0,6$ iken teğetsel kuvvet 0,67 değerine ulaşmıştır.



Şekil 3.34. Kanat boyunca güç verimi ve torkun değişimi.

Şekil 3.34'te verilen grafikte mavi renkteki çizgi torku, turuncu renkteki çizgi güç verimini ifade etmektedir. Kanat boyunca güç verimi ve tork dağılımı birbirine benzemektedir. Güç verimi kandan uç kısmında ve göbek kısmında düşük olmaktadır. Toplam güç ise 618 watt olarak hesaplanmıştır. Tork değeri ise $r/R=0,88$ iken en yüksek değere ulaşmıştır.

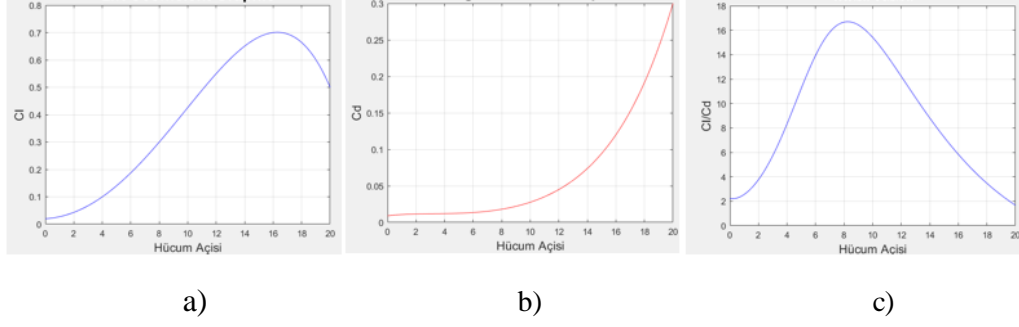
3.3.2. Düşük Performanslı Airfoil Sonuçları

Düşük performanslı airfoilin aerodinamik katsayıları Excel/BEM kılavuzuna girilerek hesaplamalar yapılmıştır (Şekil.3.35).

$\alpha 1$	0	$\alpha 2$	4	$\alpha 3$	8	$\alpha 4$	12	α stall	16	$\alpha 5$	20
CL ($\alpha 1$)	0.02	CL ($\alpha 2$)	0.1	CL ($\alpha 3$)	0.3	CL ($\alpha 4$)	0.55	CL(stall)	0.7	CL ($\alpha 5$)	0.5
CD ($\alpha 1$)	0.009	CD ($\alpha 2$)	0.012	CD ($\alpha 3$)	0.018	CD ($\alpha 4$)	0.045	CD(stall)	0.12	CD ($\alpha 5$)	0.3
Aspect Ratio	3	k0	0.02	k1	0.00316667	k2	0.00416667	k3	3.90625e-05	k4	-6.51042e-06
		l0	0.0023625	l1	-0.00036	l2	0.000107422	l3	0.00000653	l4	-5.37109e-06

Şekil 3.35. Düşük performanslı airfoilin aerodinamik katsayıları.

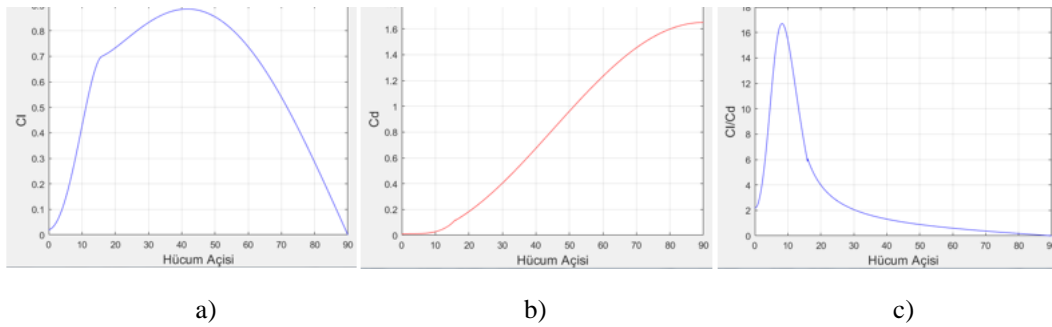
BEM hesaplamaları sonucunda yüksek performanstaki airfoilin stall öncesi kaldırma katsayısı değeri, sürüklenme katsayısı değeri ve süzülme oranı değerleri Şekil 3.36'da grafik halinde verilmiştir.



Şekil 3.36. Stall öncesi a) kaldırma katsayısı b) sürüklenme katsayısı c) süzülme oranı.

Şekil 3.36'da verilen kaldırma katsayı grafiği incelendiğinde hücüm açısı yaklaşık 16 derecedeyken stall durumuna gelmiştir. Bu hücüm açısındaki kaldırma katsayısı değeri 0,7 olarak ölçülmüştür. Hücüm açısı arttıkça kaldırma katsayı değeri artmakta ve stall durumuna gelince azalmaktadır. Sürüklenme katsayısı grafiği incelendiğinde hücüm açısı 10 dereceden sonra hızlı bir artış göstermiştir. Süzülme oranı grafiğine bakıldığında ise hücüm açısı 8 derecede iken en yüksek değer olan 16,8'e ulaşmıştır. Düşük performanslı airfoil için süzülme oranınının bu değeri mantıklı bir değerdir.

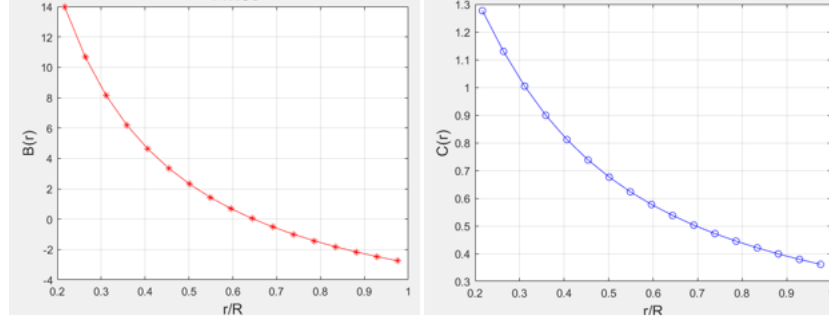
BEM hesaplamaları sonucunda yüksek performanstaki airfoilin stall sonrası kaldırma katsayı değeri, sürüklenme katsayı değeri ve süzülme oranı değerleri Şekil 3.37'de grafik halinde verilmiştir.



Şekil 3.37. Stall sonrası a) kaldırma katsayısı b) sürüklenme katsayısı c) süzülme oranı.

Şekil 3.37 incelendiğinde düşük performansa sahip airfoilin 0-90 derece hücüm açısı arasındaki aerodinamik katsayı değerleri görülmektedir. Kaldırma katsayısı 90 derecede 0 olurken sürüklenme katsayısı 90 derecede 1,65 olmaktadır.

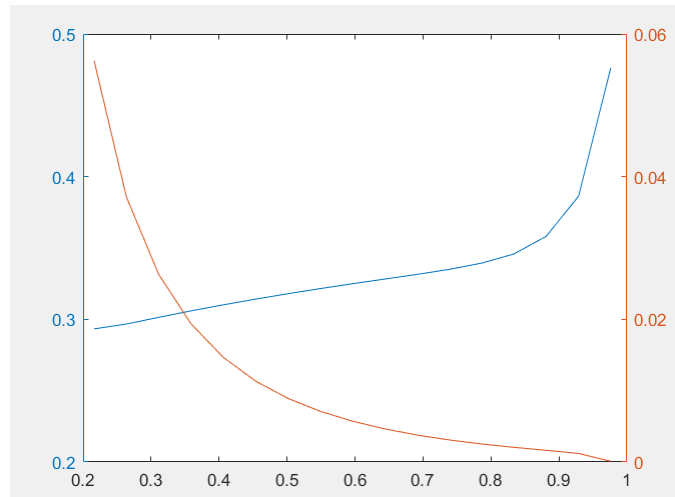
Kanat geometrisi oluşturulurken Schmitz formülüne göre hesaplanan airfoil boyu $C(r)$ ve yerleştirilme açısı $B(r)$ değerleri BEM teoremiyle bulunmuştur. Şekil 3.38'de bulunan sonuçlar grafik halinde verilmiştir.



Şekil 3.38. Kanat boyunca airfoil boyu ve bağlanma açısının değişimi.

Şekil 3.38'de verilen değerlere bakıldığında airfoilin rotorun göbek kısmında bağlanma açısı 14 derece, uç kısmında ise -3 derece olarak görülmektedir. Airfoil boyutu ise göbek kısmında 1,29 metre iken uç kısmında 0,2 metredir.

Şekil 3.39'da aksenal (a) ve teğetsel (a') hız değişim indüksiyon katsayı değerlerinin kanat boyunca değişimi verilmiştir.

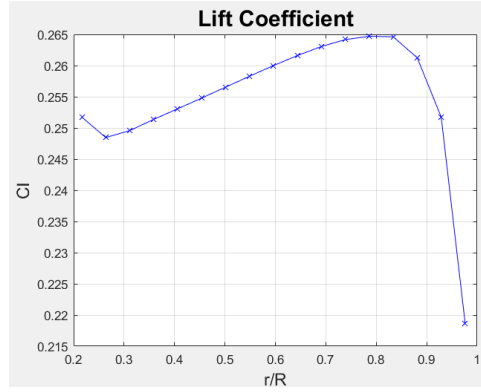


Şekil 3.39. Aksenal (a) ve teğetsel (a') hız indüksiyon katsayı değerleri.

Mavi renkte verilen aksenal hız indüksiyon katsayı değerine bakıldığında kanat boyunca çok fazla değişmemektedir. Ancak kanadın uç kısmında artmaktadır. Rotor

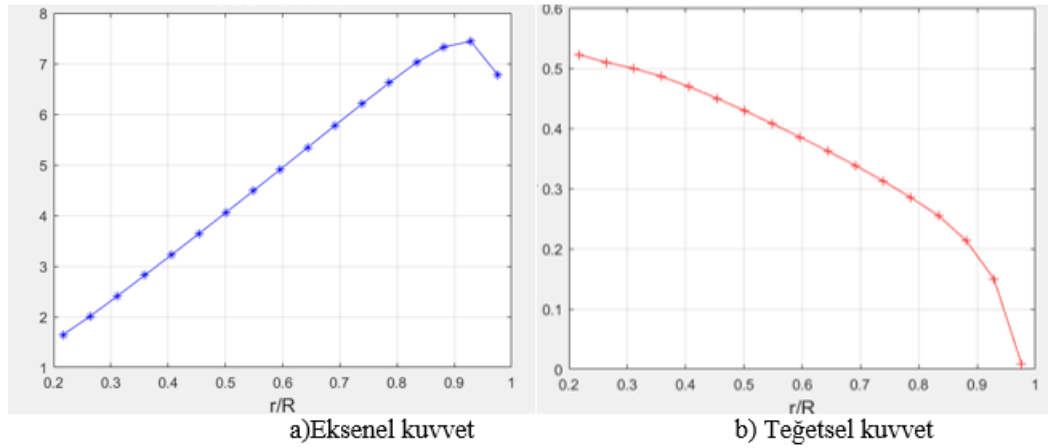
göbeğinde $a=0,29$ iken uç kısmında $a=0,48$ 'dir. Turuncu renkte verilen teğetsel hız indüksiyon katsayı değeri ise kanadın göbek kısmında yüksek iken uç kısmında düşüktür. Rotor göbeğinde $a'=0,055$ iken uç kısmında $a'=0$ 'dır.

Airfoil kaldırma katsayı C_L değerinin kanat boyunca değişimi BEM teoremiyle hesaplanmıştır ve grafik haline getirilerek Şekil 3.40'da gösterilmiştir.



Şekil 3.40. Airfoil kaldırma katsayı C_L değerinin kanat boyunca değişimi.

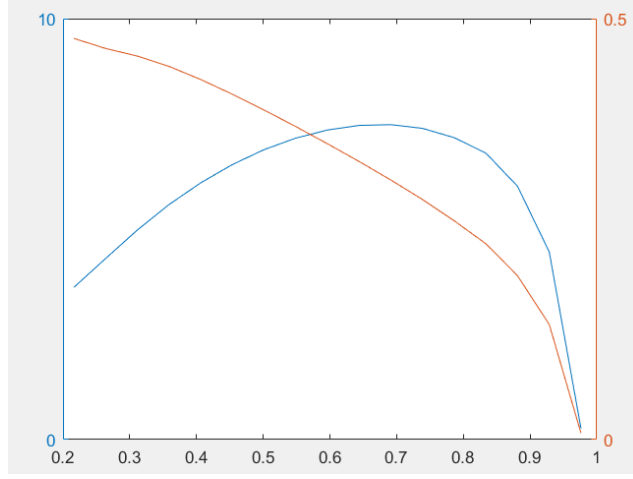
Kaldırma katsayısı $r/R=0,8$ iken maximum değerine ($C_L=0,265$) ulaşmıştır. Kanadın uç kısmında ise kaldırma katsayısı 0,218'e kadar azalmaktadır.



Şekil 3.41. Eksenel ve teğetsel kuvvetin kanat boyunca değişimi.

Şekil 3.41 eksenel ve teğetsel kuvvetin kanat boyunca olan değişimini göstermektedir. Eksenel kuvvet değeri $r/R=0,92$ iken maximum değere ulaşmıştır. Toplam eksenel kuvvet değeri ise 245 Newton olarak hesaplanmıştır. Teğetsel kuvvete bakıldığında

ise kanadın uç kayıplarından dolayı değeri azalmaktadır. $r/R=0,1$ iken teğetsel kuvvet 0,52, $r/R=1$ iken sıfırdır.



Şekil 3.42. Kanat boyunca güç verimi ve torkun değişimi.

Şekil 3.42’de verilen grafikte mavi renkteki çizgi torku, turuncu renkteki çizgi ise güç verimini ifade etmektedir. Kanat boyunca güç verimi ve tork dağılımı birbirine benzemektedir. Güç verimi kanadın uç kısmında düşük iken göbekte yüksektir. Toplam güç ise 298,7 watt olarak hesaplanmıştır. Güç katsayısı değeri 0,28 olarak bulunmuştur. Tork değeri ise $r/R=0,7$ iken en yüksek değere ulaşmıştır.

3.3.3. Düşük Performanslı ve Yüksek Performanslı Airfoillerin Karşılaştırması

Düşük ve yüksek performanslı iki airfoil BEM teoremiyle incelendiğinde farklı sonuçlar elde edilmektedir. İlk olarak aksenal kuvvet incelendiğinde yüksek performansa sahip airfoil 260 N iken düşük performansa sahip airfoil 245 N olarak hesaplanmıştır. Aksenal kuvvet kanat boyunca incelendiğinde ise yüksek performanslı airfoilde en yüksek değer $r/R=0,92$ ’de 8 N olarak görülürken düşük performanslı airfoilde $r/R=0,92$ ’de 7,5 N olarak görülmektedir.

Teğetsel kuvvet, yüksek performanslı airfoilde kanat boyunca genel olarak bir artış gösterirken düşük performanslı airfoilde kanat boyunca azalma göstermektedir. Yüksek performanslı airfoilde en yüksek değer $r/R=0,6$ ’da 0,67 N iken düşük performanslı airfoilde en yüksek değer kanat ucunda 0,51 N olmaktadır.

Yüksek performanslı airfoilde tork değeri kanat boyunca daha keskin bir artış göstermiş ve kanat ucunda en yüksek değer olan 18 N.m'ye ulaşmıştır. Düşük performanslı airfoilde ise kanat boyunca oluşan tork değeri daha yavaş bir artış göstermektedir. En yüksek değer olan 7,5 N'a ise kanat ortalarında ulaşmış ve sonrasında azalmaya başlamıştır.

Yüksek performanslı airfoilde elde edilen güç değeri 618 W iken düşük performanslı airfoilde bu değer 298,7 W olarak görülmektedir. Tork değerine bağlı olarak yüksek performanslı airfoilde güç değeri daha yüksek olmaktadır.

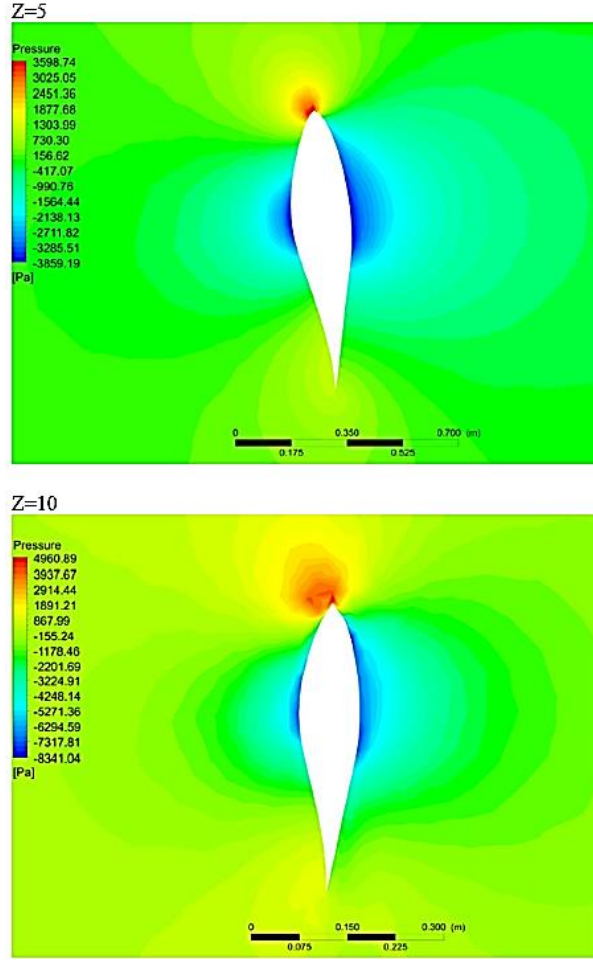
Kanat boyunca değişen güç katsayı değeri incelendiğinde kanat boyunca değişen tork dağılımına benzemektedir. Yüksek performanslı airfoilde güç katsayı değeri $r/R=0,6$ 'da en yüksek değer 0,6 iken düşük performanslı airfoilde en yüksek değer $r/R=0,1$ 'de 0,48 olmaktadır. Yüksek performanslı airfoilde güç katsayısı genel olarak kanat boyunca bir artış gösterirken düşük performanslı airfoilde kanat boyunca azalma görülmektedir.

3.4. ÜÇ BOYUTLU CFD ANALİZİ SONUÇLARI

Önceki bölümde küçük ölçekli rüzgar türbini tasarlarken kanat boyu 3 metre alınarak iki boyutlu CFD analizi yapılmış ve elektrik üretim durumu incelenmiştir. Ancak 1kW/h'tan daha yüksek elektrik enerjisi elde edebilmek için daha yüksek rüzgar hızlarına ihtiyaç vardır. Bunun için yüksekliği 50 metre olan yeni bir rüzgar türbini daha tasarlanmıştır. Ovacık ilçesine ait olan rüzgar verileri incelendiğinde bu yükseklikteki ortalama rüzgar hızı yaklaşık 12 m/s olmaktadır. Yükseklik arttığı için rüzgar türbin kanadının boyutu 10 metre olarak belirlenmiştir. Üç boyutlu CFD analizi ve BEM teoremi uygulaması ise bu iki tasarıma göre yapılmıştır. Yapılan analizlere göre rüzgar türbininin aerodinamik performansı ve simülasyon sonuçları gösterilmiştir.

3.4.1 CFD; Airfoil Etrafındaki Basınç ve Hız

NACA 4412 airfoili kullanılarak 10 metre kanat boyu, 12 m/s rüzgar hızı ve tasarım uç hız oranı 7 için yapılan CFD analizinde rüzgar türbin kanadının farklı kesitlerinde oluşan basınç konturları gösterilmiştir. Bu konturlar Şekil 3.43'te gösterilmiştir.

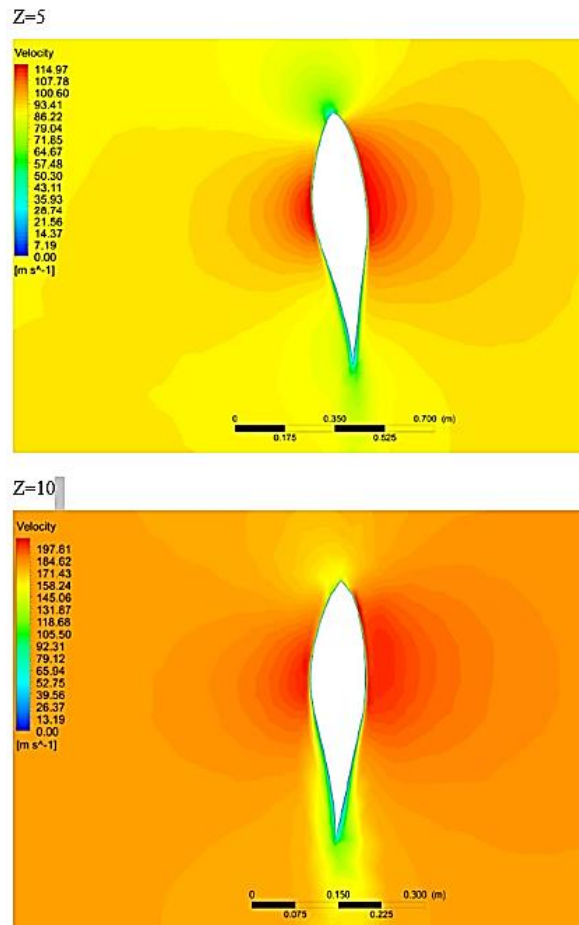


Şekil 3.43. Rüzgar türbin kanat kesit etrafındaki basınç konturları.

Yukarıdaki şekilde kırmızı renkte gösterilen bölge yüksek basıncı ifade ederken mavi bölge düşük basıncı ifade etmektedir. Basıncın yüksek olduğu kırmızı bölgeden basıncın düşük olduğu mavi bölgeye doğru kuvvet oluşmaktadır [57]. Bu kuvvet kanatların dönmesini sağlayan kaldırma kuvvetidir. Z=5 metre de oluşan en yüksek basınç 3598 paskal, en düşük basınç ise -3859 paskaldır. 7457 paskal olan basınç farkı, kanadın yüzey alanıyla çarpıldığında kanat yüzeyine dik olan normal kuvvet elde edilir. Bu kuvvetin akışa dik olan bileşeni kaldırma kuvvet değerini verir. Z=10

metrede yani kanadın uç kısmında oluşan en yüksek basınç değeri 4960 paskal, en düşük basınç değeri ise -8341 paskaldır. Basınç farkı ise 13301 paskaldır. Bu basınç farkı $z=5$ metredeki basınç farkından çok daha yüksektir. Bu durum kanadı döndüren kuvvetlerin kanadın uç kısımlarında daha büyük olduğunu göstermektedir.

NACA 4412 airfoili kullanılarak 10 metre kanat boyu, 12 m/s rüzgar hızı ve 15 uç hız oranı için yapılan CFD analizinde rüzgar türbin kanadının farklı kesitlerinde oluşan hız konturları gösterilmiştir. Bu konturlar Şekil 3.44'te gösterilmiştir.



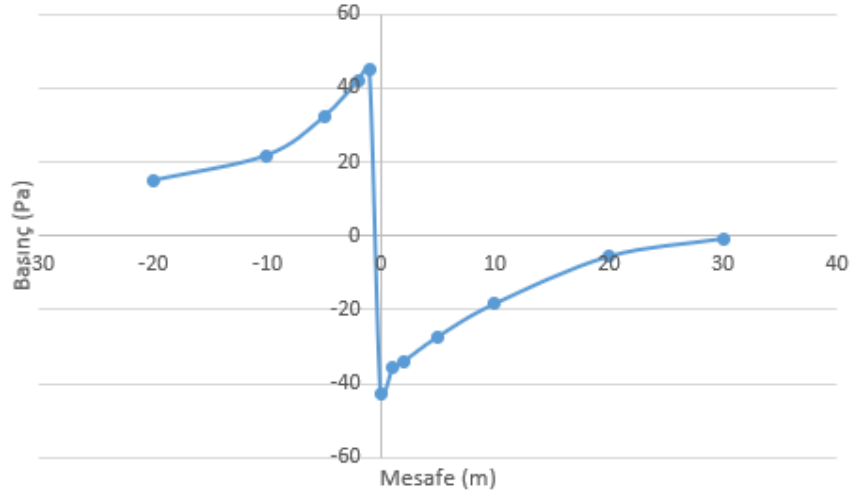
Şekil 3.44. Rüzgar türbin kanat kesit etrafındaki hız konturları.

Yukarıdaki şekilde gösterilen kırmızı renkteki kısım en yüksek hızı, mavi renkte gösterilen kısım ise en düşük hızı belirtmektedir. $Z=5$ metrede kanat etrafında oluşan havanın hızı en yüksek 114 m/s değerine ulaşırken, $z=10$ metrede en yüksek hava hızı 197 m/s olarak gözükmektedir. Hızın sıfır olduğu noktalar ise havanın yüzeye çarptığı kısımlardır. Kanadın emme kısmından hava daha hızlı geçer ve bu bölgede basınç

düşüktür. Basıncın yüksek olduğu yerlerde ise hız değeri düşüktür. Bernoilli denklemi bu durumu açıklamaktadır.

3.4.2. CFD; Havanın Akış Yönündeki Basınç ve Hız Değişimi

Bu başlıkta CFD analizi ile rüzgar türbinine yaklaşan, türbinden geçen ve türbinden ayrılan rüzgarın hız ve basıncında olan değişimler elde edilmiştir. Bölüm 2.2 başlığı altında belirtildiği gibi türbine yaklaşan rüzgarın basıncı yükselir, türbinin içinden geçerken en yüksek değere ulaşır ve aniden açık hava basıncının altına düşer. Türbinden geçtikten sonra ise açık hava basıncının altına düşen rüzgar tekrar açık hava basıncına ulaşır. Yani rüzgar, türbin etkisinden kurtulmuş demektir. Bu durum tasarlanan rüzgar türbininin CFD analizi ile gösterilmiştir (Şekil 3.45).

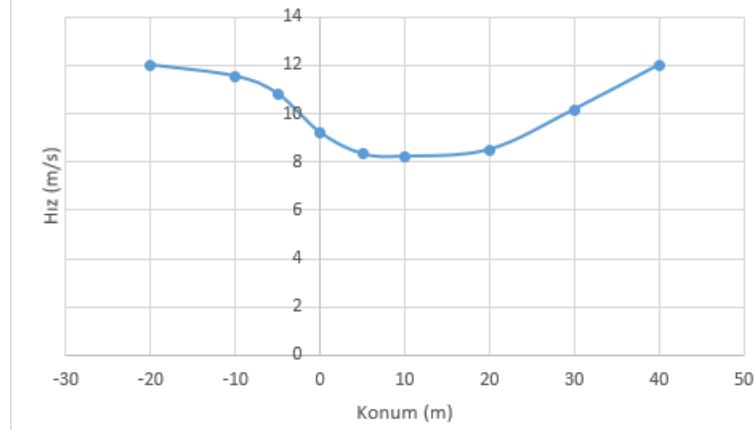


Şekil 3.45. Havanın basınç değerinin akış doğrultusunda değişimi.

Rüzgar türbinine yaklaşırken basıncı yaklaşık 15 paskal olan hava, rüzgar türbininden geçerken 45 paskal olmaktadır. Ani basınç düşmesiyle de -42 paskala düşmektedir. Rüzgar türbininden uzaklaştıkça ise açık hava basıncına ulaşmaktadır.

Rüzgarın türbin eksenini doğrultusunda olan hızı ise türbine yaklaştıkça azalır, türbinden geçtikten sonra da bu azalma belli bir mesafe devam eder. Daha sonra tekrardan artmaya başlayarak normal hızına ulaşır. Bu durum ise rüzgarın türbin etkisinden

çıkışını göstermektedir. Bu durum tasarlanan rüzgar türbininin CFD analizi ile gösterilmiştir (Şekil 3.46).



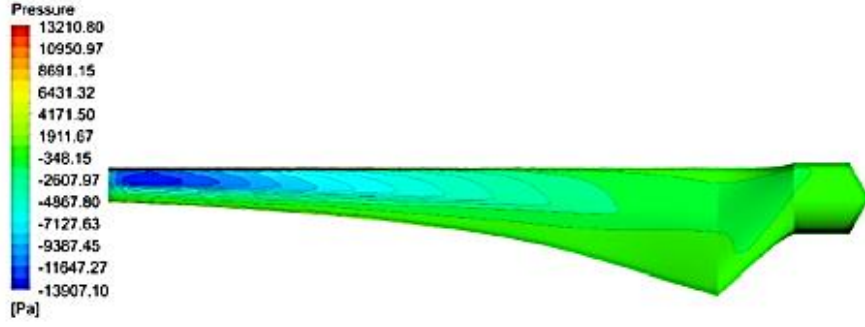
Şekil 3.46. Havanın hız değerinin akış doğrultusunda değişimi.

Şekil 3.46'da gösterildiği gibi hava 12 m/s hızla rüzgar türbinine yaklaşırken hızı azalmıştır. Rüzgar türbininden geçtiği esnada hız 9 m/s hıza düşmüştür. Rüzgar türbininden geçtikten sonra 8 m/s hıza düşen havanın hızı belli bir mesafe sonra tekrar ilk hızına ulaşmıştır.

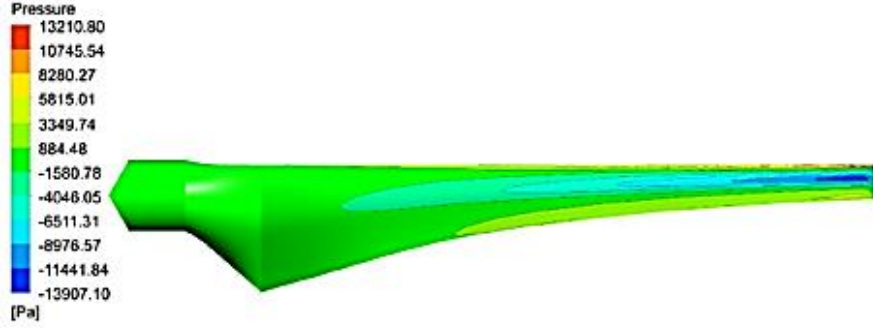
3.4.3. CFD; Kanat Üzerindeki Basınç

Rüzgar türbini kanadı üzerinde oluşan basınç CFD aracılığıyla elde edilmiştir. CFD ile elde edilen simülasyon Şekil 3.47'de gösterilmiştir. Rüzgar türbin kanatlarında oluşan en düşük basınç -13907 paskal olarak gösterilmektedir. En yüksek basınç ise 13210 paskal olarak gösterilmektedir. Emme yüzeyi olarak belirtilen kısım kanadın negatif basınca sahip olduğu bölgeyi ifade ederken basma yüzeyi olarak belirtilen kısım ise kanadın pozitif basınca sahip olduğu bölgeyi ifade etmektedir [7]. Rüzgar türbin kanadı, basınç yüzeyinin itme kuvveti ile emme yüzeyinin çekme kuvveti sayesinde dönmektedir [41]. Emme ile basma yüzeyleri arasındaki basınç farkıyla aksenal ve teğetsel kuvvet oluşmaktadır. Teğetsel kuvvetin büyük olması istenirken aksenal kuvvetin küçük olması istenmektedir [15].

Emme Yüzeyi



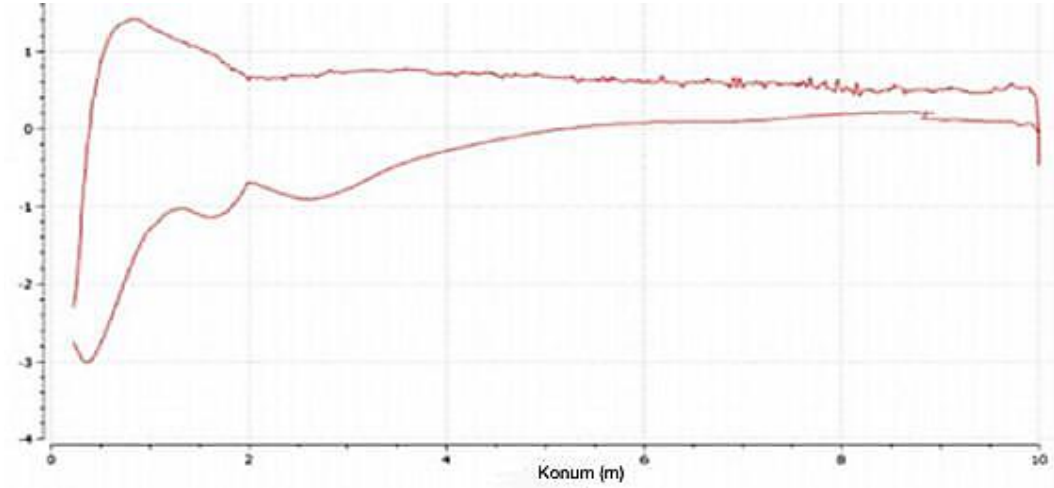
Basma Yüzeyi



Şekil 3.47. Kanat Üzerindeki Basınç.

Kanat boyunca basıncın nasıl değiştiğini görebilmek için C_p basınç katsayısı grafiklerine bakılmaktadır [57]. Tasarlanan rüzgar türbin kanadının CFD ile analizinde basınç katsayısı grafikleri elde edilmiştir. Basınç katsayısı değeri, akış alanındaki bir noktada oluşan etkin statik basıncın dinamik basınca oranı olarak bilinmektedir. Etkin basınç ise statik basınç ile açık hava basıncının farkıdır. Kanat üzerindeki basınç

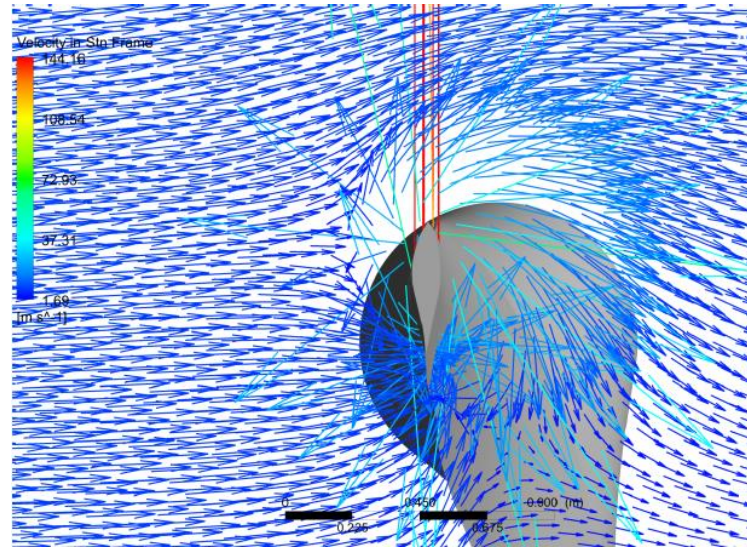
katsayısı grafiklerine bakılarak kanat boyunca basıncın nasıl değiştiği hususunda bilgi edinilebilir. Tasarlanan rüzgar türbin kanadında kanat boyunca oluşan basınç katsayı değerleri grafik olarak Şekil 3.48’de verilmiştir.



Şekil 3.48. Kanat boyunca oluşan basınç katsayısı.

3.4.4. CFD; Rüzgar Türbin Kanadına Çarpan Havanın Hız Vektörü

Hava hızının 12 m/s olduğu anda yapılan CFD simülasyonu ile kanadın farklı kesitinde oluşan hız vektörleri Şekil 3.49’da verilmiştir.

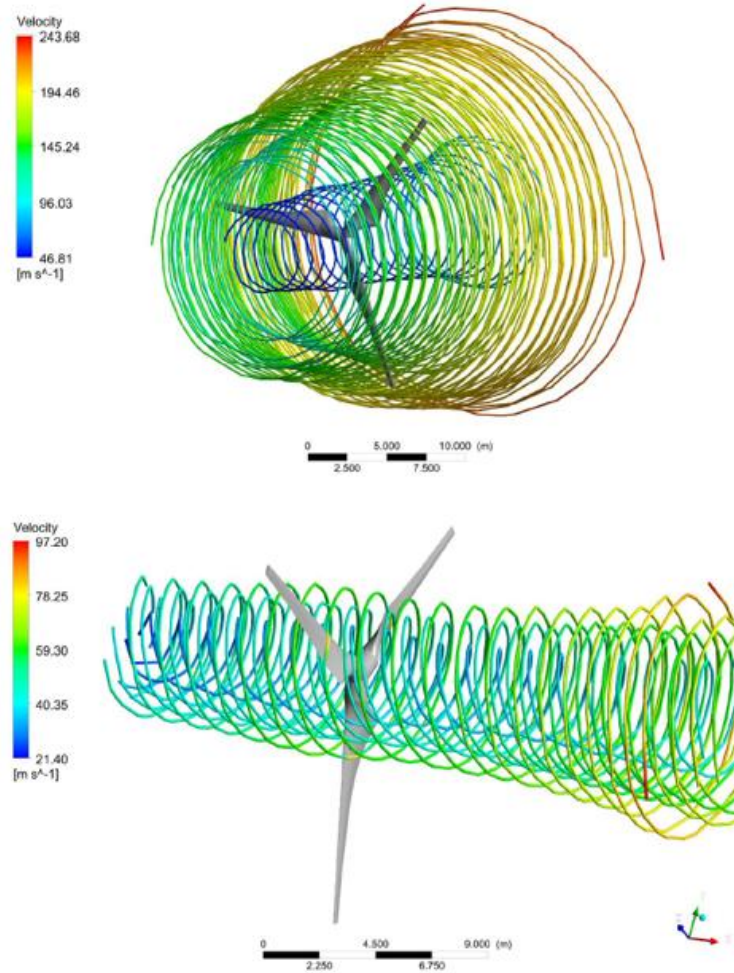


Şekil 3.49. Kanat Etrafında Oluşan Hız Vektörleri.

Rüzgar türbini hızlı döndüğünde rüzgarın bir kısmı kanada çarparak geri dönmektedir. Rüzgar türbini yavaş döndüğünde ise rüzgar kanatların arasından geçip aynı ekseninde devam etmektedir. Optimum dönme hızında ise gelen rüzgarın neredeyse tamamı kanatlara çarparak tork oluşturmaktadır.

3.4.5. CFD; Havanın Kanatlara Göre Relatif (Göreceli) Hızı

Rüzgar türbininin dönme hızı aynı zamanda kanatlara çarpan havanın da dönmesine sebep olmaktadır. Türbin kanatlarının dönmesi ile kanadın bazı bölgelerinde oluşan havanın dönme hareketi Şekil 3.50’de gösterilmiştir.

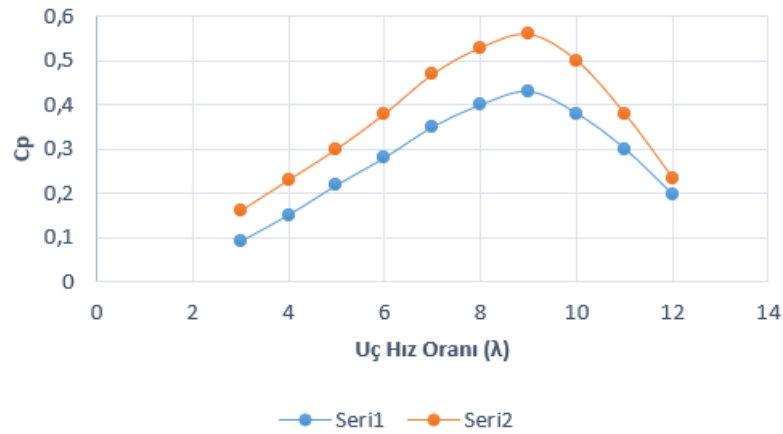


Şekil 3.50. Havada oluşan dönme hareketi.

Rüzgar türbin kanatları saat yönünde döndüğünde havanın kanada göre olan bağıl hızının teğet bileşeni de saatin tersi yönünde dönmektedir [53]. Havanın sahip olduğu teğet hız büyüklüğü kanadın teğetsel hız indüksiyon değerine göre daha yüksek olmaktadır. Havanın bağıl hızı, eksen hızı ile teğetsel hızının vektörel toplamıdır [58]. Kanat üzerindeki eksenel hız $V_1(1-a)$ ifadesiyle bulunur. Kanat üzerinde bulunan herhangi bir noktadaki teğetsel hız ise $\omega r(1+a')$ ifadesiyle hesaplanır. Havanın kanatlara çarpma bağıl hızı ise havanın bağıl hızı ile eksenel hızının vektörel toplamına eşittir. Havanın kanatlara göre teğet hızı $\omega r(1+a')$ terimi ile ifade edilirken havanın eksenel hızı $V_1(1+a)$ terimi ile ifade edilir [15].

3.4.6. BEM ve CFD Güç Katsayısı Sonuçları

NACA 4412 airfoili kullanılarak tasarlanan rüzgar türbininin, tasarım uç hız oranı 7 ve kanat boyu 10 metre olarak belirlenmiştir. Daha önceki bölümlerde airfoilin C_L ve C_D değerleri CFD ile hesaplanmıştır. CFD analizi ile airfoilin farklı uç hız oranlarındaki güç katsayıları hesaplanmıştır. BEM teoremi kullanılarak da farklı uç hız oranları için güç katsayı değerleri hesaplanmıştır. Bu iki farklı metotta hesaplanan güç katsayı grafiği Şekil 3.51’de gösterilmiştir.



Şekil 3.51. $C_p-\lambda$; BEM ve CFD sonuçları.

Şekilde Seri1 olarak adlandırılan çizgi CFD analizi, Seri2 olarak adlandırılan çizgi ise BEM teoremi sonucudur. Tasarım uç hız oranı 7 ile tasarlanan rüzgar türbini için yapılan NACA 4412 CFD simülasyonu sonucunda en yüksek güç katsayı değeri 0,43 olarak elde edilmiştir. Bu güç katsayı değerine uç hız oranı 9’da ulaşılmıştır. Optimum

uç hız oranı ise 9 olmaktadır. Tasarım uç hız oranı 7 olarak tasarlanan rüzgar türbini için yapılan BEM teoremi uygulamasıyla ise güç katsayı değeri 0,56 olarak bulunmuştur. Bu güç katsayı değerine uç hız oranı 9’da ulaşılmıştır.

Bu iki bulgu arasındaki farkın birçok sebebi mevcuttur. Bunlardan birisi BEM teoreminde kanatlar arasında akışın olmadığı kabulüdür. CFD analizinde akış olduğu için sonuçlarda değişmektedir. Bir diğer sebep ise CFD analizi 3 boyutlu yapılırken BEM teoremi ile 2 boyutlu olarak sonuca ulaşılmaktadır.

3.4.7. BEM ve CFD Güç-Tork Sonuçları

Tasarım uç hız oranı 7’de tasarlanan rüzgar türbininin boyutları değiştirilmiştir. Ovacık ilçesinde belirlenen yüksekliklere karşılık gelen hızlarda yeniden CFD ve BEM teoremi analizi yapılmıştır. Farklı uç hız oranlarındaki güç değerleri ve tork değerleri hesaplanmıştır.

İlk olarak rüzgar türbin kanadının 3 metre olduğu durumda BEM teoremi analizi yapılmıştır. Yapılan BEM teoremi çalışması sonucunda farklı uç hız oranlarına ait tork değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 3.3. BEM teoremi tork sonuçları.

Uç Hız Oranı	Tork (N.m)
5	77,2
9	81
12	25

Çizelge 3.3’e bakıldığında BEM teoremiyle farklı uç hız oranlarında elde edilen tork değerleri mevcuttur. Uç hız oranı 5 iken tork değeri 77,2 N.m, uç hız oranı 9 iken tork değeri 81 N.m ve uç hız oranı 12 iken tork değeri 25 N.m olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere bakıldığında uç hız oranı arttıkça tork değeri de artmaktadır. Ancak belli bir uç hız oranı değerinden sonra tork düşmeye başlamaktadır. Bu değerler tek bir kanat için bulunmuştur. Tasarlanan rüzgar türbini kanat sayısı 3 olduğu için bu tork değerleri 3 ile çarpılarak toplam tork elde edilmektedir.

Tork, elde edilen gücün açısal hıza bölümüyle bulunmaktadır. Açısal hız değeri ise bölüm 2’de verilen uç hız oranı formülünden elde edilebilir. Uç hız oranı 5 olduğu durumda açısal hız değeri 8,3 rad/s, uç hız oranı 9 iken açısal hız değeri 15 rad/s ve uç hız oranı 12 iken açısal hız değeri 20 rad/s olarak hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak farklı uç hız oranları için elde edilen güç hesaplanmıştır (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. BEM teoremi güç sonuçları.

Uç Hız Oranı	Güç (P_{eld}) Watt
5	640,7
9	1212
12	497,9

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde uç hız oranı 5 iken güç değeri 640,7 watt, uç hız oranı 12 iken güç değeri 497,9 watt olarak hesaplanmıştır. Güç değeri, uç hız oranı arttıkça artmakta ancak belli bir seviyeden sonra azalmaktadır.

Elde edilen gücün teorik olarak hesabı ise güç katsayısı ile maximum gücün çarpımıdır. Bu yöntemle farklı uç hız oranlarına ait güç katsayı değerleri (C_p) elde edilmiştir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5. BEM teoremi güç katsayı değerleri.

Uç Hız Oranı	Güç Katsayısı (C_p)
5	0,296
9	0,56
12	0,23

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde uç hız oranı 9 iken en yüksek değere ulaşmıştır. Uç hız oranı 5 iken 0,296 olan güç katsayı değeri uç hız oranı 12 iken 0,23 olarak bulunmuştur. Hesaplanan güç katsayı değerleri belli bir uç hız oranına kadar artış gösterirken belli bir değerden sonra düşmektedir. Aynı şartlardaki rüzgar türbini CFD ile analiz edildiğinde oluşan tork değerleri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 3.6. CFD analizi tork sonuçları.

Uç Hız Oranı	Tork (N.m)
5	55
9	60,6
12	19,5

Çizelge 3.6'ya bakıldığında CFD analizine göre tork değeri uç hız oranı 5 iken 55 N.m, uç hız oranı 9 iken en yüksek değer olan 60,6 N.m ve uç hız oranı 12 iken 19,5 N.m olarak görülmektedir. Tork değerini kullanarak elde edilen güç değerleri ise Çizelge 3.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. CFD analizi güç sonuçları.

Uç Hız Oranı	Güç (P_{eld}) Watt
5	454,6
9	909,2
12	389,6

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde uç hız oranı 5, 9 ve 12 iken bunlara karşılık gelen güç değerleri sırasıyla 454,6 N.m, 909,2 N.m ve 389,6 N.m olarak hesaplanmıştır. Bulunan güç değerlerinden yola çıkarak ise güç katsayı değeri (C_p) elde edilmiştir.

Çizelge 3.8. CFD analizi güç katsayı değerleri.

Uç Hız Oranı	Güç Katsayısı (C_p)
5	0,21
9	0,42
12	0,18

Çizelge 3.8 incelendiğinde güç katsayı değerleri uç hız oranı 9'a kadar artış gösterirken bu seviyeden sonra azalma gözlemlenmektedir.

Rüzgar türbin kanadının 10 metre olduğu durumda BEM teoremi analizi yapılmıştır. Yapılan BEM çalışması sonucunda farklı uç hız oranlarına ait tork değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 3.9. BEM teoremi tork sonuçları.

Uç Hız Oranı	Tork (N.m)
5	16625
9	17231
12	5487

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde uç hız oranı 5,9 ve 12 iken tork değerleri de sırasıyla 16625 N.m, 17231 N.m ve 5487 N.m olarak bulunmuştur. Yani tork değeri, uç hız oranının belli bir seviyesine kadar artarken bu seviyeden sonra azalmaya başlamaktadır. Bu değerler tek bir kanat için hesaplanmıştır. Tasarlanan rüzgar türbini kanat sayısı 3 olduğu için elde edilen tork değerleri 3 ile çarpılarak toplam tork hesaplanmaktadır. Tork değerlerinden elde edilen gücün hesabı yapılarak Çizelge 3.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 3. 10. BEM teoremi güç sonuçları.

Uç Hız Oranı	Güç (P_{eld}) Watt
5	99750
9	186100
12	79010

Çizelge 3.10'a bakıldığında güç değeri uç hız oranı 9'a kadar artmakta ve sonrasında azalmaktadır. Bu güç değerlerinden elde edilen güç katsayıları (C_P) aşağıda verilmiştir (Çizelge 3.11).

Çizelge 3.11. BEM teoremi güç katsayı değerleri.

Uç Hız Oranı	Güç Katsayısı (C_p)
5	0,3
9	0,56
12	0,238

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde uç hız oranı 9 iken güç katsayısı en yüksek değere ulaşmıştır. Uç hız oranı 5 iken 0,3 olan güç katsayı değeri uç hız oranı 12 iken 0,238 olarak bulunmuştur. Aynı şartlardaki rüzgar türbini CFD ile analiz edildiğinde oluşan tork değerleri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 3.12. CFD analizi tork sonuçları.

Uç Hız Oranı	Tork (N.m)
5	12083
9	13240
12	4527

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde uç hız oranı 5'te oluşan tork değeri 12083N.m olarak bulunurken uç hız oranı 9'da oluşan tork değeri 13240 N.m olarak bulunmaktadır. Uç hız oranı 12'de oluşan tork değeri ise 4527 N.m olarak görülmektedir. Bu değerler kullanılarak elde edilen güç hesaplanmıştır.

Çizelge 3.13. CFD analizi güç sonuçları.

Uç Hız Oranı	Güç (P_{eld}) Watt
5	72500
9	143000
12	65200

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde uç hız oranı 9’da en yüksek güç değerine ulaşılmaktadır. Uç hız oranı 5 iken elde edilen güç değeri 72500 watt olurken uç hız oranı 12 iken elde edilen güç değeri 65200 watt olmaktadır. Elde edilen bu değerlerle güç katsayı hesabı yapılmıştır.

Çizelge 3.14. CFD analizi güç katsayı değerleri.

Uç Hız Oranı	Güç Katsayısı (C_P)
5	0,218
9	0,43
12	0,196

Çizelge 3.14’e bakıldığında en yüksek güç katsayı değeri uç hız oranı 9’da elde edilmiştir. Uç hız oranı 5’te elde edilen güç katsayı değeri 0,218 iken uç hız oranı 12’de elde edilen güç katsayı değeri 0,196’dır.

BEM teoremiyle elde edilen güç katsayı değerleri iki farklı tasarımdaki rüzgar türbini için çok fazla değişmemektedir. Aynı durum CFD analizi yapılan iki farklı tasarımdaki rüzgar türbinleri için de geçerlidir. Ancak bu iki yöntemle elde edilen güç ile tork değerleri, rüzgar hızına ve kanat boyuna bağlı olarak artmaktadır.

Aynı boyuttaki rüzgar türbininin hem BEM hem de CFD analiz sonuçlarına bakıldığında ise güç katsayı değerleri BEM teoreminde daha yüksek olmaktadır. Tork ve güç değerleri de güç katsayısına bağlı olarak yüksek değerlere ulaşmaktadır.

BÖLÜM 4

SONUÇLAR

Bu tezde kırsal kesimlerde yaşayan insanların temel ihtiyaçlarını karşılayabilmesi için 1kW/h elektrik enerjisi üretebilen küçük ölçekli bir rüzgâr türbini tasarlanmıştır. Tasarlanan yatay eksenli rüzgar türbininin, belirlenen bölge olan Ovacık ilçesindeki rüzgâr istatistik bilgileri göz önünde bulundurularak 9 m yükseklikte, 3 m kanat boyunda ve ortalama 5 m/s rüzgar hızında aerodinamik performansı ve yıllık enerji üretimi hesaplanmıştır. Daha sonra 1 kW/h'tan daha fazla elektrik ihtiyacı olması durumunda daha yüksek rüzgar hızlarından yararlanmak amacıyla 50 m yüksekte ve 10 m kanat boyunda ikinci bir yatay eksenli rüzgar türbini tasarlanmıştır. Tasarlanan bu türbinin aerodinamik performansı ve elde ettiği güç hesaplanmıştır.

Kanat geometrisi literatürde verilen Schmitz formülüne göre tasarlanmış ve farklı airfoiller analiz edilerek düşük hızlarda en yüksek performans gösteren airfoil seçilmiştir. Hesaplar teorik olarak BEM teoremiyle ve CFD ile yapılmıştır. 2 boyutta ve 3 boyutta yapılan analizlerle güç verimleri elde edilmiştir. Düşük performans ve yüksek performans gösteren airfoillerin BEM teoremiyle aerodinamik performans hesabı yapılmıştır. Böylelikle literatüre yeni bilgiler aktarılmıştır.

Yapılan tez çalışmasıyla ulaşılan en önemli sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. 3 m kanat uzunluğunda ve rüzgar istatistikleri göz önünde bulundurularak tasarlanan rüzgar türbininden yıllık 2734,8 kW/h enerji elde edilmiştir.

2. Yapılan hesaplamalara göre rüzgar türbini aylık ortalama 228 kW/h elektrik enerji üretimi sağlanmaktadır ve asgari yaşam standartlarına sahip dört kişilik bir ailenin aylık ortalama elektrik tüketimi 230 kW/h'tir. 2021 yılı TL/kWh göz önünde bulundurulduğunda aylık 90,00 TL bir kazanç elde edilmektedir. Kendi elektriğini üretmek isteyen ve kırsal kesimlerde yaşayan bir ailenin temel enerji ihtiyaçlarını karşılaması için uygun bir türbin olduğu görülmektedir.
3. En yüksek güç veriminin elde edildiği optimum uç hız oranı değeri, BEM teoreminde ve CFD analizinde tasarım uç hız oranı değerinde ya da birkaç değer fazlasındadır. Yani tasarım uç hız oranı değeri 6 iken optimum uç hız oranı 7 veya 8 olmaktadır.
4. Yatay eksenli rüzgar türbin geometrisinin ölçüleri Schmitz formüllerine göre belirlenirken doğru şekilde yapılmazsa güç performansı düşük olmaktadır.
5. NACA 4412 airfoilinun BEM ve CFD sonuçlarında optimum uç hız oranı değeri 9 olarak bulunmuştur.
6. BEM teoremiyle bulunan aerodinamik performans değerleri CFD ile bulunan değerlerden daha yüksek olmaktadır.
7. CFD analizine göre havanın türbine yaklaşırken, türbinden geçerken ve türbinden uzaklaşırken basınç ve hız değişimleri BEM teoremine uyumlu olduğu görülmüştür.
8. Rüzgar hızı ile kanat boyunda yapılan değişikliklerle güç katsayı değerinin BEM teoremine göre değişmediği görülmüştür. CFD analizinde ise çok az değiştiği görülmüştür.
9. Kanat boyunca hava hızının ve basıncının, kanatta oluşan aksel kuvvet, teğetsel kuvvet, tork ve güç değerlerinin uç hız oranından çok az etkilendiği görülmüştür.

10. Maksimum güç katsayı değerinin airfoilin şekli, aerodinamik özellikleri, Reynolds sayısı ve uç hız oranına bağlı olduğu anlaşılmıştır.
11. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde güç katsayı değerinin uç hız oranına göre değişimi en çok airfoilin süzülme oranına bağlı olduğu görülmüştür.
12. Kanat geometrisinin uygun şekilde tasarlanmaması durumunda türbinin aerodinamik performansının düşük olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Kaya, K. ve Koç, E., "Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kanat profil tasarımı ve üretim esasları", *Mühendis Ve Makina*, 56 (670): 38–48 (2015).
2. Yılmaz, İ., Çam, Ö., Taştan, M. ve Karcı, A., "Farklı rüzgar türbin kanat profillerinin aerodinamik performansının deneysel incelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 19 (4): 577–584 (2016).
3. Güleren, K. M. ve Demir, S., "Rüzga türbinleri için düşük hücum açılarında farklı kanat profillerinin performans analizi", *Isı Bilimi Ve Tekniği Dergisi*, 31 (2): 51–59 (2011).
4. Internet: Karabük İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, "Tarımsal Yapı", <https://karabuk.tarimorman.gov.tr/Menu/16/Tarimsal-Yapi> (2021).
5. Gasch, R. and Twele, J., "Wind Power Plants", *Springer Verlag*, Berlin Heidelberg, 548 (2012).
6. Internet: Enerjim Güneşten, "Rüzgar Türbini", <https://www.enerjimgunesten.com/edirnede-dikey-eksenli-ruzgar-turbini.html> (2019) .
7. Manwell, A., McGowan, J. G. and Rogers, A. L., "Wind Energy Explained-Theory, Design and Application", *John Wiley And Sons Ltd.*, West Sussex, UK, 83–134 (2010).
8. Saleh, A., Feeny, B. F., "Modal analysis of a vertical-axis darrieus wind turbine blade with a troposkein shape", *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series* (2019).
9. Wood, D., "Small Wind Turbines, Analysis, Design and Application", *Springer Verlag*, London, 272 (2011).
10. Ameku, K., Nagai, B. M., and Roy, J. N., "Design of a 3 kW wind turbine generator with thin airfoil blades", *Experimental Thermal And Fluid Science*, 32 (8): 1723–1730 (2008).
11. Hirahara, H., Hossain, M. Z., Kawahashi, M. and Nonomura, Y., "Testing basic performance of a very small wind turbine designed for multi-purposes", *Renewable Energy*, 30 (8): 1279–1297 (2005).

12. Koşar, O., "Kayseri-Pınarbaşı rüzgar potansiyeline uygun mikro ölçekli rüzgar türbini aerodinamik tasarımı ve optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri (2014).
13. Gross, A. and Fasel, H. F., "Numerical Investigation of Different Wind Turbine Airfoils", *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting And Aerospace Exposition*, Orlando, Florida, (2011).
14. Bilir, L. ve Özcan, N. Y., "Küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin izmir bölgesindeki yıllık üretimlerinin belirlenmesi", *4. İzmir Rüzgar Sempozyumu*, (2017).
15. Bakırcı, M., "Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde optimum uç hız oranının incelenmesi", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2018).
16. Kumar, B. N., Paramasivam, K. M. and Karis, M., "Computational fluid dynamics analysis of aerodynamic characteristics of NACA 4412 vs S 809 airfoil for wind turbine applications", *International Journal Of Advanced Engineering Technology*, India, 7 (3): 168–173 (2016).
17. Ravi, H. C., Madhukeshwara, N. and Kumarappa, S., "Numerical investigation of flow transition for NACA 4412 airfoil using computational fluid dynamics", *International Journal Of Innovative Research In Science, Engineering And Technology*, 2 (7): 2319–8753 (2013).
18. Ajao, K. R. and Adeniyi, J. S. O., "Comparison of theoretical and experimental power output of a small 3-bladed horizontal-axis wind turbine", *Journal Of American Science*, 5 (4): 79–90 (2009).
19. Maheri, A., Noroozi, S., Toomer, C. and Vinney, J., "Damping the fluctuating behaviour and improving the convergence rate of the axial induction factor in the BEMT-based rotor aerodynamic codes", *University Of The West Of England, Bristol* (2012).
20. Kogaki, T., Matsumiya, H., Kieda, K., Yoshimizu, N and Yamamoto, Y., "Performance Improvement Of Airfoils For Wind Turbines By The Modified Vortex Generator", *2004 European Wind Energy Conference*, (2004).
21. Bakırcı, M., "Rüzgar türbin kanat profil optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale*, (2014).
22. McCosker, J., "Design and optimization of a small wind turbine", Master's Thesis, *Rensselaer Polytechnic Institute Hartford*, Connecticut, USA, (2012).
23. Internet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Yenilenebilir Enerji Kaynakları", <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar> (2020).

24. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, "Rüzgar Verisi", Karabük, (2021).
25. Spera, D. and Richards, T., "Modified power law equations for vertical wind profiles", *U.S. Department Of Energy*, (1979).
26. Gundoft, S., "Wind Turbines", *University Collage Of Aarhus Denmark, Copyright*, (2009).
27. Kurban, M., Kantar, Y. M. ve Hocaoglu, F. O., "Weibull dağılımı kullanılarak rüzgar hız ve güç yoğunluklarının istatistiksel analizi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7 (2): 205–218 (2007).
28. Akpınar, E. K. ve Akpınar, S., "Determination of the wind energy potential for Maden-Elazığ, Turkey", *Energy Conversion And Management*, 45 (18–19): 2901–2914 (2004).
29. Internet: Homer, "Weibull k Value", https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/weibull_k_value.html (2021).
30. Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Khanali, M., and Abbaszadeh, R., "An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran", *Energy*, 35 (1): 188–201 (2010).
31. Prasad, E. N., Janakiram, S., Prabu, T., and Sivasubramaniam, S., "Design and development of horizontal small wind turbine blade for low wind speeds", *International Journal Of Engineering Science & Advanced Technology*, 4 (1): 75–84 (2014).
32. Hansen, M. O., "Aerodynamics of Wind Turbines ", *Earthscan*, London, UK, 7–78 (2008).
33. Anderson John D., "Fundamentals of Aerodynamics, Third Edition", *McGraw Hill Book Company*, New York, USA, 331–332 (2001).
34. Yükselen, A., "Aerodinamik Ders Notları", *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, (2013).
35. Anderson John D., "Introduction to Flight", *McGraw Hill*, (2000).
36. Bertagnolio, F., Sorensen, N., Johansen, J. and Fuglsang, P., "Wind Turbine Airfoil Catalogue", *Riso National Laboratory*, Roskilde, (2001).
37. Abbott, I.H. and Von Doenhoff, A. E., "Theory of Wing Sections, Including a Summary of Airfoil Data", *Dover Publications Inc. Copyright*, New York, USA, (1959).

38. Wang, Haipeng and Zhang, Bo and Qiu, Qinggang and Xu, X., "Flow control on the NREL S809 wind turbine airfoil using vortex generators", *Energy*, 118: 1210–1221 (2017).
39. Guerri, O., Bouhadeh, K. and Harhad, A., "Turbulent flow simulation of the NREL S809 airfoil", *Wind Engineering*, 30 (4): 287–301 (2006).
40. Viterna, L. A. and Corrigan, R. D., "Fixed Pitch Rotor Performance of Large Horizontal Axis Wind Turbines", *Cleveland, Ohio, USA: DOE/NASA Workshop On Large Horizontal Axis Wind Turbines*, (1984).
41. Burton, T., Jenkins N., Sharpe D. and Bossanyi, E., "Wind Energy Handbook", *John Wiley & Sons, Ltd.*, England, (2011).
42. Çetin, N. S., Yurdusev, M. A., Ata, R. and Özdamar, A., "Assessment of optimum tip speed ratio of wind turbines", *Mathematical And Computational Applications*, 10 (1): 147–154 (2005).
43. Hau, E., "Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Applications, Economics", *Krailling, Springer*, 110–113 (2006).
44. Manwell, J., McGowan, J., and Rogers, A., "Wind Energy Explained Theory, Design and Application", *John Wiley And Sons, Ltd.*, (2002).
45. Naqvi, M. A., Abbas, A., Hamid, M., Tarar, H. and Ahmad, L., "Erodynamic design optimization of residential scale wind turbine blades for lower wind speeds", *International Journal Of Renewable Energy Research (IJRER)*, 5 (2): 373–385 (2015).
46. Cao, H., "Aerodynamics analysis of small horizontal axis wind turbine blades by using 2D and 3D CFD modelling", *University of Central Lancashire*, England, (2011).
47. Hartwanger, D. and Horvat, A., "3D Modelling of a Wind Turbine Using CFD", *NAFEMS Conference*, United Kingdom, (2008).
48. Sezer, U. N., Guptab, A. and Longa, L. N., "Lecture notes in computational science and engineering", 67,457 (2009).
49. Sorensen, N. N., Michelsen, J. A. and Schreck, S., "Navier-Stokes predictions of the NREL phase VI rotor in the NASA Ames 80 ft x 120 ft wind tunnel", *Wind Energy: An International Journal For Progress And Applications In Wind Power Conversion Technology*, 5 (2–3): 151–169 (2002).
50. Çengel, Y., Cimbala, Y. J. and Tahsin, E., "Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları", *Güven Kitapevi*, İzmir, (2008).
51. Anderson, John D. and Wendt, J., "Computational fluid dynamics", *Springer*, 206: (1995).

52. Bazilevs, Y., Hsu, M. C., Akkerman, I., Wright, S., Takizawa, K., Henicke, B., Spielman, T. and Tezduyar, T. E., "3D simulation of wind turbine rotors at full scale. Part I: Geometry modeling and aerodynamics", *International Journal For Numerical Methods In Fluids*, 65 (1–3): 207–235 (2011).
53. Spera, D. A., "Wind turbine technology", *American Society Of Mechanical Engineers*, New York, USA, (1994).
54. Internet: Cornell University, "FLUENT Learning Modules", <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+Learning+Modules> (2017).
55. Mahawadiwar, H. V., Dhopte, V.D., Thakare, P.S. and Ashedkar, R. D., "CFD analysis of wind turbine blade", *International Journal Of Engineering Research And Applications*, 3188–3194 (2012).
56. Bhatt, P. and Satankar, R., "Computational fluid dynamics analysis of wind turbine rotor blades-a review", *International Journal Of Current Research And Review*, 4 (21): 163 (2012).
57. Bak, C., Johansen, J., and Andersen, P. B., "Three-Dimensional Corrections of Airfoil Characteristics Based on Pressure Distributions", *Proceedings Of The European Wind Energy Conference*, 1–10 (2006).
58. Chen, Y. J. and Shiah, Y. C., "Experiments on the performance of small horizontal axis wind turbine with passive pitch control by disk", *Pulley Energies*, 9: 353 (2016).

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Tayyip ÖZDEMİR, ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Konya Atatürk Anadolu Lisesinden 2013 yılında mezun oldu. 2013 yılında Necmettin Erbakan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2018 yılında 3.04/4 ortalama ile mezun oldu. 2019 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programında eğitim görmeye devam etmektedir. 2019 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı ve halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir.