



**T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YATAY EKSENLİ BİR RÜZGAR TÜRBİNİ KANADININ SAYISAL
ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAKAN İNAN

ARALIK

HAKAN İNAN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ARALIK 2022

**YATAY EKSENLİ BİR RÜZGAR TÜRBİNİ KANADININ SAYISAL
ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

Hakan İNAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mahmut KAPLAN

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2022

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Hakan İNAN tarafından hazırlanan “Yatay Eksenli Bir Rüzgâr Türbini Kanadının Sayısal Analizi ve Optimizasyonu” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mahmut KAPLAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

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

Başkan: Prof. Dr. Melda Özdiñ ÇARPINLIOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gaziantep Üniversitesi

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

Üye: Doç. Dr. Burak KURŞUN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 22/12/2022

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

.....

Doç. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hakan İNAN

22.12.2022

YATAY EKSENİLİ BİR RÜZGAR TÜRBİNİ
KANADININ SAYISAL ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)

Hakan İNAN

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Kasım 2022

ÖZET

Küresel enerji ihtiyacı teknolojik gelişmeler ve nüfusun artışına bağlı olarak sürekli artmaktadır. Fosil yakıt rezervlerinin azalması ve bu yakıtların çevreye olumsuz etkilerinden dolayı enerji ihtiyacının sürdürülebilir enerji kaynaklarında karşılanması büyük önem taşımaktadır. Sürdürülebilir enerji kaynağı olarak rüzgâr türbinleri rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisi dönüştürür. Bu çalışmada kanat profili geometrisi, kanat sayısı, hücum açısı, kanat açısı, uç hız oranı (λ) ve kanat uzunluğu gibi rüzgâr türbin kanadı tasarım parametrelerin aerodinamik performansa etkisi önerilen yeni iki aşamalı kanat tasarımı optimizasyonu yöntemine bağlı olarak ANSYS Workbench platformu ve SOLIDWORKS programı kullanılarak araştırılmıştır. Birinci aşamada, HAD analizinin doğrulanması için standart NACA 63-415 kanat profilinin Spalarat Almaras ve SST k- ω türbülans modelleri kullanılarak hesaplanan kaldırma kuvveti katsayısı (C_L) değerleriyle deneysel C_L değerleri $1,6 \times 10^6$ Reynolds sayısında, 0° - 20° hücum açısı aralığında karşılaştırılmıştır. SST k- ω türbülans modeli deneysel verilere daha iyi uyum sağladığı için tezdeki tüm hesaplamalarda bu model kullanılmıştır. Sonra, standart NACA 63-415 kanat profilinin alt yüzeyi % 10, % 20 ve % 30 azaltılarak sırasıyla NCAY 10, NCAY 20 ve NCAY 30 kanat profilleri üretilmiştir. Sayısal sonuçlar yeni kanat profillerinin standart NACA 63-415 kanat profiline göre aerodinamik performansı iyileştirmiştir ve maksimum C_L/C_D (kaldırma kuvveti katsayısı / sürüklenme kuvveti katsayısı) değerinin yaklaşık 7° hücum açısında NCAY 30 kanat profili ile elde edilmiştir.

İkinci aşamada, kanat uzunluğu boyunca 1 m aralıklarla optimum veter uzunlukları ve bağlama açıları hesaplanmıştır ve standart NACA 63-415 kanat profili için SOLIDWORKS programı kullanarak katı kanat modeli oluşturulmuştur. Üretilen kanat modelinin sonuçları, kanat uzunluğu ve λ arttıkça ve kanat açısı azaldıkça tork ve güç değerlerinin iyileştiğini göstermiştir. Daha sonra kanat yüzey geometrisinin aerodinamik performansa etkisi 7° hücum açısı, $\lambda_{\text{tasarım}} = 7$ ve 20 m kanat uzunluğu için yeni üretilen standart NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 (standart NACA 63-415 kanat profilinin alt ve üst yüzeyini %30 azaltma) kanat modelleri kullanılarak 4-16 m/s rüzgâr hızlarında araştırılmıştır. Sonuçlar tüm kanat modellerinde rüzgâr hızı arttıkça güç katsayısı (C_p) değerlerinin arttığını ve maksimum C_p değerinin 16 m/s rüzgâr hızında elde edildiğini göstermiştir. En yüksek C_p değeri 0,511 olarak NCAYÜY 30 kanat modelinde elde edilmiştir ve standart NACA 63-415 kanat modeline göre bu kanat modeli C_p değerini

%10,62 artırmıştır. Ayrıca diğer kanat modelleri ile karşılaştırıldığında bu kanat modeli kanat arka yüzeyinde basıncı ve kanadın uç kısmının yakınında kanat hızını artırmıştır. NACA 63-415 kanat modeline göre NCAYÜY 30 kanat modeli maksimum kanat hızını %7,2 artırmıştır. Bu çalışmada rüzgâr türbini kanadı tasarımında kullanılan yöntem bu konuyla ilgili ilerde yapılacak çalışmalara yardımcı olacağı düşünülmektedir.



Sayfa Adedi	: 96
Anahtar Kelimeler	: Rüzgâr türbini, HAD, NACA 63-415 Kanat profili, Kanat yüzeyi şekli, Optimizasyon, Aerodinamik performans
Danışman	: Dr. Öğr. Üyesi Mahmut KAPLAN

NUMERICAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF A HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADE

(M. Sc. Thesis)

Hakan İNAN

AMASYA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2022

ABSTRACT

The global energy demand has been continuously rising due to the technological developments and the population growth. Therefore it is of great importance to meet the energy need in sustainable energy sources due to the decrease in fossil fuel reserves and the negative effects of these fuels on the environment. As a promising source for sustainable energy, wind turbines turn the kinetic energy of wind into electrical energy. In this work, the effects of wind turbine blade design parameters such as airfoil geometry, angle of attack, blade angle, tip speed ratio (λ) and blade length on aerodynamic performance were investigated based on a new proposed two-stage blade design optimization method using ANSYS Workbench platform and SOLIDWORKS software. In the first stage, for validation of CFD analysis, the lift force coefficient (C_L) values of standard NACA 63-415 airfoil were calculated using Spalarat Almaras and SST $k-\omega$ turbulence models were compared with the experimental C_L values for various angles of attack (0° - 20°) at 1.6×10^6 Reynolds number. Since the SST $k-\omega$ turbulence model fits the experimental data better, this model was used for all calculations in the thesis. Then, NCAY 10, NCAY 20 and NCAY 30 wing profiles were produced by reducing the lower surface of the standard NACA 63-415 airfoil by 10%, 20% and 30%, respectively. It was observed that the new airfoils improved the aerodynamic performance compared to the standard NACA 63-415 airfoil, and the maximum C_L/C_D (lift force coefficient / drag force coefficient) value was obtained with the NCAY 30 airfoil at approximately 7° angle of attack.

In the second stage, optimum chords and twist angles were calculated at 1 m intervals along the blade length and a solid blade model was generated for the standard NACA 63-415 airfoil using SOLIDWORKS. The results of this blade model showed that torque and power values enhanced an increase in λ and blade length and a decrease in blade angle. Then, the influence of the blade surface geometry on the turbine performance were scrutinized by using new produced blade models such as NACA 63-415, NCAY 30 and NCAYÜY 30 (reducing the lower and upper surfaces of the standard NACA 63-415 by 30%) for angle attack of 7° , $\lambda_{\text{design}} = 7$ and blade length of 20 m at 4-16 m/s wind speeds. The results indicated that power coefficient (C_p) values increased with an increase in wind speed for all blade models. The highest C_p value of 0.511 was obtained in the NCAYÜY 30 blade model at a wind speed of 16 m/s and this blade model augmented C_p value by 10.62% compared to the standard NACA 63-415 blade model. Besides, NCAYÜY 30

blade model increased pressure at the lower surface of the blade and the blade velocity near the tip of the blade compared to other models. NCAYÜY 30 blade model increased the maximum blade velocity by 7.2% in comparison to NACA 63-415 blade model. It is thought that the blade geometry optimization method developed in this work will help future research related to wind turbine design.



Number of pages : 96
Keywords : Wind turbine, CFD, NACA 63-415 airfoil, Blade surface shape,
Optimization, Aerodynamic Performance.
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Mahmut KAPLAN

ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mahmut KAPLAN' a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Son olarak bu süreçte yanımda olan, çalışmalarımın her aşamasında bana destek veren eşim Ebru İNAN' a ve oğlum Kerem Aybars İNAN' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Rüzgâr Türbini Çeşitleri	1
1.1.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri	1
1.1.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri	5
1.1.3. Eğik eksenli rüzgâr türbinleri	5
1.1.4. Kanat çeşitlerine göre rüzgâr türbinlerinin karşılaştırılması	6
1.2. Rüzgâr Türbini Bileşenleri	7
1.2.1. Kanatlar ve rotor	7
1.2.2. Kanat açısı (pitch) ve yön açısı (yaw) kontrolü	18
1.2.3. Mekanik rotor fren sistemi	20
1.2.4. Dişli kutusu	20
1.2.5. Jeneratör sistemi	21
1.2.6. Anemometre ve yön sensörü	23
1.2.7. Kule	24
1.3. Rüzgâr Türbini Aerodinamiği	25
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	33

	Sayfa
2.1. İki Boyutlu Sayısal Çalışmalar	33
2.2. Üç Boyutlu Sayısal Çalışmalar	36
3. MATERYAL VE METOT	42
3.1. Kanat Profili Tasarımı	42
3.1.1. Geometrinin oluşturulması.....	42
3.1.2. Sayısal ağı oluşturulması	44
3.2. Kanat Tasarımı	45
3.2.1. Geometrinin oluşturulması.....	45
3.2.2. Sayısal ağı oluşturulması	58
3.3. Çözücü Ayarlarının Girilmesi	61
3.3.1. Türbülans modeli	61
3.3.2. Sınır koşulu	64
4. KANAT PROFİLİ ANALİZİNDE ELDE EDİLEN BULGULAR	65
5. TÜRBİN KANADI ANALİZİNDE ELDE EDİLEN BULGULAR.....	68
5.1. Kanat Uç Hız Oranındaki Değişimin Aerodinamik Performansa Etkisi	68
5.2. Kanat Açısındaki Değişimin Aerodinamik Performansa Etkisi	70
5.3. Kanat Uzunluğundaki Değişimin Aerodinamik Performansa Etkisi.....	71
5.4. Kanat Yüzeyindeki Değişikliğin Aerodinamik Performansa Etkisi.....	75
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Yatay eksenli ve dikey eksenli türbinlerin karşılaştırılması	6
Çizelge 1.2. Epoksi reçinenin özellikleri	9
Çizelge 3.1. NACA 63-415 kanat profilinin farklı hücum açıları için aerodinamik parametrelerinin değişimi	46
Çizelge 3.2. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=4$) kanat modeli için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri	47
Çizelge 3.3. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=5$) kanat modeli için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri	48
Çizelge 3.4. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=6$) kanat modeli için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri	49
Çizelge 3.5. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=7$) kanat modeli için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri	50
Çizelge 3.6. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=8$) kanat modeli için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri	51
Çizelge 5.1. 15 m kanat uzunluğu için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri	72
Çizelge 5.2. 25 m kanat uzunluğu için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri	73
Çizelge 5.3. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=7$, $\alpha_{\text{tasarım}} = 7$) kanat modeli için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri	75
Çizelge 5.4. NCAY 30 ($\lambda_{\text{tasarım}}=7$, $\alpha_{\text{tasarım}} = 7$) kanat modeli için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri	76
Çizelge 5.5. NCAYÜY 30 ($\lambda_{\text{tasarım}}=7$, $\alpha_{\text{tasarım}} = 7$) kanat modeli için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Tek kanatlı rüzgâr türbini (Potuk, 2015)	2
Şekil 1.2. Çift kanatlı rüzgâr türbini (Wikipedia)	3
Şekil 1.3. Üç kanatlı rüzgâr türbini (Yaşar Üniversitesi Haber Portalı)	4
Şekil 1.4. Çok kanatlı rüzgâr türbini (Potuk, 2015)	4
Şekil 1.5. Darrieus-Savonius tipi türbinler (Elibüyük ve Üçgül, 2014)	5
Şekil 1.6. Eğik eksenli rüzgâr türbini (Elibüyük ve Üçgül, 2014)	6
Şekil 1.7. Rüzgâr türbini bileşenleri (Küçükkaya, 2019)	7
Şekil 1.8. Rüzgâr türbin kanadı (Kaya ve Koç, 2015)	8
Şekil 1.9. Epoksi reçinenin genel yapısı (Baydemir, 2020)	9
Şekil 1.10. Cam elyaf kumaş (Gülmez, 2018)	10
Şekil 1.11. Karbon fiber kumaş (Gülmez, 2018)	11
Şekil 1.12. Aramid fiber kumaş (Gülmez, 2018)	12
Şekil 1.13. Kanat kesitinin sandviç yapısı (Karabağ, 2011)	12
Şekil 1.14. Kanat katmanları ve kullanılan malzemeler (Avcı ve Yılmaz, 2012)	13
Şekil 1.15. El yatırma yöntemi (Durgun, 2014)	14
Şekil 1.16. El yatırma yöntemin adımları (Durgun, 2014)	14
Şekil 1.17. Vakum torbalama ile el yatırma yöntemi (Turgut, Kayran, Alemdaroğlu ve Ceylan, 2007)	16
Şekil 1.18. Vakum infüzyon prosesi (Memiş, 2009)	18
Şekil 1.19. Pitch kontrol (Zhou ve Liu, 2018)	19
Şekil 1.20. Dört tahrikli yaw kontrol mekanizması (Leblebicioğlu, 2021)	19
Şekil 1.21. Rüzgâr türbini disk fren sistemi (Anadolu Balata)	20

Şekil	Sayfa
Şekil 1.22. Rüzgâr türbini dişli kutusu (SCHAEFFLER).....	21
Şekil 1.23. Rüzgâr türbininde kullanılan asenkron jeneratörün bağlantı şeması (Dursun ve Kakilli).....	22
Şekil 1.24. a) Kepçe, b) ultrasonik ve c) propeller anemometre (Ataseven ve Ataseven, 2009).	23
Şekil 1.25. Rüzgâr yön sensörü (Ataseven ve Ataseven, 2009).	24
Şekil 1.26. Rüzgâr türbini kulesi (Enerji Gazetesi.ist).....	24
Şekil 1.27. Kanat bölgeleri ve aerofoil kesitleri (Kaya ve Koç, 2015).....	25
Şekil 1.28. Kanat profiline etkiyen kuvvetler ve hücum açısı (Şentürk ,2007)	26
Şekil 1.29. Rüzgâr türbini kanat açısı (Koç ve Şenel, 2016)	28
Şekil 1.30. Rüzgâr türbini kanat uç-hız oranı (Şenel ve Koç, 2014)	29
Şekil 1.31. Rüzgâr türbini boyunca hız değişimi	30
Şekil 1.32. Farklı kanat yapılarında C_p - λ değişimi (Koç ve Şenel 2016)	32
Şekil 3.1. NACA 63-415 kanat profilinin alt yüzeyi değiştirilerek üretilen yeni kanat profilleri	42
Şekil 3.2. NACA 63-415 kanat profilinin alt ve üst yüzeyi değiştirilerek üretilen yeni kanat profili	43
Şekil 3.3. NACA 63-415 kanat profilinin etrafındaki akış alanı	43
Şekil 3.4. Hesaplama bölgesinin ağ yapısı.....	44
Şekil 3.5.Veter uzunluğunun profil konumuna göre değişimi	52
Şekil 3.6. Profil bağlanma açısının profil konumuna göre değişimi.....	52
Şekil 3.7. NACA 63-415 kanat profili	53
Şekil 3.8. NACA 63-415 kanat profilinin dönme eksen noktası	53
Şekil 3.9. Kanat Profillerinin Döndürülmesi	54
Şekil 3.10. Kanat kılavuz eğrileri	54

Şekil	Sayfa
Şekil 3.11. Farklı tasarım uç hız oranlarında oluşturulan NACA 63-415 kanat modelleri.....	55
Şekil 3.12. Hava girişi kısmı.....	56
Şekil 3.13. Hava çıkışı kısmı	57
Şekil 3.14. Akış hacmi	57
Şekil 3.15. Geometri yüzeylerinin isimlendirilmesi	58
Şekil 3.16. Match control işlemi	59
Şekil 3.17. Kanat yüzeyi ve etrafındaki akışın sayısal ağ yapısı	59
Şekil 3.18. Kanat yüzeyine yakın kısımlarda inflation komutunun uygulanması	60
Şekil 3.19. Akış hacminin sayısal ağ yapısı.....	60
Şekil 3.20. Sınır koşulları.....	64
Şekil 4.1. Hesaplanan ve deney sonucu elde edilen C_L değerlerinin karşılaştırılması ..	65
Şekil 4.2. Kanat profilinin alt yüzeyinin C_L 'ye etkisi.....	66
Şekil 4.3. Kanat profilinin alt yüzeyinin C_D 'ye etkisi.....	66
Şekil 4.4. Kanat profilinin alt yüzeyinin C_L/C_D 'ye etkisi	67
Şekil 5.1. NACA 63-415 için türbin kanadı güç katsayısının tasarım uç hız oranı ile değişimi	68
Şekil 5.2. Farklı rüzgâr hızlarında tasarım uç hız oranına ($\lambda_{\text{tasarım}}$) bağlı olarak güç değişimi	69
Şekil 5.3. Farklı rüzgâr hızlarında tasarım uç hız oranına ($\lambda_{\text{tasarım}}$) bağlı olarak tork değişimi	69
Şekil 5.4. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=7$) için gücün kanat açısı ile değişimi	70
Şekil 5.5. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=7$) için torkun kanat açısı ile değişimi.....	71
Şekil 5.6. Farklı kanat uzunlukları sahip NACA 63-415 kanat modellerinin Tork-Rüzgâr Hızı eğrilerinin karşılaştırılması	74

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Farklı kanat uzunlukları sahip NACA 63-415 kanat modellerinin Güç-Rüzgâr Hızı eğrilerinin karşılaştırılması	74
Şekil 5.8. $\lambda_{\text{tasarım}} = 7$ tasarım uç hız oranında oluşturulan NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modelleri	78
Şekil 5.9. NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modellerinin Tork-Rüzgâr Hızı eğrilerinin karşılaştırılması	79
Şekil 5.10. NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modellerinin Güç-Rüzgâr Hızı eğrilerinin karşılaştırılması	79
Şekil 5.11. NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modellerinin 16 m/s için Güç Oranlarının karşılaştırılması.....	80
Şekil 5.12. NACA 63-415 kanat modelinin ön yüzeyindeki basınç dağılımı.....	81
Şekil 5.13. NCAY 30 kanat modelinin ön yüzeyindeki basınç dağılımı	82
Şekil 5.14. NCAYÜY 30 kanat modelinin ön yüzeyindeki basınç dağılımı	82
Şekil 5.15. NACA 63-415 kanat modelinin arka yüzeyindeki basınç dağılımı.....	83
Şekil 5.16. NCAY 30 kanat modelinin arka yüzeyindeki basınç dağılımı	83
Şekil 5.17. NCAYÜY 30 kanat modelinin arka yüzeyindeki basınç dağılımı	84
Şekil 5.18. NACA 63-415 kanat modelinde hız vektörünün dağılımı.....	85
Şekil 5.19. NCAY 30 kanat modelinde hız vektörünün dağılımı	85
Şekil 5.20. NCAYÜY 30 kanat modelinde hız vektörünün dağılımı	86

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

Simgeler

Açıklama

F_L	kaldırma kuvveti
F_D	sürükleme kuvveti
C_L	kaldırma katsayısı
C_D	sürükleme katsayısı
α	hücum açısı
θ	kanat açısı
A	üst bakış alanı
c	veter uzunluğu
ω	açısal hız
R	kanat yarıçapı
λ	kanat uç hız oranı
C_p	güç oranı
z	kanat sayısı
r	kanat profilinin bulunduğu yarıçap
$\lambda_{\text{tasarım}}$	tasarım kanat uç hız oranı
$\alpha_{\text{tasarım}}$	tasarım hücum açısı

Kısaltmalar

Açıklama

PVC	polivinil klorür
PU	poliüretan

PET	polietilen tereftalat
PS	polistiren
PEI	polieterimid
SAN	stiren akrilonitril



1. GİRİŞ

Son yıllarda nüfusun hızla artması, yeni teknolojilerin ortaya çıkması ve üretimin hızla artması dünyada enerji ihtiyacının artmasına neden olmuştur. Fosil yakıt rezervlerinde azalma ve bu tür yakıtların çevreye olumsuz etkileri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgiyi artırmıştır. Rüzgâr enerjisinin çevreyi kirletmeyen temiz bir enerji kaynağı olması, atmosferde çok miktarda bulunması ve bitmeyen bir enerji kaynağı olması nedeniyle bu enerji kaynağına ciddi bir yönelim olmuştur. Rüzgâr türbinleri rüzgârın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek şafta ileten ve sonrasında elektrik enerjisi üreten sistemlerdir. Rüzgâr türbinleri genel olarak kanat, kule, göbek, dişli kutusu, elektrik- jeneratör ve elektronik elemanları gibi bileşenlerden oluşur. Türbin kanatlarına hareket halindeki hava çarparak döndürür ve böylelikle havanın kinetik enerjisi mekanik enerjiye çevrilmiş olur. Rüzgâr türbinlerinde kanatların, göbek ve milinin oluşturduğu yapıya rotor denilmektedir. Rotor miline aktarılan düşük hızlı mekanik enerji, dönüş hızı dişli kutusu aracılığı ile arttırılıp yüksek hızlı mile jeneratöre aktarılır. Böylelikle elektro manyetik indüksiyon ile elektrik enerjisi üretilir. Oluşan enerji transformatörler ile arttırılarak akülerde depolanır ve şebekeye iletilir.

1.1. Rüzgâr Türbini Çeşitleri

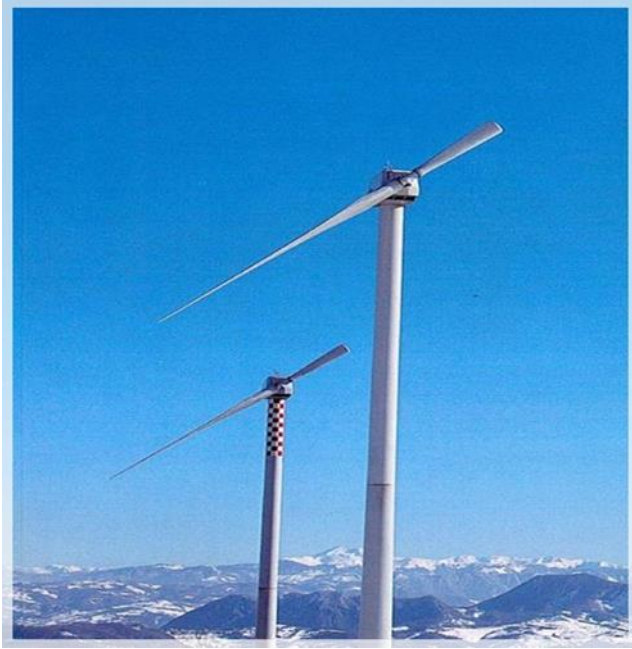
Rüzgâr türbinleri dönme eksenine göre yatay, dikey ve eğik eksenli rüzgâr türbinleri olmak üzere üç gruba ayrılır.

1.1.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde dönme eksenini rüzgâr yönüne paralel ve kanatlar ise rüzgâr yönüne diktir. Bu türbinlerde kanat sayısının azaltılması türbinin daha hızlı dönmesini sağlamaktadır. Bu türbinlerin verimi yaklaşık %45'tir. Bu tip türbinler yerden 20-30 m ve çevresel engellerden 10 m yüksek olacak şekilde konumlandırılmalıdır. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde temel tasarım parametrelerinden biri olan kanat uç hız oranı λ , kanat uç hızının rüzgâr hızına oranı olarak tanımlanmaktadır. λ değerinin 1-5, 6-8 ve 9-15 olması durumunda sırasıyla çok kanatlı, üç kanatlı ve iki kanatlı rotor kullanılırken λ değerinin 15 ve üzeri olması durumunda tek kanatlı rotor kullanılmaktadır (Elibüyük ve Üçgül, 2014).

Tek kanatlı rüzgâr türbinleri

Bu tip türbinlerde Şekil 1.1’de görüldüğü gibi tek kanat kullanılması dönme hızının artmasını buna karşın türbin kütlesinin ve rotorun dönme momentinin azalmasını sağlamıştır. Tek kanatlı rüzgâr türbinleri aerodinamik açıdan dengesiz olduklarından göbek kısmında istenmeyen ek yüklere neden olan yapılara ihtiyaç duyulur. Kanat uç hızının 120 m/s civarında olması aerodinamik gürültü seviyesinin yüksek olmasına sebep olur. Üç kanatlı rüzgâr türbini ile kıyaslandığında kanat uç hızı iki katıdır ve gürültü seviyesi bu yüzden daha yüksektir (Nurbay ve Çınar, 2005).



Şekil 1.1. Tek kanatlı rüzgâr türbini (Potuk, 2015)

Çift kanatlı rüzgâr türbinleri

Bu tür türbinlerde 3 kanatlı rüzgâr türbinlerine göre rotor maliyeti daha az gözükse bile dinamik yüklerden dolayı ekstra ekipmanlara gereksinim duyulmaktadır. Bu sebeple üç kanatlı rüzgâr türbini ile aynı maliyete sahiptirler. Bu türbinlerde göbeğin titreşiminin azaltılması için rotor kadran sistemi ile donatılmıştır. Bu türbinlerin kanat uç hızları üç kanatlı türbinlere göre daha yüksek olmasına rağmen gürültü seviyeleri yüksektir. Ayrıca düşük rüzgâr hızlarında (3 m/s) türbin kanadının devreye girmemesi bu türbinler için

dezavantajdır. Bu olumsuz yönlerinden dolayı iki kanatlı türbinlere piyasada talep bulunmamaktadır (Nurbay ve Çınar, 2005). Şekil 1.2’de çift kanatlı rüzgâr türbini görülmektedir.



Şekil 1.2. Çift kanatlı rüzgâr türbini (Wikipedia)

Üç kanatlı rüzgâr türbinleri

Bu tip türbinler en çok tercih edilen türbinlerdir. Bunun en önemli sebebi kanadın tüm dönme hızlarında atalet momentinin sabit olmasıdır. Tek ve çift kanatlı türbinlerle karşılaştırıldığında üç kanatlı rüzgâr türbinleri dengeli olduklarından, bu türbinlerin göbek kısmında titreşim önleyici ilave parçalara ihtiyaç bulunmamaktadır. Kanat uç hızı düşük (<70 m/s) olduğundan dolayı bu tür türbinlerde gürültü seviyesi düşüktür. Aşağıdaki avantajlarında dolayı üç kanatlı rüzgâr türbinleri günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır (Üzüm, 2015).

- Yapısal olarak daha sağlamdır. Titreme ve sallanma gibi problemleri yoktur.
- Dayanıklılık ve enerji üretimi açısından en verimli rüzgâr türbinidir.
- Gürültü seviyeleri kanat uç hızının düşük olması nedeniyle düşüktür.
- Sabit eylemsizlik momentine sahiptir.
- Daha estetik bir görünüme sahiptir.

Şekil 1.3'te üç kanatlı rüzgâr türbini görülmektedir.



Şekil 1.3. Üç kanatlı rüzgâr türbini (Yaşar Üniversitesi Haber Portalı)

Çok kanatlı rüzgâr türbinleri

Şekil 1.4'te görüldüğü gibi bu tür türbinler çok kanatlı üretilmektedir. İlk çok kanatlı rüzgâr türbinleri rüzgâr enerjisinden yararlanılarak suyun pompalanması için kullanılmıştır. Bu türbin tipi genelde düşük hızlarda çalışırlar. Kanat genişlikleri merkezden uçlara doğru genişler. Kanat mili dişli kutusu vasıtasıyla jeneratör mili devir sayısını artırır. Rüzgâr hızını sürekli dik olarak alabilmesi için türbin yönlendiricileri bulunmaktadır.



Şekil 1.4. Çok kanatlı rüzgâr türbini (Potuk, 2015)

1.1.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri

Bu türbin tipi Şekil 1.5'te görüldüğü gibi düşey dönme eksenine sahiptir.



Şekil 1.5. Darrieus-Savonius tipi türbinler (Elibüyük ve Üçgül, 2014)

Düşey eksenli rüzgâr türbinleri iç bükey dış bükey kanat yüzeyleri arasındaki çekme farkı ile dönme hareketi oluşturur. Rüzgârı her yönden kabul eden ve rüzgârı sürükleyen veya kaldıran bir kanat yapısına sahiptir.

Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin dişli kutusu ve jeneratörü toprak yüzeyine kurulabilirler bu yüzden düşük rüzgâr hızları ile çalışmak zorunda kalırlar. Düşük rüzgâr hızlarında su pompalamak için tasarlanmıştır ve verimleri yaklaşık olarak %35'tir. Darrieus ve Savonius tipi olmak üzere iki tip dikey eksenli rüzgâr türbini mevcuttur (Tong, 2010: 277-278).

1.1.3. Eğik eksenli rüzgâr türbinleri

Şekil 1.6'da eğik eksenli rüzgâr türbini görülmektedir. Türbin dönme eksenini ile düşey eksen arasında rüzgâr yönünde belirli bir açı bulunan rüzgâr türbinleridir. Bu tür türbinlerin kullanım alanları oldukça azdır.



Şekil 1.6. Eğik eksenli rüzgâr türbini (Elibüyük ve Üçgül, 2014)

1.1.4. Kanat çeşitlerine göre rüzgâr türbinlerinin karşılaştırılması

Kanat çeşitlerine göre rüzgâr türbinleri çeşitli parametrelere göre Çizelge 1.1’de karşılaştırılmıştır (Nurbay ve Çınar, 2005).

Çizelge 1.1. Yatay eksenli ve dikey eksenli türbinlerin karşılaştırılması

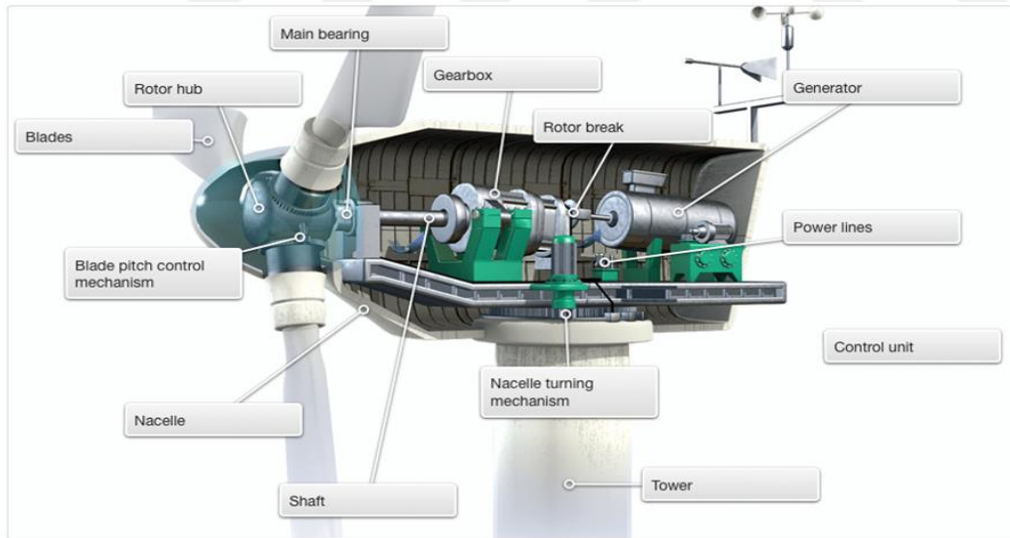
	YATAY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ				DİKEY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ	
	Tek Kanatlı	Çift Kanatlı	Üç Kanatlı	Çok Kanatlı	Savonius Tipi	Darrierus Tipi
Günümüzde kullanılabilirliği	-	-	+	+	Az	Az
Uygulama alanı	Güç üretimi	Güç üretimi	Güç üretimi	Güç üretimi ve pompalama	Güç üretimi ve pompalama	Güç üretimi ve pompalama
Çalışma hızı	Hızlı	Yavaş	Hızlı	Yavaş	Yavaş	Yavaş
Maliyeti	Fazla	Fazla	Az	Az	Az	Az
Kule gereksinimi	+	+	+	+	-	-
Gürültü	Fazla	Fazla	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Estetik görünümü	Kötü	Kötü	İyi	İyi	İyi	İyi
Rotorun dönmesinde yararlanılan kuvvet	Kaldırma	Kaldırma	Kaldırma	Kaldırma ve sürüklenme	Kaldırma ve sürüklenme	Kaldırma ve sürüklenme

1.2. Rüzgâr Türbini Bileşenleri

Rüzgâr türbinini oluşturan parçalar aşağıda belirtilmiştir.

- Kanatlar ve Rotor
- Kanat Açısı (pitch) ve Yön Açısı (yaw) Kontrolü
- Düşük Hızlı ve Yüksek Hızlı Şaft
- Mekanik Rotor Freni
- Dişli Kutusu
- Jeneratör Sistemi
- Hız ve Yön Düzenleyici
- Anemometre ve Rüzgâr Yön Sensörü
- Nasel
- Kule

Şekil 1.7’de türbini oluşturan parçalar görülmektedir.



Şekil 1.7. Rüzgâr türbini bileşenleri (Küçükkaya, 2019)

1.2.1. Kanatlar ve rotor

Şekil 1.8’de görülen türbin kanadının görevi üzerine etkiyen aerodinamik kaldırma ve sürüklenme kuvvetleriyle rüzgârın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmektir.

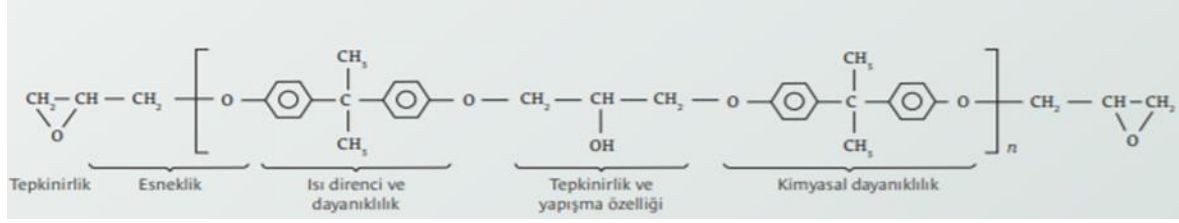


Şekil 1.8. Rüzgâr türbin kanadı (Kaya ve Koç, 2015)

Kanatlar ve göbek rotora bağlanmıştır. Kanatlar üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetler sayesinde güç rotor şaftından jeneratöre aktarılır. Rüzgâr türbin kanatları uzun yıllar çalışmakta ve bu süre zarfında statik ve dinamik yüklerin etkisi altında kalmaktadır. Bu nedenle yeni nesil rüzgâr türbin kanatlarının üretiminde cam, karbon ve aramid lifli polimer gibi kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin korozyon direnci, hafiflik, yüksek mukavemet, yüksek eğilme dayanımı ve ısıya dayanıklılığı en önemli tercih sebeplerindendir. Çelik ve alüminyum esaslı malzemelerle karşılaştırıldığında bu tür malzemeler daha hafiftir ve malzeme yorulmasına karşı üstün mekanik özelliklere sahiptir. Rüzgâr türbin kanadında kullanılan temel malzemeler aşağıda tanıtılmıştır.

Epoksi reçine

Termoset grubu reçinelerden olan epoksi reçineler yüksek yapışma gücü, kimyasal direnç ve mekanik özelliklere sahiptir. Epoksi reçinelere sertleştirici karıştırılarak sertleşme süresi kontrol altına alınabilir ve sıvı halden katı hale daha hızlı geçer. Epoksi reçineler diğer polysterlere göre sertleştiğinde daha az çekme özelliği gösterir (Cam Elyaf San. A.Ş., 2018). Epoksi reçineler genel yapısı ve özellikleri sırasıyla Şekil 1.9 ve Çizelge 1.2’de gösterilmiştir.



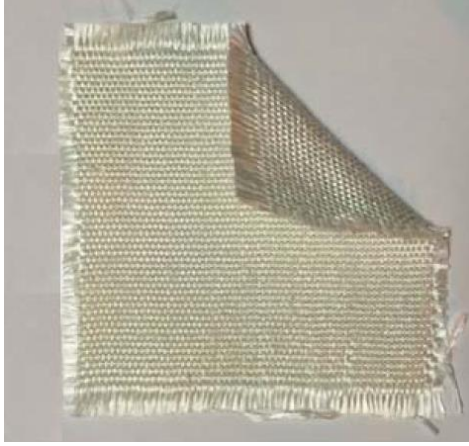
Şekil 1.9. Epoksi reçinenin genel yapısı (Baydemir, 2020)

Çizelge 1.2. Epoksi reçinenin özellikleri

Yoğunluğu	1100-1500 kg/m ³
Çekme Modülü ve Dayanımı	3-5 ve 0.06-0.08 GPa
Eğilme Dayanımı	0.1-0.15 GPa
Çekme Uzaması	%2-5
Basma Dayanımı	250 MPa
Isıl Sapma Sıcaklığı	120°C

Cam fiberler

Cam elyaflar eritilmiş camın küçük deliklerden akıtılarak soğutulması sonucu oluşur. Cam elyaf malzemenin reçine ile ısıtılıp kimyasal olarak sertleşmesi sonucu cam fiber malzeme oluşur. Şekil 1.10'da cam elyaf keçe görülmektedir.



Şekil 1.10. Cam elyaf kumaş (Gülmez, 2018)

Isı iletim katsayıları düşük, mekanik dayanımları yüksek olduğundan çeşitli kimyasallar ile karıştırılarak birçok kompozit malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Cam fiberler çeliğe göre dört kat daha yüksek çekme dayanımına sahiptir.

Cam fiber malzemelerin genel özellikleri;

- Hafif ve sağlam bir yapıya sahiptirler.
- Darbelere karşı dayanıklıdır.
- Korozyon direnci yüksektir.
- Cam fiberler reçine ile kompozit malzeme oluşturduklarında çekme dayanımları çok yüksektir.

Cam fiber çeşitleri ve genel özellikleri aşağıdaki gibidir (Uysal, 2008).

A Tipi Cam Fiber: Alkali içerir ve alkalilere dayanımı iyi değildir. Hurda camlar eritilerek elde edilir.

C Tipi Cam Fiber: Kimyasal direnci yüksek cam elyaf türüdür.

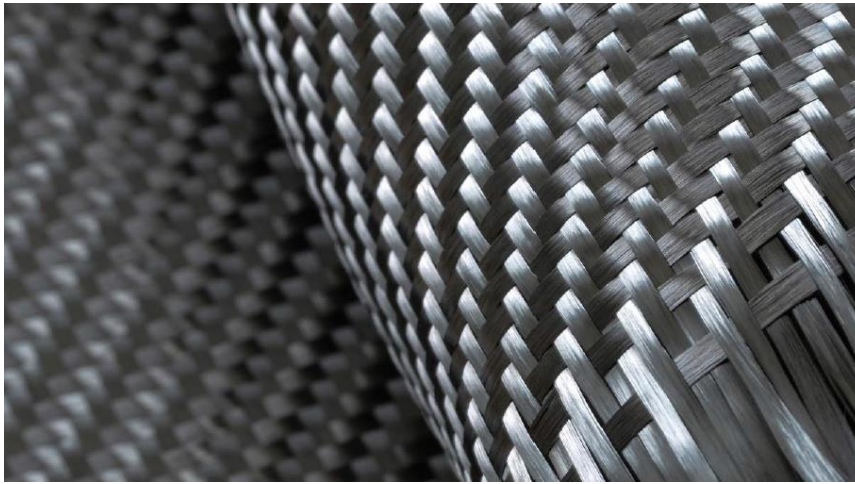
D Tipi Cam Fiber: Elektrik yalıtkanlığı yüksek cam elyaf türüdür. Özellikle anten gövdelerinde kullanılır.

E Tipi Cam Fiber: Alüminyum borosilikat camından üretilmektedir. Aşırı sıcaklıkta yüzeyi yumuşar ancak erime gerçekleşmez.

R ve S Tipi Cam Fiber: Gerilme mukavemeti yüksek cam elyaf türüdür.

Karbon fiberler

Karbon fiber ipliksi yapıya sahip bir malzeme türüdür. İçeriğinde katran, naylon ve akrilik elyaf (orlon) bulunan bu fiber malzeme çelik malzemeden dört kat daha hafif, beş kat daha güçlü ve iki kat daha serttir. Bu sebeplerden dolayı birçok parça için ideal üretim malzemesi haline gelmiştir. Şekil 1.11’de karbon fiber kumaş görülmektedir



Şekil 1.11. Karbon fiber kumaş (Gülmez, 2018)

Karbon fiber malzemenin özellikleri (Campbell, 2010),

- Düşük yoğunluğa sahiptir.
- Korozyon direnci yüksektir.
- Sürtünme katsayısı düşüktür.
- Hafif ve sağlam bir yapıya sahiptir.
- Mukavemeti yüksektir.

Aramid fiberler

Aramid fiberler naylon sınıfından bir polimerdir. Çeliğe yakın bir sertliği vardır ve ticari adı Kevlar’dır. Isıya dayanıklı ve güçlü bir malzeme alan aramid fiber hafif ve dayanıklıdır. Şekil 1.12’de aramid fiber kumaş görülmektedir



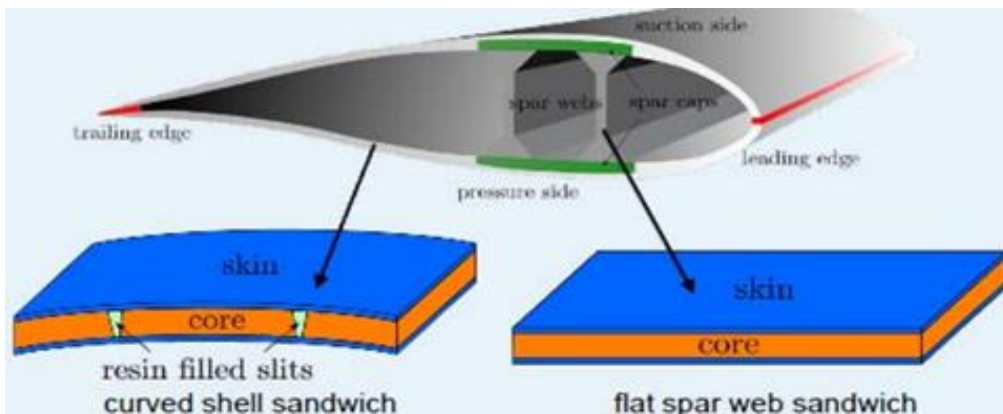
Şekil 1.12. Aramid fiber kumaş (Gülmez, 2018)

Aramid fiberlerin genel özellikleri (Campbell, 2010);

- Yüksek çekme mukavemetli bir polimerdir.
- Doğal kimyasallara dirençlidir ancak asit ve alkalilerden etkilenirler.
- Darbe direnci yüksektir.
- Aramid fiberler elektriksel iletkenliğe sahip değildir.
- Düşük yoğunluğa sahiptir ve maliyeti düşüktür.
- Karbon elyaf ile cam elyaf arasında bir sertliğe sahiptir. Nem emme özelliği kötüdür.

Ara (core) malzemeler

Ara malzemeler sandviç yapıdaki kanat profillerinde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.13'te kanat kesitinin sandviç yapısı ve ara malzemenin olduğu katman görülmektedir.



Şekil 1.13. Kanat kesitinin sandviç yapısı (Karabağ, 2011)

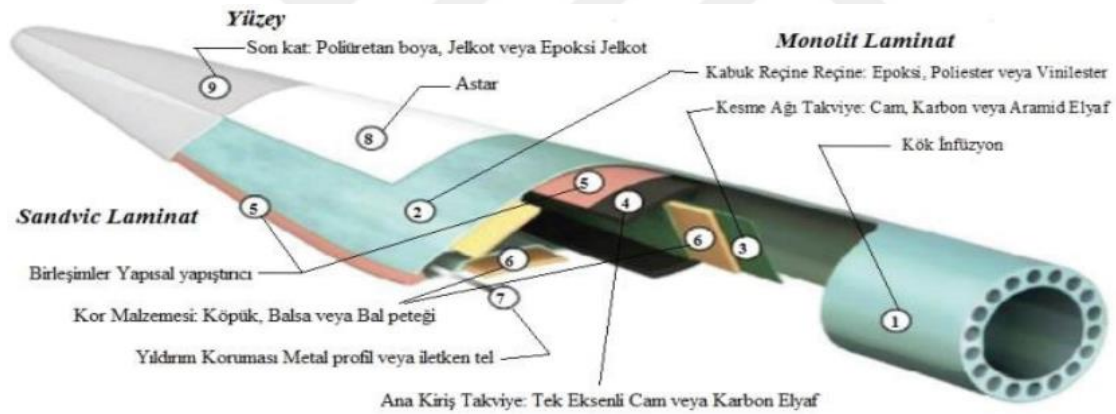
Kanatlarda eğilme dayanımını arttırmak için dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Bu malzemelerin kullanımı eğilme dayanımını 3,5 kat arttırmaktadır. Ara malzeme olarak genelde aşağıdaki malzemeler kullanılmaktadır.

Köpükler: Polivinil klorür (PVC), poliüretan (PU), polietilen tereftalat (PET), polistiren (PS), polieterimid (PEI) ve stiren akrilonitril (SAN) gibi çeşitleri vardır.

Ağaç malzemeler: Kontrplak, sunta ve Balsa ağacı gibi çeşitleri vardır.

Bal peteğine benzer malzemeler: Alüminyum, çelik, karbon, poliüretan, polietilen, polipropilen, seramik, aramid ve polyester (Cam Elyaf San. A.Ş., 2018).

Şekil 1.14'te kompozit malzemeden yapılan bir kanatın katmanları ve bu katmanlarda kullanılan malzemeler gösterilmiştir

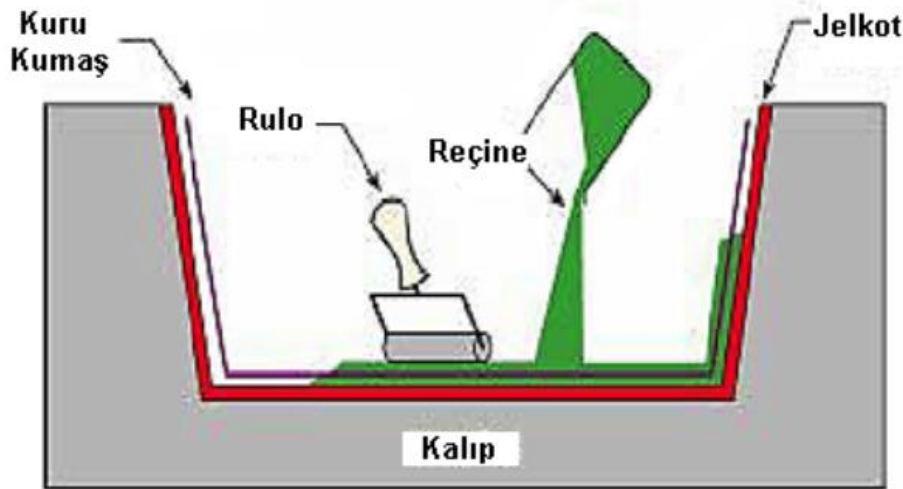


Şekil 1.14. Kanat katmanları ve kullanılan malzemeler (Avcı ve Yılmaz, 2012)

Rüzgâr türbini kanatlarının üretiminde aşağıdaki yöntemlerle yapılmaktadır.

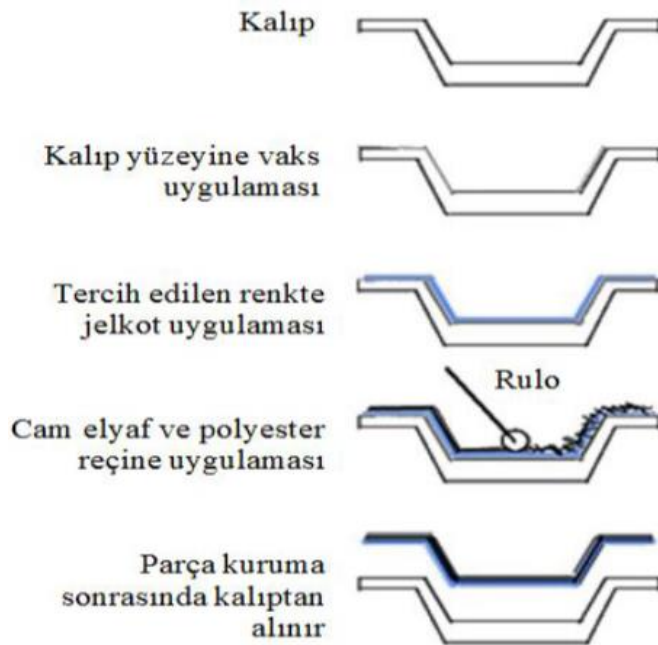
El yatırma yöntemi

Şekil 1.15'te görülen el yatırma yöntemi en yaygın kullanılan kalıplama yöntemidir.



Şekil 1.15. El yatırma yöntemi (Durgun, 2014)

Bu yöntemin uygulanması kalıba yatırılan takviye malzemelerinin üzerine sıvı reçine emdirilmesi sonucu kalıbın şeklinin verilmesi esasına dayanır. Şekil 1.16’da el yatırma yönteminin adımları görülmektedir.



Şekil 1.16. El yatırma yöntemin adımları (Durgun, 2014)

Öncelikle cam lifli parçanın kalıba yapışmasını önlemek için epoksi veya doymamış polyester reçinesi esaslı jelkot (kalıp ayırıcı) kalıbın içerisine serilir. Jelkot yeterince sertleştikten sonra takviye malzeme tabakaları serilir ve reçine uygulanır. El yatırma işlemi

tamamlandıktan sonra reçine oda sıcaklığı ve atmosfer basıncında kurumaya bırakılır. Kuruyan parça kalıptan çıkarılarak kesme, çapak alma ve boyama adımlarına hazırlanır.

El yatırma yönteminin avantajları;

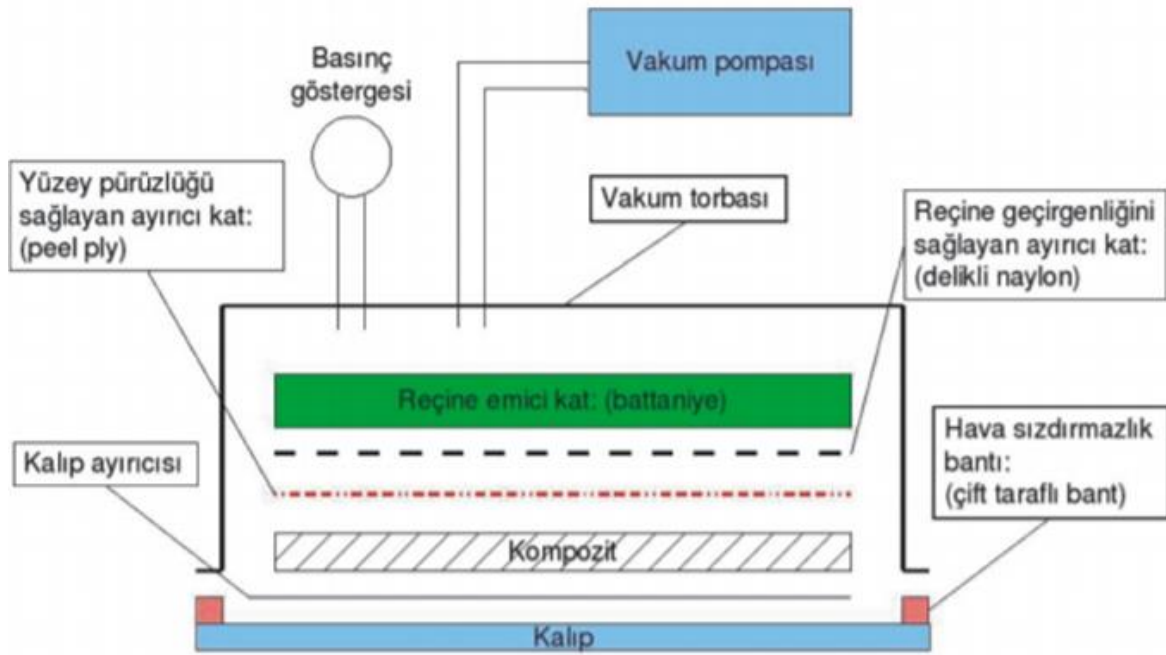
- Üretim maliyeti düşüktür.
- Üretilcek parçaların boyutlarında kısıtlama olmayıp tek parça halinde yüksek mukavemet gerektiren parçaların üretimini gerçekleştirme imkânı sağlamaktadır.
- Reçinelerden kaynaklı çekme sorunu nedeniyle özel tasarım yapılabilir.
- Yerinde kalıplama imkânı tanımaktadır.

El yatırma yönteminin dezavantajları;

- Tek yüzü düzgün parça üretilmesi
- İş gücünün yüksek olması
- Ürün kalitesinin çalışan tecrübesiyle orantılı olması
- Reçinenin kimyasal uçuculuğu
- Reçine uygulamasının homojen olmaması (Durgun, 2014).

Vakum torbalama ile el yatırma yöntemi

Şekil 1.17’de vakum torbalama ile ele yatırma yöntemi klasik ele yatırma yönteminin dezavantajlarını ortadan kaldırarak homojen ve daha hafif malzemeler üretilmesini olanak vermektedir. Bu yöntemde lifli kumaş malzemesinin elle kalıp içerisine serilir ve reçine elle kalıp içine dağıtılır.



Şekil 1.17. Vakum torbalama ile el yatırma yöntemi (Turgut, Kayran, Alemdaroğlu ve Ceylan, 2007)

Kompozit malzeme üretiminde basınç ve sıcaklığın önemli bir yeri vardır. Sıcaklık reçineyi sertleştirerek ve sertleşmiş kompozit katkı maddesini yumuşak hale getirerek üretim sürecini kolaylaştırır. Pozitif basıncın uygulanması ile katmanların birbirlerine daha iyi yapışması sağlanabilir. Negatif basıncın uygulanmasıyla ise reçine ve kompozit kumaş arasında bulunan hava kabarcıklarının dışarıya çekilmesi sağlanır. Bu da kompozit kumaş ve reçine tüm katmanlara daha iyi nüfuz etmiş olur.

Vakum torbalama sisteminin ana bölümleri;

- *Kalıp ayırıcısı*: Kalıp yüzeyinin kompozit malzemeye yapışmasını engelleyen sıvı kimyasaldır.
- *Yüzey pürüzlülüğü için ayırıcı katman*: Genellikle naylon ve polyesterden üretilen yüzey pürüzlülüğü sağlayan katmandır.
- *Reçine geçirgenliği sağlayan katman*: Naylon ve polyesterden üretilen ve fazla reçinenin kompozit malzemenin katmanları arasında sızarak emici kata ulaşmasını sağlayan katmandır.
- *Reçine emici katman*: Fazla reçinenin emildiği katmandır.

- *Vakum torbası*: Kalıp üzerine yerleştirilerek vakumun gerçekleşmesini sağlayan naylon malzemedir.
- *Vakum pompası*: Torba içerisindeki gerekli vakum gücünün oluşmasını sağlar.

Vakum uygulamasının klasik el yatırma yöntemine göre avantajları aşağıda belirtilmiştir.

- Vakum sayesinde katmanlar arasındaki lif-reçine oranının artması sağlanmıştır. Kompozit malzemenin sağlam olabilmesi için liflerin iyice reçine ile kaplanmış olması gerekmektedir. Lif reçine oranının artması kompozit malzemenin kırılabilirliğini azaltacaktır.
- Lifler arasında reçinenin homojen dağılması vakum uygulamasıyla sağlanmaktadır. Reçine dağılımının homojen olması mukavemeti daha hesaplanır kılmaktadır.
- Vakum sayesinde katmanların birleşme mukavemeti artmıştır dolayısıyla katmanlar arasındaki kesme mukavemeti de artmıştır.
- Vakum sayesinde katmanlar arasındaki boşluklar en aza indirilmiştir. Böylece çatlak oluşumuna sebep olan kaynaklar en aza indirilmiş ve mukavemet artırılmıştır (Turgut ve diğerleri, 2007).

Vakum infüzyon yöntemi

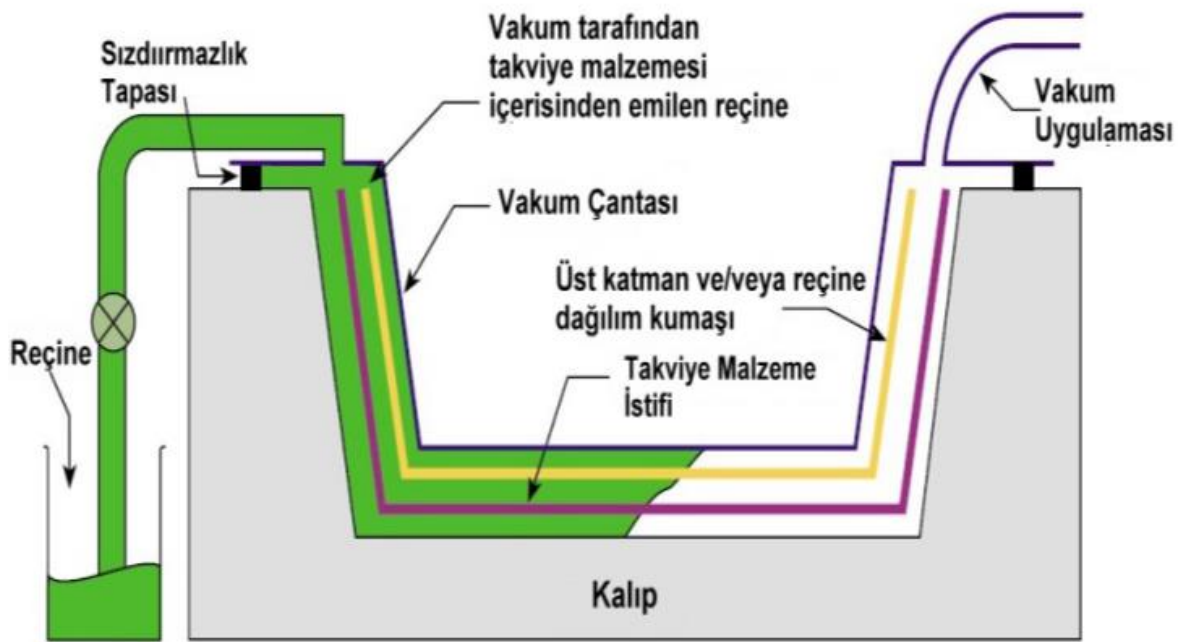
Bu üretim yöntemi yüksek teknoloji gerektiren sektörlere kompozit malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Kalıbın içine jelkot uygulandıktan sonra kuru takviye ve dolgu malzemeleri yerleştirilir ve vakum çantası üzerine kapatılır. Takviye malzemesine reçinenin emdirilmesi için vakum uygulanır.

Vakum infüzyon yönteminin avantajları ve dezavantajları aşağıda belirtilmiştir (Memiş, 2009).

- Proses kalitesi operatörün becerisine bağlı değildir bu nedenle istikrarlı bir parça kalitesi mevcuttur.
- Parça büzülmesi ve çarpılması minimum düzeydedir.
- Arada hava kabarcığı kalmadığı için lamine kalitesi ve birleştirilmesi mükemmeldir. Homojen et kalınlığına sahiptir.
- Kompleks yapıları bulunan parçaların imalatları tek parça halinde gerçekleştirilebilir.
- Parçanın net boyutlarda imalatı yapılarak talaşlı işlem süresi azaltılabilir.

- Bu yöntemle mükemmel bir takviye-reçine oranı sağlanıp ağırlık düşürülerek mukavemet artırılabilir.
- Malzeme ve tedarik masrafları yüksektir.
- Talaşlı son işlem masrafları yüksektir.
- Her bir ürün için kendine özel proses geliştirmelere ihtiyaç duyulabilmektedir.

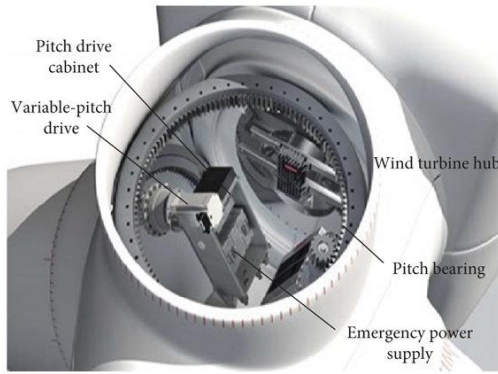
Şekil 1.18’de Vakum infüzyon prosesi görülmektedir.



Şekil 1.18. Vakum infüzyon prosesi (Memiş, 2009)

1.2.2. Kanat açısı (pitch) ve yön açısı (yaw) kontrolü

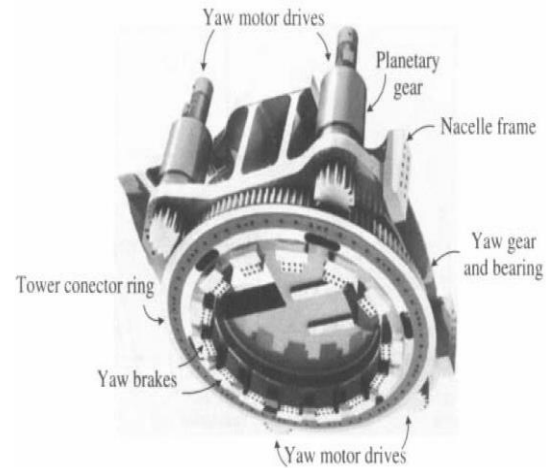
Türbin gücünün sabit tutulması amacıyla aktif kanat açısı kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Rüzgâr hızının anma hız değerini aştığı durumlarda kanatların döndürülmesi ile hücum açısı değiştirilir ve türbin gücü sabit tutulur. Şekil 1.19’da görülen pitch kontrol mekanizması devreye girerek türbin tasarım kapasitesine uygun bir çıkış gücü üretilmesi sağlanır.



Şekil 1.19. Pitch kontrol (Zhou ve Liu, 2018)

Sabit güç üretimini sağladıkları için oldukça kaliteli bir güç çıkışı sağlanmaktadır. Kanat açısı kontrol sistemi ile kanat açıları en uygun değerlere ayarlanarak rüzgârdan maksimum elektrik enerjisi üretilmesi sağlanır. Rüzgâr hızı aratarak türbin kapasitesinin sınırına ulaştığında, türbin kanatları rüzgâr yükünü azaltarak frenlemeye yardımcı olur (Nak, 2013).

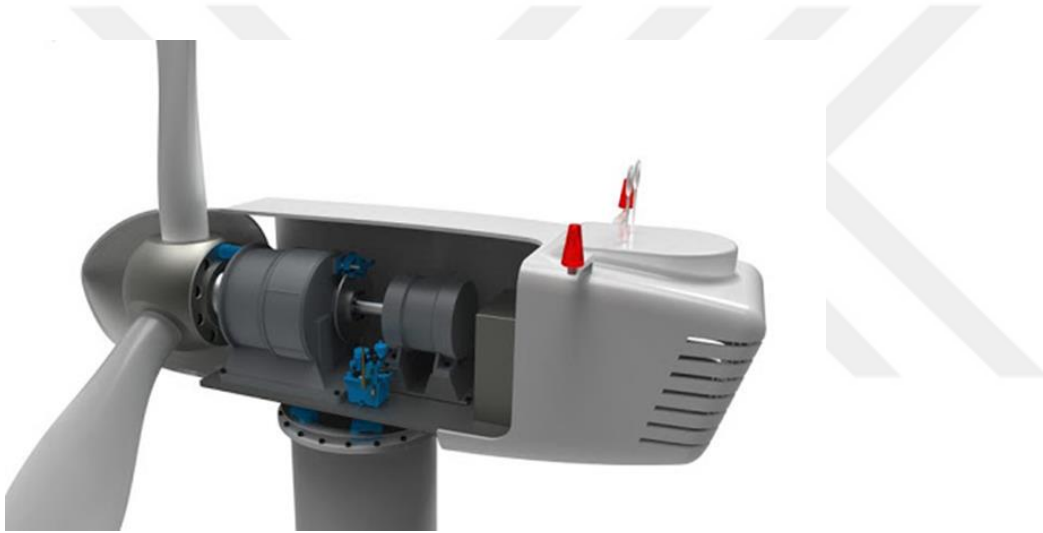
Yön kontrol mekanizmasının temel amacı türbinin rüzgârı karşıdan alması sağlanarak türbinden maksimum enerji üretilmesini sağlamaktır. Yön kontrolcüsü üzerinde birden fazla tahrik motor sürücüsü, ayar mil dişlisi bulunur. Yön sürücü sistemlerinde kuleyi döndürebilmek ve 10000-70000 Nm arası tork üretmek için planet dişli kullanılır. Bütün motorlar aynı sinyali ile kontrol edilmektedir. Türbin belirlenen konuma gelince motorlar kitlenir. Şekil 1.20’de görülen dört sürücülü bir yönlendirici bulunmaktadır.



Şekil 1.20. Dört tahrikli yaw kontrol mekanizması (Leblebicioğlu, 2021)

1.2.3. Mekanik rotor fren sistemi

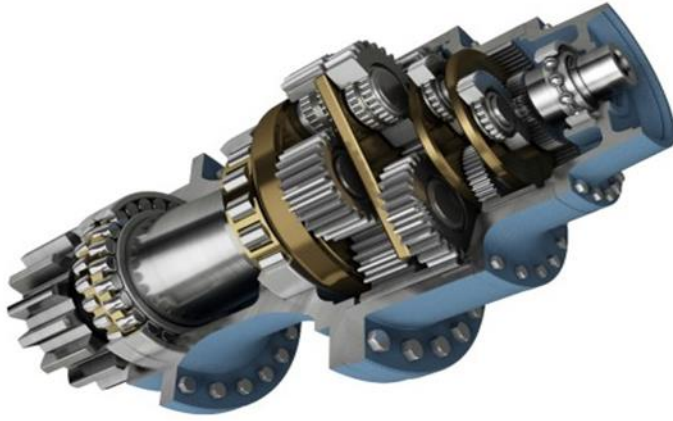
Rüzgâr türbinlerinde güvenlik için etkili bir fren sistemine ihtiyaç vardır. Rüzgâr türbinlerinde birbirinden bağımsız olarak çalışan mekanik ve aerodinamik fren sistemleri mevcuttur. Mekanik frenler genellikle dişli kutusu ile jeneratör arasındaki yüksek hızlı şafta monte edilir. Genellikle hidrolik veya elektro manyetik disk fren sistemleri yaygın olarak kullanılır. Frenler, rüzgâr hızının yüksek olduğu durumlarda türbini durduran veya park modunda çalışmasını sağlayan kanat açısı kontrol sistemleri gibi aerodinamik güç kontrol sistemlerine yardımcı olmak için kullanılır. Şekil 1.21’de rüzgâr türbini disk fren sistemi görülmektedir.



Şekil 1.21.Rüzgâr türbini disk fren sistemi (Anadolu Balata)

1.2.4. Dişli kutusu

Şekil 1.22’de görülen rüzgâr türbini dişli kutusu, düşük dönüş hızına sahip türbinin hızını jeneratör için gerekli hıza yükseltmek için kullanılır. Bu türbin elemanın ana görevi rüzgârdan hareketini alan ve yavaş dönen rotorun hızını dakikada 1000-1500 devir/dakika arasında dönmesi gereken jeneratörün hızına çevirmektir. Rüzgâr türbini dişli kutularında genel olarak planet dişli sistemi kullanılır. Elektrik motoru kutup sayılarının artması ile jeneratörlerin yüksek devir ihtiyacını ortadan kaldırmıştır ve dişli kutusu ihtiyacı azalmıştır. Bu yüzden doğrudan sürücülü türbinlerde dişli kutusu yoktur.



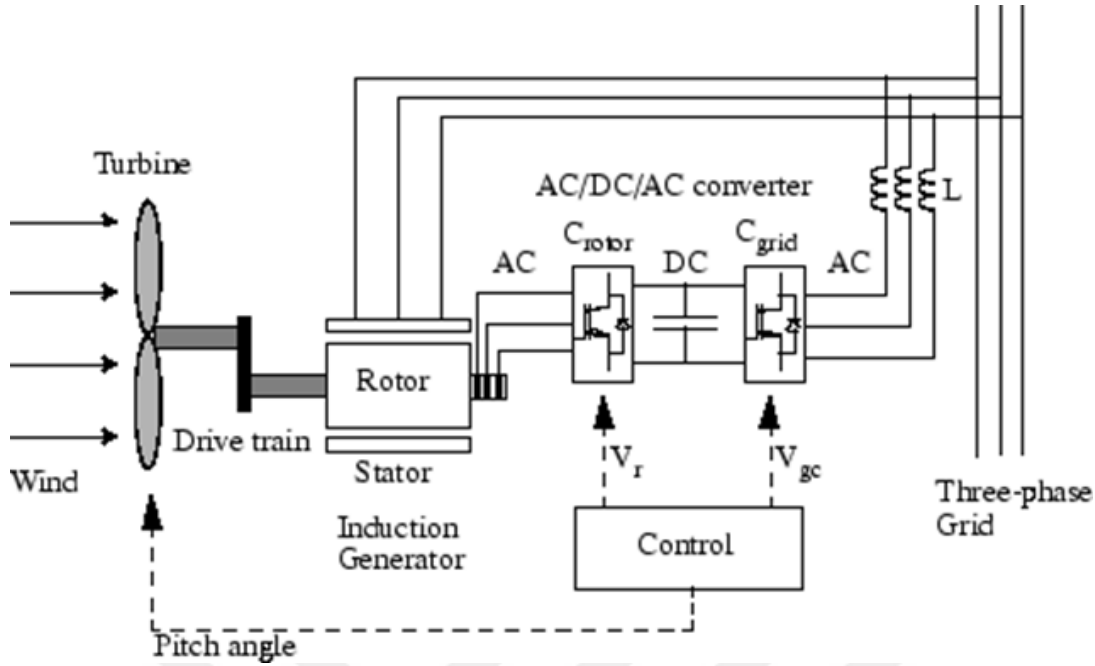
Şekil 1.22. Rüzgâr türbini dişli kutusu (SCHAEFFLER)

1.2.5. Jeneratör sistemi

Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmek için kullanılır. Jeneratörler üç başlık altında incelenebilir. Bunlar,

- Asenkron Jeneratörler
- Senkron Jeneratörler
- Doğru Akım Jeneratörü

Rüzgâr türbinlerinde bu jeneratör türlerinden genellikle asenkron jeneratör tercih edilir. Bu jeneratörler manyetik alan prensibine dayanarak mekanik enerjiyi elektrik enerjiye çevirirler. Şekil 1.23’ te rüzgâr türbininde kullanılan asenkron jeneratörün bağlantı şeması görülmektedir.



Şekil 1.23. Rüzgâr türbininde kullanılan asenkron jeneratörün bağlantı şeması (Dursun ve Kakilli)

Asenkron jeneratörün avantajları ve dezavantajları (Apaydın, Üstün, Kurban ve Filik, 2009):

- Mekanik olarak basit olması, kolay üretilebilir ve sağlam olması nedeniyle tercih edilirler. Düşük bütçeli ve büyük güçte jeneratörlerdir.
- Rüzgâr hızlarının çok değişken olduğu durumlarda en yüksek performansa sahip jeneratörlerdir. Ani sert rüzgâr değişimlerinde oluşan şok darbelerini emme özelliği vardır.
- Rüzgâr hızının aşırı yükseldiği durumlarda kendini korumaya alarak zarar görmesini engeller.
- Dönen kontaklar olmamasından dolayı başlatma kolaydır.
- Rotor hızı ayarlanabilir olduğu için bu jeneratör tipi şebeke ile eş zamanlı çalışmak zorunda değildir. Şebekeye kolaylıkla bağlanabilir.
- En büyük dezavantajı ise şebekeye doğrudan bağlı olduğu için şebekede bulunan reaktif gücü kendisine alması söz konusudur bu yüzden kompanzasyon sistemi kurulumu şarttır.

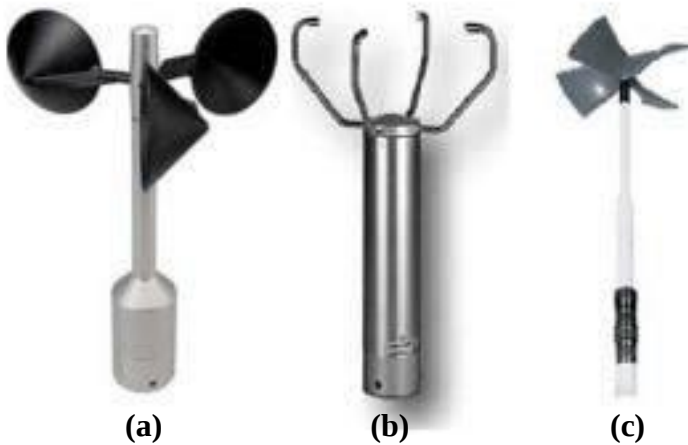
1.2.6. Anemometre ve yön sensörü

Rüzgâr türbinlerinde basıncı, nemi, rüzgârın hızı ve yönünü ölçmek için çeşitli sensörler kullanılır.

Anemometreler rüzgârın hızını elektrik sinyaline dönüştüren sistemlerdir. Anemometrenin üç farklı çeşidi vardır. Bunlar:

- Kepçe Anemometre,
- Ultrasonik Anemometre,
- Propeller Anemometre

Şekil 1.24'te kepçe, ultrasonik ve propeller anemometre görülmektedir.



Şekil 1.24. a) Kepçe, b) ultrasonik ve c) propeller anemometre (Ataseven ve Ataseven, 2009).

Kepçe ve propeller anemometrelerin çalışma prensipleri aynıdır. Kepçe veya propeller rotorunun her bir dönüşü için geçen süreye göre hız belirlenir ve bu hız elektrik sinyaline dönüştürülür.

Ultrasonik anemometrelerde ise uçlardan yayılan ses dalgasının diğer bir alıcı tarafından alınması sırasında geçen süre hesaplanır. Anemometreden gelen elektrik sinyalleri rüzgâr türbini kontrol ünitesine iletilir. Rüzgâr hızı 5 m/s değerine ulaştığında rüzgâr türbini devreye girer, türbini ve çevresini korumak için 25 m/s hız değerine ulaştığında ise türbini korumaya alarak durdurur.

Rüzgâr belirli bir yönden esebileceği gibi farklı yönlerden de esebilir. Rüzgâr yönlerinin değişken frekanslarının ve hızlarının doğru ölçülebilmesi için rüzgâr yönünün de ölçülmesi gerekmektedir. Rüzgâr yön sensörleri ölçülen bu bilgiyi elektrik sinyaline dönüştüren sensörlerdir (Ataseven ve Ataseven, 2009). Şekil 1.25'te rüzgâr yön sensörü görülmektedir.



Şekil 1.25. Rüzgâr yön sensörü (Ataseven ve Ataseven, 2009).

1.2.7. Kule

Şekil 1.26'da görüldüğü gibi kule yapıları genellikle silindirik konik bir yapıya sahiptir.

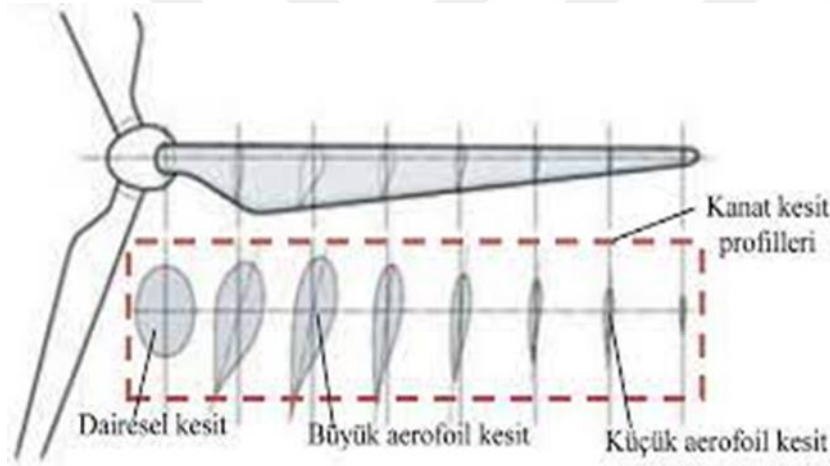


Şekil 1.26. Rüzgâr türbini kulesi (Enerji Gazetesi.ist)

Kule tasarımına uygun sıcak çekilmiş sac lar merdanelerde konik bükülür. Parçalar halinde üretilen kule elemanlarının alt ve üst yüzeylerinin içine flanşlar kaynatılarak cıvatalarla birbirine bağlantısı gerçekleştirilir. Kuleler flanşla monte edilebildiği gibi taşınabileceği ölçüde kaynak yapılarak da monte edilebilir.

1.3. Rüzgâr Türbini Aerodinamiği

Rüzgâr enerjisinden en verimli bir şekilde yararlanabilmek için rüzgâr türbin kanadı tasarımında aerodinamik prensiplerden yararlanılır. Rüzgâr türbin kanadı Şekil 1.27’de görüldüğü gibi kök, orta ve uç olmak üzere üç bölgeden oluşur.



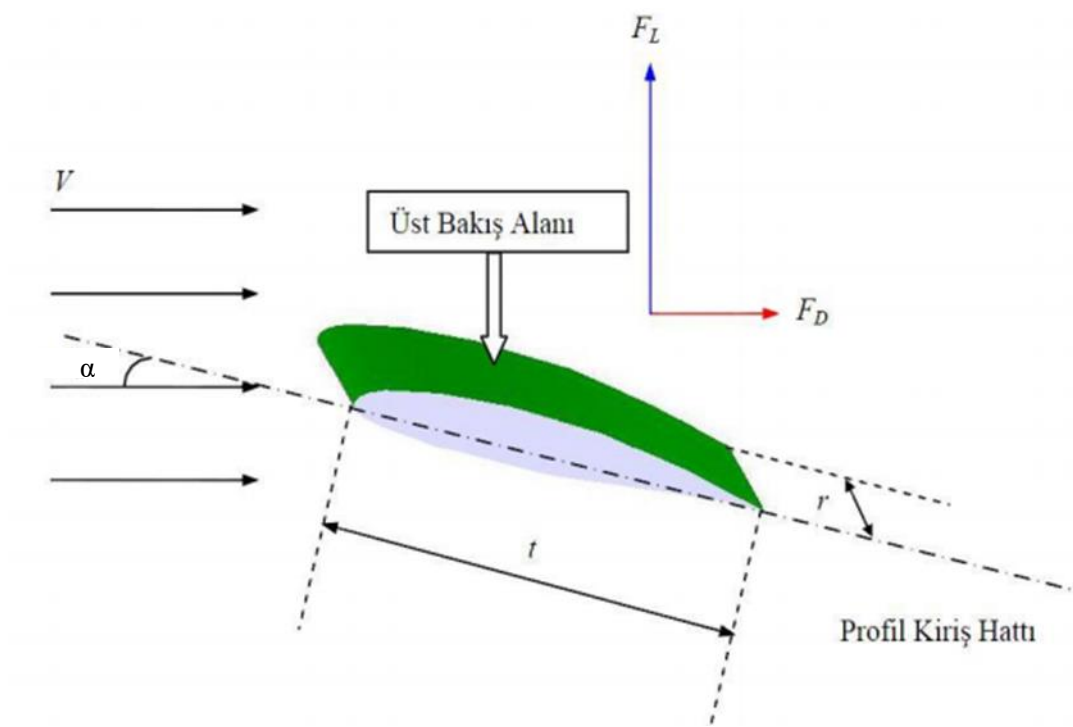
Şekil 1.27. Kanat bölgeleri ve aerofoil kesitleri (Kaya ve Koç, 2015)

Çoğu türbin kanadında kanat uzunluğu boyunca kesit profilleri birbirinden farklı olduğu için bu uç kanat bölgesinde aerodinamik ve yapısal özellikleri birbirinden farklıdır. Kök bölgesi daha çok yüke ve momente maruz kalırken uç bölgeye doğru çevresel hız ve kanat genişlikleri değişim gösterir. Kanat kök kısmı dairesel kesite sahiptir. Orta kısım geniş kesite sahiptir ve güç üretiminde en etkili bölgedir. Uç kısım ise daha küçük kesite sahiptir ve açılma hızının en yüksek olduğu bölgedir (Kaya ve Koç, 2015).

Bir kiriş hattının üzerinde ve altında bulunan iki eğrinin birleşmesiyle oluşan geometriye kanat profili veya airfoil denir. Bu eğrilerden üstteki eğrinin yarıçapı alttaki eğrinin yarıçapından daha küçüktür. Bu durum kanadın her iki yüzünde farklı akış hızı oluşmasını

sağlar ve bu nedenle kanat yüzeylerinde basınç farkı oluşur. Böylece Şekilde 1.28’de görüldüğü gibi kanadın alt bölümünden üst bölümüne doğru F_L kaldırma kuvveti elde edilir.

Akışın sebep olduğu sürüklenme kuvveti (F_D) her zaman akış yönüne paralel oluşurken F_L kaldırma kuvveti sürüklenme kuvvetine ve akışa dik yöndedir (Anderson,2020; Aubrun, Leroy ve Devinant, 2017). Oluşan bu kuvvetler ile rüzgâr türbinin performansı arasında doğrudan bir ilişki vardır. Kaldırma kuvveti türbinlerde kinetik enerjiden elektrik enerjisi elde edilmesini sağlar. α , hücum açısı rüzgâr yönü ile veter uzunluğu arasındaki açıdır.



Şekil 1.28. Kanat profiline etkiyen kuvvetler ve hücum açısı (Şentürk, 2007)

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A V^2 \quad (1.1)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2 \quad (1.2)$$

Denklem 1.1 ve 1.2’de C_L ve C_D değeri sırasıyla kaldırma ve sürüklenme katsayısıdır.

$$C_L = \frac{F_L}{0,5\rho V^2 A} \quad (1.3)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0,5\rho V^2 A} \quad (1.4)$$

Burada, A kanat üst bakış alanıdır. ρ havanın yoğunluğu ve V serbest akış hızıdır.

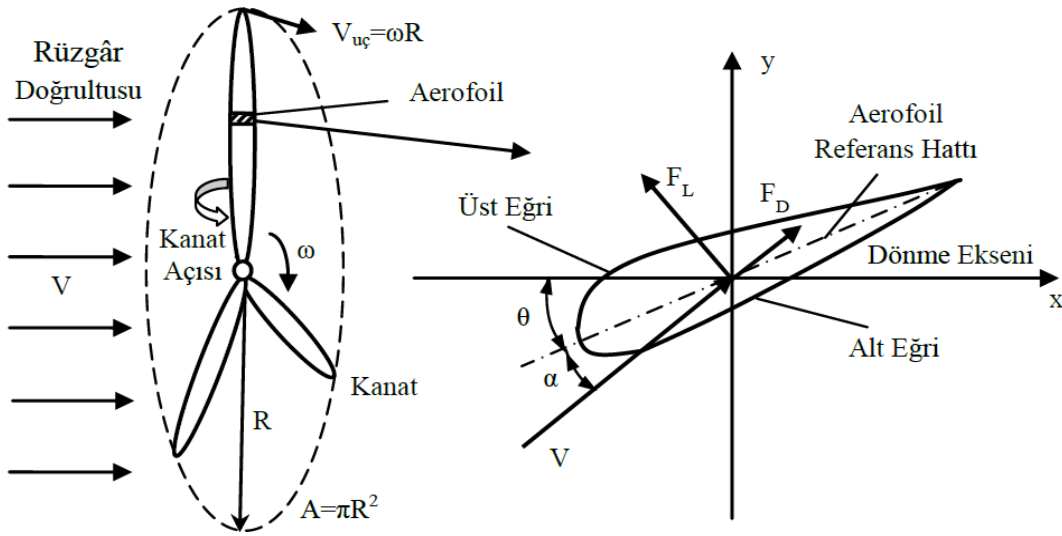
$$A = t \cdot r \quad (1.5)$$

Şekil 1.28’de gösterildiği gibi Denklem 1.5’te t veter uzunluğu ve r kanat açıklığıdır.

Rüzgâr türbinlerinde kanat profilinin performansı kaldırma kuvveti katsayısının sürüklenme kuvveti katsayısına oranı (C_L/C_D) ile ölçülmektedir.

Kanat açısı

Rüzgâr türbini kanatları kanat uzunluğu boyunca özel airfoillerden oluşmaktadır. Şekil 1.29’da görülen kanadın kendi ekseninde döndürülmesiyle oluşan Şekil 1.29’da görülen referans eksenini ile kanadın dönme eksenini arasındaki açıya kanat açısı, θ adı verilir.



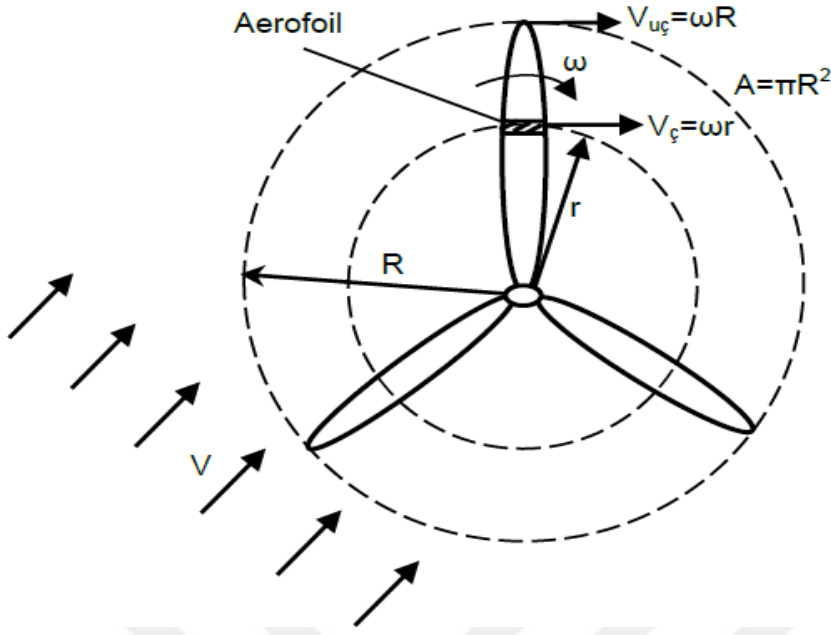
Şekil 1.29. Rüzgâr türbini kanat açısı (Koç ve Şenel, 2016)

Uç-hız oranı

Şekil 1.30'da kanat uç-hız oranı, λ , kanadın uç hızının ($V_{uç}$) rüzgâr hızına (V) bölünmesi ile elde edilir.

$$\lambda = V_{uç} / V = \omega R / V \quad (1.6)$$

Burada R (m), kanat yarıçapı, ω (rad/s), kanadın açısal hızı ve V (m/s) rüzgâr hızıdır.



Şekil 1.30. Rüzgâr türbini kanat uç-hız oranı (Şenel ve Koç, 2014)

Aerofoilin bulunduğu konumun uç hız oranı bulunmak istenildiğinde yerel uç hız oranından faydalanılır. Yerel uç hız oranı aerofoilin bulunduğu konumdaki çevresel hızın rüzgâr hızına bölünmesi ile bulunur. Yardımcı yarıçap (r), kanat açısal hızı (ω), kanat çevresel hızı ($V_{\text{ç}}$) olarak sembolize edilmiştir.

$$\lambda_r = V_{\text{ç}} / V = \omega r / V \quad (1.7)$$

Güç oranı

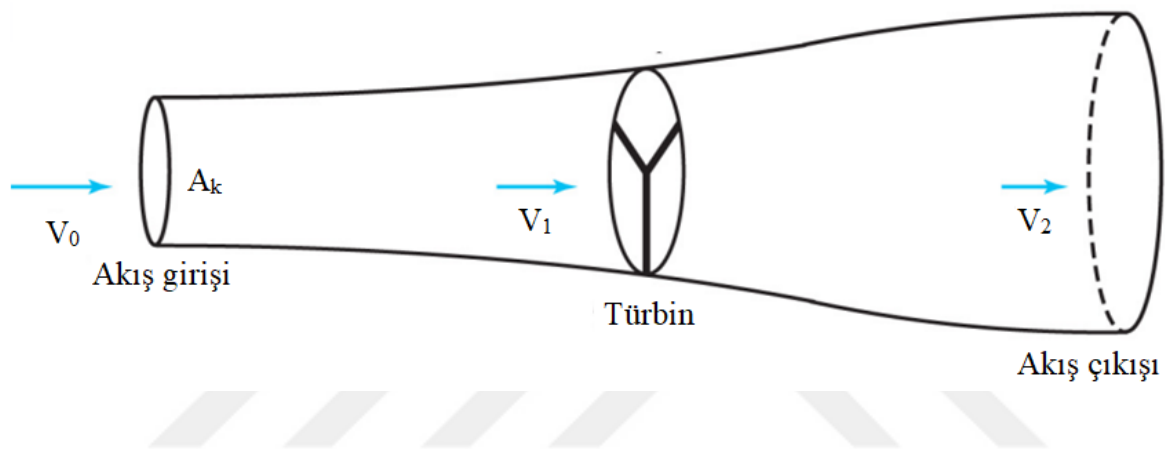
Bu parametrede rüzgârdan elde edilen gücün hangi oranda kanatlara aktarıldığı belirlenmektedir. Güç oranı (C_p) rüzgârdan türbinin elde ettiği gücün (P_R), havanın taşıdığı rüzgâr gücüne (P) bölünmesiyle elde edilir.

$$C_p = P_R / P = P_R / (0,5 \rho \pi R^2 V^3) \quad (1.8)$$

$$P_R = T \omega \quad (1.9)$$

Bu çalışmada Denklem 1.9’da Tork ANSYS Fluent paket programı kullanarak hesaplanmıştır.

Maksimum güç katsayısı Betz limiti veya teorisi ile hesaplanmaktadır. Betz teorisinde rüzgâr türbini kanadının mükemmel bir enerji dönüştürücü olduğu kabul edilmiştir. Bu teoriye göre Şekil 1.31 görülen türbinin ön tarafında rüzgârın gücü hesaplanır (Üzüm, 2015).



Şekil 1.31. Rüzgâr türbini boyunca hız değişimi

Bu durumda P rüzgârın gücü,

$$P = \frac{1}{2} \rho A_k V_0^3 \quad (1.10)$$

Burada V_0 ve A_k girişteki hızı ve kesit alanıdır.

Betz teoremine göre rüzgâr türbinin gücü Şekil 1.31’de görülen türbin boyunca uygulanan süreklilik ve Bernoulli denklemleri ile hesaplanmaktadır.

$$P_R = \frac{1}{2} \rho V_1 A_k (V_0^2 - V_2^2) \quad (1.11)$$

Burada V_1 rüzgârın türbin içindeki ortalama hızı ve V_2 rüzgârın çıkış hızıdır.

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2} \quad (1.12)$$

Denklem 1.12, Denklem 1.13'te yerine yazılırsa,

$$P_R = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{V_0 + V_2}{2} \right) A_k (V_0^2 - V_2^2) \quad (1.13)$$

Denklem 1.13 tekrar düzenlenirse,

$$P_R = \frac{1}{2} \rho V_0 \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_2}{V_0} \right) A_k V_0^2 \left(1 - \frac{V_2^2}{V_0^2} \right) \quad (1.14)$$

Denklem 1.10, Denklem 1.14'te yerine yazılırsa,

$$P_R = P \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_2}{V_0} \right) \left(1 - \frac{V_2^2}{V_0^2} \right) \quad (1.15)$$

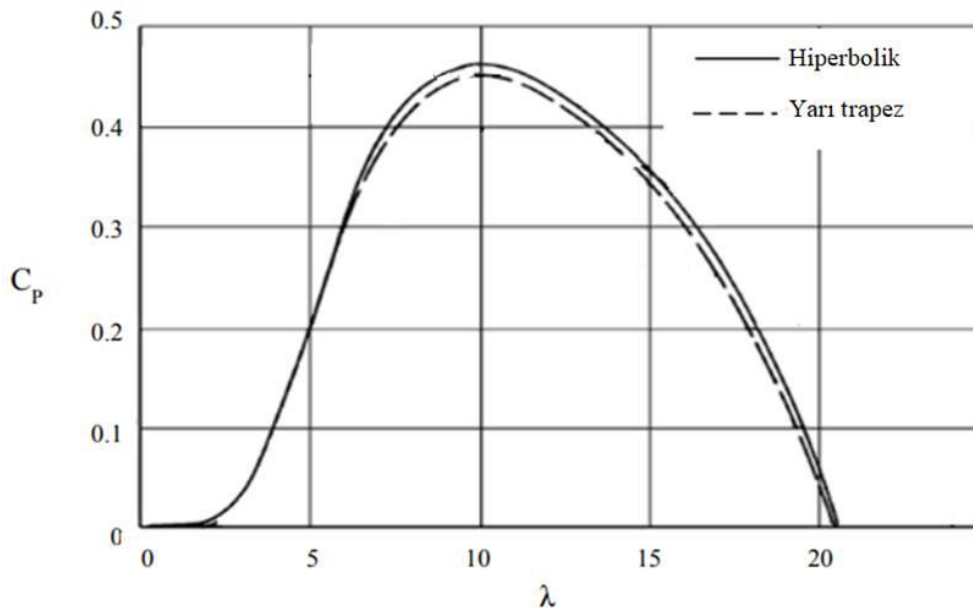
Denklem 1.15, Denklem 1.8'e göre tekrar düzenlenip yavaşlama faktörü $n = V_2/V_0$ yerine yazılırsa,

$$C_p = \frac{1}{2} (1 + n)(1 - n^2) \quad (1.16)$$

Maksimum C_p değerini bulmak için Denklem 1.16'nın türevi alınıp sıfıra eşitlenirse n değeri $1/3$ ve -1 bulunur. $n = -1$ olmayacağı için $n = 1/3$ Denklem 1.16'da yerine konursa maksimum C_p değeri $0,593$ olarak bulunur. Bu sonuçtan anlaşılacağı gibi rüzgâr enerjisinden tümüyle faydalanmak imkansızdır. Rüzgâr türbin kanadından rüzgâr enerjisi yavaşlayarak çıkmaktadır. Eğer rüzgâr türbinden tamamen durgun halde çıkmış olsaydı

rüzgârın türbine girmesini engellenecek ve sürekli akış sağlanmayıp rüzgâr enerjisinden faydalanılamayacaktır.

Rüzgâr türbinlerinde, kanat geometrisi aerodinamik performansı etkilemektedir. Şekil 1.32’de yatay eksenli rüzgâr türbininde hiperbolik ve yarı trapez kanat geometrilerinin C_p - λ değişimi görülmektedir (Koç ve Şenel, 2016). Şekil 1.32’de görüldüğü hiperbolik ve yarı trapez kanat geometrilerinde maksimum C_p değerleri sırasıyla 0,46 ve 0,44 olarak $\lambda=10$ iken elde edilmiştir.



Şekil 1.32. Farklı kanat yapılarında C_p - λ değişimi (Koç ve Şenel 2016)

Tasarım hızları

Rüzgâr türbinlerinde, rüzgâr türbininin devreye girdiği hız (V_C), nominal hız (V_R) ve devreden çıktığı hız (V_F) tasarım hızları tanımlanmaktadır. Nominal hız (V_R), rüzgâr türbininde maksimum enerji üretimi yapan minimum hızdır ve değeri tasarım parametrelerine bağlı olarak 8 ile 15 m/s arasında değişiklik göstermektedir ve 2 ile 4 m/s arasında değişen bu hız devreye giriş hızı (V_C) olarak tanımlanmaktadır. Yüksek rüzgâr hızlarında türbini koruma amaçlı türbin kapama hız değerine devreden çıkış hızı (V_F) adı verilmektedir ve genelde 20-28 m/s arasında değişmektedir (Koç ve Şenel, 2016).

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Rüzgâr türbinlerinde kanadın geometrisi ve boyutları, kanadın mukavemetini ve aerodinamik performansını önemli derecede etkiler (Hansen, 2008). Rüzgâr türbininden maksimum aerodinamik verim elde edilebilmesi için kanatlardaki kinetik enerjinin kayba uğramadan alınmasını sağlayacak şekilde tasarlanması gerekir (Rehman, Alam, Alhems ve Rafique, 2018). Ticari amaçlı rüzgâr türbinlerinde kanat profillerinin geometrisi rüzgâr akışı nedeniyle kanat yüzeyinde oluşan kuvvetlerin büyüklüğünü etkilemektedir. Bu nedenle son zamanlarda kanatlarda kaldırma kuvvetinin iyileştirilerek aerodinamik verimi artıracak yeni kanat profillerinin tasarımıyla ilgili sayısal çalışmaları önem kazanmıştır (O'Brien, Young, O'Mahoney ve Griffin, 2017). Mevcut standart kanat geometrilerinde değişiklikler yapılarak C_L değerini artıran ve C_D değerini azaltan yeni kanat profilleri geliştirilebilmektedir. Böylece rüzgâr hızı değişmeden türbin gücü artırılabilir.

2.1. İki Boyutlu Sayısal Çalışmalar

Erişen ve Bakırcı (2014) standart NACA 0012 ve NACA 4412 kanat geometrisinde değişiklikler yaparak yeni kanat geometrileri elde etmiştir. 20 m/s akış hızı ve 0° - 18° hücum açısı aralığında, k- ϵ türbülans modelini kullanarak elde edilen sonuçlar yeni kanat geometrilerinde standart kanat geometrilerine göre C_L ve C_D değerlerinin iyileştiğini göstermiştir. Yılmaz ve diğerleri (2016) subsonik rüzgâr tüneli laboratuvarında 6- 8 m/s rüzgâr hızlarında ve $-4^\circ \leq \alpha \leq 26^\circ$ hücum açısı aralığında NACA 63-415, NACA 4415 ve S826 kanat profilleri kullanılarak aerodinamik performansını deneysel olarak araştırmışlar. Onlar NACA 63-415 kanat profili ile elde edilen C_L/C_D değerlerinin tüm hızlarda diğer kanat profillerine göre daha yüksek olduğunu bulmuşlardır.

Şahin ve Acır (2015) 0° - 20° hücum açısı aralığında ve 10 m/s rüzgâr hızında NACA 0015 kanat profilinin aerodinamik performansını deneysel olarak incelemişler ve bu sonuçları k- ϵ ve Spalart Allmaras türbülans modelleri kullanılarak ANSYS Fluent programıyla elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Onlar Spalart Allmaras modeli ile tahmin edilen C_L ve C_D değerlerinin deneysel verilerle daha uyumlu olduğunu ve hücum açısı arttığında ($> 16^\circ$) C_L katsayısının azaldığını gözlemişlerdir. Ayrıca 8° hücum açısında optimum kanat performansının elde edildiğini görmüşlerdir.

Soğukpınar (2017) 50 m/s rüzgâr hızında ve 0° ile 14° hücum açısı aralığında, SST (Shear Stress Transport) türbülans modelini kullanarak COMSOL programı ile NACA 00XX (0008-0024) kanat profillerinin HAD analizini yapmıştır. NACA 0012 kanat profilinin basınç katsayısı (C_p) ve C_L ilgili sayısal sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırmış ve birbirleriyle uyum sağladığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca kanat profillerinde kalınlığın artmasının C_L değerinin azalttığını görmüşlerdir.

Nigam, Tenguria ve Pradhan (2017) -2° - 8° hücum açısı aralığında NACA 634-22 kanat profilini HAD yöntemiyle ANSYS Fluent programı kullanarak incelemiştir. Onlar k- ω SST türbülans modelinde elde edilen C_L ve C_D değerlerini deneysel verilerle karşılaştırmışlar ve C_L değerlerinin deneysel verilerle daha uyumlu olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca en yüksek C_L ve C_D değerlerini 8° hücum açısında elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Düz (2016) 0° - 20° hücum açısı aralığında ve 4- 20 m/s rüzgâr hızlarında EPPLER 580, FX84-W-218, FX 63-137 ve SELİG S8036 kanat profillerini sayısal olarak incelemiştir. Sonuçlar FX 63-137 kanat profili ile tüm hücum açılarında en yüksek C_L/C_D değerlerinin elde ettiğini göstermiştir. Bunun yanında, bütünün kanat profillerinde incelenen hız aralığında 3° ile 7° hücum açısı aralığında maksimum performans elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Özkan ve Erkan (2022) 6° hücum açısında ve 0.1-0.5 mm pürüzlülük yüksekliğinde NACA 63-415 kanat profilinin pürüzlülüğünün kanat performansına etkisini sayısal olarak araştırmışlardır. Onlar düşük Reynolds sayısı değerlerinde ($<10^4$) NACA 63-415 kanat profilinin pürüzlülüğünün kanat performansına etkisinin olmadığını ve 5×10^4 - 1.5×10^5 Reynolds sayısı aralığında ise kanat pürüzlülüğün aerodinamik performansı artırdığını gözlemişlerdir. Reynolds sayısının değeri 2.5×10^5 'den sonra C_L/C_D değerleri azaldığını tespit etmişlerdir.

Güleren ve Demir (2011) 0° - 20° hücum açısı aralığında ve 20 m/s rüzgâr hızında, Spalart-Allmaras türbülans modeli ile EİFFEL 10, EPPLER 625 ve 664, CLARK Y, NACA Munk M4 ve FX 69-PR-281 kanat profilleri ile sayısal analiz yapmışlardır. Sonuçlar CLARK Y kanat profilinin diğer kanat profillerine göre en yüksek C_L/C_D değeri elde edildiğini gözlemişlerdir.

Douvi ve Margaris (2012) NACA 0012 ve NREL S809 kanat profillerini 1×10^6 - 3×10^6 Reynolds sayılarında -10° ile 15° hücum açısı aralığında Spalart Allmaras, Realizable k- ϵ ve k- ω SST türbülans modellerini kullanarak HAD yöntemiyle incelemiştir. Elde edilen C_L ve C_D değerlerini deneysel çalışma ile karşılaştırmışlar ve k- ω SST türbülans modelinde deneysel çalışmaya daha yakın sonuçlar elde edildiğini görmüşlerdir. Analizler sonucunda her iki Reynolds sayısı için NREL S809 kanat profilinde bütün hücum açılarında daha yüksek C_L kaldırma katsayısı değeri elde etmişlerdir sadece stall bölgesinde düşük kaldırma katsayısı değeri elde etmişlerdir. Rüzgâr türbinlerinde NREL S809 kanat profilinin NACA 0012 kanat profiline göre daha verimli olduğunu tespit etmişlerdir.

Ravi, Madhukeshwara ve Kumarappa (2013) NACA 4412 kanat profilinin 0° - 18° hücum açısı aralığında k- ω SST ve Spalart- Allmaras türbülans modelleri kullanılarak sayısal analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bu sayısal analizler neticesinde elde edilen C_L kaldırma katsayısı ve C_D sürüklenme katsayısı değerlerini rüzgâr tüneline elde edilen test verileri ile karşılaştırmışlar ve iki türbülans modelinde de deneysel verilere yakın sonuçlar elde etmişlerdir. k- ω SST türbülans modelinin stall öncesi ve stall sonrası bölgede C_L kaldırma katsayısının ve C_D sürüklenme katsayısının deneysel verilere daha yakın sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir.

Kumar ve diğerleri (2015) NACA 23024 kanat profilini HAD yöntemiyle ANSYS Fluent programı kullanılarak incelemişlerdir. Onlar 0° - 20° hücum açısı aralığında, 3×10^6 Reynolds sayısında Spalart-Allmaras ve k- ϵ türbülans modellerini kullanarak analizleri gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen analiz sonuçlarını rüzgâr tüneli test sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Analizler sonucunda elde edilen C_L kaldırma katsayısı ve C_D sürüklenme katsayısı değerlerinin 16° hücum açısına kadar iki türbülans modelinde rüzgâr tüneli test sonuçlarına yakın olduğu gözlemlemişlerdir. 16° hücum açısından sonra Spalart Allmaras türbülans modelinde rüzgâr tüneli test sonuçlarına daha yakın sonuçlar elde etmişlerdir.

Olayemi ve diğerleri (2021) NACA 0012 kanat profilinin -14° - 20° hücum açısı aralığında Mach sayısı 0,13 olan Spalart-Allmaras, Realizable k- ϵ ve k- ω SST türbülans modelleri kullanılarak ANSYS Fluent programı ile analizleri gerçekleştirmişlerdir. Analizler sonucunda elde edilen C_L kaldırma katsayısı ve C_D sürüklenme katsayısı değerlerini deneysel çalışma ile karşılaştırmışlardır. Analizlerde kullanılan üç türbülans modelinde

deneysel çalışma ile uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir. 14° ve 16° hücum açısı aralığında duraklamanın meydana geldiği ve en iyi sonucun k- ω SST türbülans modelinde elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

2.2. Üç Boyutlu Sayısal Çalışmalar

HAD yöntemi kullanılarak rüzgâr türbini kanadının modellenmesi ve performans optimizasyonu ile ilgili farklı çalışmalar yapılmıştır (Zhu, Shen, ve Sørensen, 2014; Bai ve Wang, 2016; Altaee, Khlaifat, Zhou ve Huang, 2020; Shourangiz-Haghighi ve diğerleri, 2020; Rodriguez ve Celis, 2022). Bu çalışmaları iki kısma ayırabiliriz. Birinci kısım çalışmalarda kanat yarıçapı boyunca sabit veter uzunluğuna sahip tek kanat profili kullanılmıştır. İkinci kısım çalışmalarda ise kanat kök, gövde ve uç kısmında farklı kanat profilleri kullanılmıştır.

Bazı araştırmacılar belirlenen tasarım uç hız oranı ve hücum açısı için hesaplanan veter uzunlukları ile oluşturulan kanat profilleri kanat yarıçapı boyunca düzlemlere veya istasyonlara yerleştirip hesaplanan bağlama açılarıyla birbirine bağlanarak üç boyutlu kanat modeli oluşturmuşlardır (Şentürk, 2007; Üzüm, 2015; Hasan, El-Shahat, ve Rahman, 2017). Bu çalışmaların amacı aerodinamik olarak rüzgârdan maksimum yararlanmaktır.

Kanat elemanı momentum (BEM) teorisi kullanılarak kanat üzerine etkiyen aerodinamik yükler iterasyon yöntemiyle hesaplanabilmektedir. Hasan, El-Shahat, ve Rahman (2017) 1-10 kanat uç hız oranında, 7 m/s rüzgâr hızında, S822, S822 ve S833 kanat profilleri birlikte kullanılarak oluşturulan kanat modelinin performansını BEM ve HAD yöntemleri yardımıyla araştırılmışlardır. Onlar XFOIL programı ile her üç kanat profilinde de maksimum C_L/C_D değeri yaklaşık 6° hücum açısında elde ettikleri için hesaplamaları bu hücum açısında yapmışlardır. Kanat uzunluğunu üç kısma ayırmışlar ve kök kısmına 3 tane S823, orta kısmına 3 tane S833 ve uç kısmına 3 tane S822 kanat profili kullanarak kanat modelini üretmişlerdir. BEM yöntemi ile hesaplanan performans katsayı değerlerinin 1-9 kanat uç hız oranında HAD yöntemi ile hesaplanan performans katsayısı değerlerinden fazla olduğunu ve her iki yöntemde de maksimum performans katsayısının 6 kanat uç hız oranında elde edildiğini gözlemişlerdir.

Tanürün ve diğerleri (2020) veter uzunluğu 8 cm olan NACA 0018 kanat profilini ile 8 ve 16 cm kanat uzunluklarında iki yeni kanat konfigürasyonu üretmişlerdir. $5,7 \times 10^4$ Reynolds sayısında ve 0° - 60° hücum açısı aralığında yeni kanat modellerinin aerodinamik performansını deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Sayısal analizi SST türbülans modeli kullanarak ANSYS Fluent yazılımı ile yapmışlardır. Deneysel ve sayısal sonuçlar 16 cm kanat uzunluğuna göre 8 cm kanat uzunluğunda C_L/C_D değerinin arttığını göstermiştir.

Yossri, Aayed ve Abdelkefi (2021) NACA 0012, NACA 4412, NACA 0015 ve NACA 4415 olmak üzere dört kanat profilini kullanarak 50, 75 ve 100 cm rotor çaplarında, 4 m/s serbest akış hızında ve 0° ile 8° hücum açısı aralığında küçük ölçekli bir rüzgâr türbininin güç çıkışı üzerindeki etkisini ANSYS Fluent kullanılarak HAD yöntemi ile analiz etmişlerdir. Onlar diğer kanat profilleri ile karşılaştırıldığında NACA 4412 kanat profili ile daha yüksek C_L/C_D oranını elde etmişler ve bu kanat profilinin türbin aerodinamik performansını iyileştirdiğini bulmuşlardır. Bunun yanında SOLIDWORKS programını kullanarak NACA 0012, NACA 4412, NACA 0015 ve NACA 4415 kanat profillerinin katı kanat modellerini oluşturmuşlardır. Üç boyutlu HAD analizi sonucunda incelen tüm kanat profillerinde rotor çapı arttıkça türbin gücünün arttığını ve maksimum gücün NACA 4412 kanat profile oluşturan türbin kanadı ile elde edildiğini görmüşlerdir.

Görgülü, Özgür ve Köse (2021) 0° ile 15° hücum açısı aralığında, veter ve giriş uzunluğu 111 mm olan NACA 0009 profilline sahip türbin kanadının aerodinamik performansını ANSYS Fluent programı ile analiz etmişlerdir. k- ω türbülans modeli kullanılarak elde edilen analiz sonuçları C_L değerlerinin 0° ile 10° hücum açısı arasında arttığını ve 10° 'den sonra azaldığını buna karşın C_D değerlerinin incelen hücum açısı aralığında sürekli olarak arttığını göstermiştir. Onlar en iyi kanat performansı C_L/C_D değerinin maksimum olduğu 5° hücum açısında elde etmişlerdir. 0° hücum açısında akım çizgilerinin üniform ve simetrik olduğu buna karşın 5° hücum açısında sonra akış ayrılmasının başladığını ve 15° 'de akış ayrılmasının en fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Kanattaki akış ayrılmaların artması ve kanadın alt ve üst yüzeyindeki basınç farkının azalmasından dolayı F_L değerinin düştüğünü gözlemişlerdir.

Uç hız oranı düşük olduğunda türbinin yavaşlamakta ve kanatların arasından rüzgâr geçmektedir. Buna karşın uç hız oranı yüksek olduğunda kanatlar çok hızlı döndüğünden

kanatlar katı bir duvar gibi davranarak çıkış gücünü azaltmakta, yapısal hatalara ve gürültüye neden olmaktadır. Bu nedenle türbin kanadı tasarımında optimizasyon çok önemlidir.

Abbas ve diğerleri (2018) rüzgâr hızı, kanat sayısı (2-6) ve uç hız oranı (0-11) gibi parametrelerin C_p oranına etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlar 6,5 m/s rüzgâr hızında ve 6 kanat için maksimum C_p oranı elde edildiğini göstermiştir. Onlar kanat sayısının artmasının kanat ağırlığını, maliyetini ve C_D oranını artırdığını gözlemişlerdir. Bu nedenle rüzgâr türbini için 3 kanadın ve 6-7 uç hız oranının optimum seçim olduğunu belirlemişlerdir. ANSYS Fluent programı ile deneysel sonuçları doğrulamışlardır.

Karasu, Özden ve Genç (2018) 8° , 12° ve 20° hücum açılarındaki, 2.5×10^4 - 7.5×10^4 Reynolds sayısı aralığında ve en-boy oranı 1 ve 3 olan NACA4412 profili ile oluşturulan kanatların akış yapısını deneysel ve sayısal olarak incelenmişlerdir. Deneysel veriler ve $k-k_L$ (laminer kinetik enerji) $-\omega$ ve $k-\omega$ SST geçiş modellerini kullanarak ANSYS Fluent programı ile elde edilen sonuçlar en-boy oranının kanadın üzerindeki üç boyutlu akış yapısını önemli ölçüde etkilediğini ve geçiş modellerinin C_L oranları ile karşılaştırıldığında C_D oranlarını daha iyi tahmin ettiğini göstermiştir. Ayrıca $k-k_L-\omega$ modelinin $k-\omega$ SST modeli ile karşılaştırıldığında kanat yüzeyine yakın helisel vorteksler içeren ikincil akışları daha iyi tahmin ettiğini gözlemişlerdir.

Bakırcı ve Yılmaz (2018) NACA 64-421 ve NACA 65-415 kanat profilleri kullanarak 6, 7 ve 8 kanat uç hız oranlarında 6 farklı kanat geometrisi üretmişlerdir. 0° , 10° ve 20° hücum açılarındaki BEM teorisi kullanarak kanat geometrisinin rotor gücü verimliliğine etkisini teorik olarak ve ANSYS Workbench platformunda sayısal olarak araştırmışlardır. BEM teorisi, BEM-HAD ve HAD yöntemi ile elde edilen sonuçlar maksimum C_p değerinin ve optimum uç hız oranının 0,54 ve 8,2 olarak en fazla BEM teorisi ile elde edildiğini göstermiştir. Onlar HAD sonuçlarının BEM teorisi ile elde edilen sonuçlara uyumlu olduğunu ve sonuçlar arasındaki farkların BEM teorisindeki kullanılan kabullerden kaynaklandığını rapor etmişlerdir.

Rathore ve Ahmed (2012) farklı kanat profillerini (E387, FX63-37, NACA2414, NACA2415, S809, S822, S823, S834 ve SD2030) kullanarak sabit kanat uzunluğunda (21

m) yeni kanatlar üretmişlerdir. Kanat geometrisini optimize etmek için aynı rüzgâr hızında (0-25 m/s) ve 0-15 kanat uç hızı aralığında üretilen kanat konfigürasyonlarının aerodinamik performansını karşılaştırmışlardır. Onlar tüm kanat konfigürasyonlarında belirli bir kanat uç hızı oranına kadar C_p değerinin arttığını ve sonra azaldığını bulmuşlardır. Maksimum gücün NACA2415 kanat profili kullanılarak üretilen kanat konfigürasyonu ile 14 m/s rüzgâr hızında elde edildiğini gözlemişlerdir.

Mohamed, Abdellatif ve Osman (2021) 2-10 m/s rüzgâr hızı aralığında NACA0012 ve NACA4418 kanat profillerini kullanarak ürettikleri düz ve bükülmüş dört kanat modelinin aerodinamik performansını ANSYS HAD yazılımı ile karşılaştırmışlardır. Realizable k- ϵ türbülans modeli ile elde edilen sonuçlar, diğer konfigürasyonlara göre NACA0012 profilli kullanarak oluşturulan düz kanat konfigürasyonu ile en yüksek C_p değerinin elde edildiğini göstermiştir. Bu kanat konfigürasyonu tasarım basitliği ve maliyet açısından en uygun kanat modeli olduğunu belirlemişlerdir.

Keerthana ve diğerleri (2012) NACA 4418 kanat profili kullanılarak BEM teorisi ile kanat konfigürasyonu elde etmişlerdir. Kanat tasarımında NACA 4418 kanat profili için en yüksek C_L/C_D değerini $6,5^\circ$ hücum açısını elde etmişler ve bu açıda elde edilen C_L kaldırma katsayısını referans alarak 225 mm uzunluğunda kanat elde etmişlerdir. 4-12 m/s rüzgâr hızı aralığında ve 6 kanat uç hız oranında k- ω SST türbülans modeli ile tork ve gücü hesaplamışlar ve teorik yöntem ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğunu gözlemişlerdir.

Krogstad ve Lund (2012) 0,9 m kanat yarıçapında, 0-12 kanat uç hız oranında (λ) S826 kanat profili ile oluşturulan üç boyutlu modelin aerodinamik özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. k- ϵ RNG ve k- ω SST türbülans modelleri ile hesaplanan C_L ve C_D değerlerini deneysel verilerle karşılaştırılmışlardır. k- ω SST türbülans modeli ölçülen değerlerin deneysel verilerle daha uyumlu olduğunu gözlemlemişler ve maksimum C_p değerini deneysel çalışmada olduğu gibi $\lambda = 5-7$ arasında elde etmişlerdir.

Douvi ve Margaris (2014) Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) Faz 4 rotorunun sayısal analizini gerçekleştirmişlerdir. NREL S809 kanat profilinden oluşan 10,046 m uzunluğa sahip kanat modelini 72 devir/dakika dönme hızında ve 15, 20 ve 25 m/s rüzgâr hızlarında k- ω SST türbülans modeli kullanarak incelemişlerdir. Hesaplama süresini kısaltmak için akış alanı 120° periyodik olarak kurgulamışlar ve akışı tek kanat

üzerinden modellemişlerdir. 15, 20 ve 25 m/s hız değerleri için farklı konumlarda akışa karşı ve akış yönünde eksenel hız dağılımlarını karşılaştırmışlar ve özellikle rotora yakın konumlarda birbirlerinden önemli ölçüde farklılık gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Kody, Alpman ve Yılmaz (2015) 0,4572 m veter uzunluğunda NREL S809 kanat profilini kullanarak 5,029 m rotor yarıçapında 12° pitch açısında bir kanat modeli üretmişlerdir. 7,2 m/s ve 10,56 m/s rüzgâr hızlarında ve 72 devir/dakika dönme hızında ANSYS Fluent programı kullanarak üretilen kanadın aerodinamik performansını incelemişlerdir. Spalart Allmaras, Standart k- ϵ ve k- ω SST türbülans modelleri kullanılarak elde edilen analiz sonuçlarını deneysel çalışma ile karşılaştırmışlar ve 7,2 m/s rüzgâr hızında Spalart Allmaras türbülans modelinin ve 10,56 m/s rüzgâr hızında ise standart k- ϵ türbülans modelinin deneysel çalışmaya daha uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir.

Aşkan ve Tangöz (2018) -4° ile 40° hücum açısı aralığında ve 2×10^5 Reynolds sayısında Boeing 737 serisine ait dört farklı kanat profilinden (b737a-il, b737b-il, b737c-il ve b737d-il) oluşan ve kanat en-boy oranı 0.7-1.3 aralığında değişen 7 farklı türbin kanadını ANSYS Fluent programı ile k- ω SST türbülans modeli kullanarak incelemişlerdir. Sayısal analizi bir deneysel çalışma ile doğrulamışlardır. Onlar en-boy oranındaki artışın C_L kaldırma katsayısı ve C_D sürüklenme katsayısı üzerinde etkili olduğu, en yüksek C_L/C_D oranının 7° hücum açısında 1,3 en-boy oranında elde edildiğini gözlemişlerdir.

Ji ve diğerleri (2022) NREL S809 kanat profili ile oluşturan kanat modelini kullanarak farklı rüzgâr hızlarının (7, 10 ve 20 m/s) yatay eksenli rüzgâr türbininin aerodinamik özelliklerine etkisini ANSYS FLUENT HAD çözücüsü yardımı ile incelemişlerdir. Onlar SST k- ω ve geçiş SST türbülans modelleri ile elde edilen sayısal sonuçları incelediklerinde düşük (7 m/s) rüzgâr hızında türbin kanadının yüzeyinin büyük bir kısmında akış ayrılması olmadığı için deneysel verilerle uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir. Rüzgâr hızı arttıkça türbülans modelinin ölçülen verileri tahmin kabiliyetinin azaldığını gözlemişlerdir. Bu nedenle düşük ve orta rüzgâr (10 m/s) hızlara göre yüksek (20 m/s) rüzgâr hızında kanadın kök kısmında oluşan vorteks hareketinden dolayı kanadın emme yüzeyi yakınlarında akış ayrılmaları ve yeniden birleşmeleri arttığından bu kısımlarda sayısal basınç katsayısı ile deneysel basınç katsayısı arasındaki farkın arttığını belirlemişlerdir.

Eltayesh ve diğ erleri (2022) yatay eksenli bir rüzgâr türbininde kanat sayısının (2-6) aerodinamik parametrelere etkisini farklı kanat uç hızı oranları ($\lambda=0-14$) için deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Kanat modeli ANSYS ICEM HAD yazılımı kullanılarak olu turulmu lardır. SST k- ω türbülans modeli ile elde edilen C_p (g   oranı) değerlerinin deney ile elde edilen C_p değerlerini doğru tahmin ettiğini tespit etmişlerdir. Kanat sayısının artırmanın akış ayrılmalarını ve vorteksleri azaltmasına rağmen C_p değerini d   rd   n  gözlemlemişlerdir. Ayrıcı kanat sayısını 2'den 6'ya çıkarmanın kanat uç hız oranının değişimine daha duyarlı olduğunu ve C_p - λ eğrisini daralttı ını gözlemişlerdir. Diğer kanat konfigürasyonlara göre, üç kanatlı konfigürasyonun kanat uç hızı oranlarındaki değişime daha uyumlu olduğunu ve maksimum C_p değerinin bu konfigürasyon ile ele edildiğini tespit etmişlerdir. Bu nedenle yatay eksenli bir rüzgâr türbininde optimum kanat sayısını 3 olarak belirlemişlerdir.

Literatür araştırması yatay eksenli rüzgâr türbinlerde maksimum verimi elde etmek için kanat tasarım parametrelerinin optimizasyonun yapılması gerektiğini göstermiştir. Kanat sayısı, uç hız oranı, kanat çapı ve kanat şekli gibi parametrelerinin optimum hale getirilmesi ile rüzgâr türbinin aerodinamik performansını iyile tirilebilmektedir. Mevcut literatürde standart kanat profilleri kullanılarak oluşturulan katı kanat modellerinin optimizasyonu ile ilgili üç boyutlu sayısal çalışmaların fazlalığı dikkat çekmektedir. Bu çalışmada ise, önce standart NACA 63-415 kanat profilinin geometrisi değiştirilerek aerodinamik performansı iyile tirilmi , sonra yeni kanat profilleri kullanılarak üretilen kanat modellerinin optimizasyonu yapılmıştır.

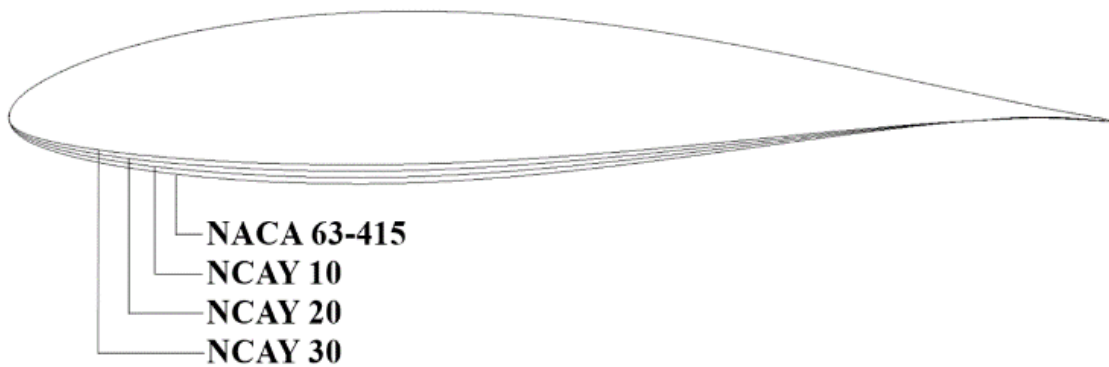
3. MATERYAL VE METOT

Deneysel yöntemlere göre daha ucuz ve hızlı olduğundan dolayı HAD yöntemi ile sistemlerin analizini yapmak günümüzde oldukça fazla tercih edilmektedir. HAD yönteminde kütle, momentum ve enerji korunumu denklemlerinin çözümü sonlu hacimler yöntemi ile yapılmaktadır. Gelişmiş HAD yazılımları ile elde edilen sistemlerin sayısal modelleri sayesinde deneysel verilere yakın sonuçlar elde edilmektedir. HAD yazılımlarıyla yapılan sayısal benzetimler ile sistemlerin tasarım ve çalışma parametrelerini değişiklik yapılabilir. Ayrıca bu yazılımlarla oluşturulan sanal deney ortamı ile sayısal analizden sonra verilere tekrar ulaşıp kullanılabilir. Bu bölümde ilk önce tez çalışmasında üretilen kanat profillerin ve üç boyutlu kanat modellerinin, geometrilerinin ve sayısal ağlarının nasıl oluşturulduğu anlatılacaktır. Sonra sayısal analizlerde kullanılan türbülans modelleri ve sınır koşulları tanıtılacaktır.

3.1. Kanat Profili Tasarımı

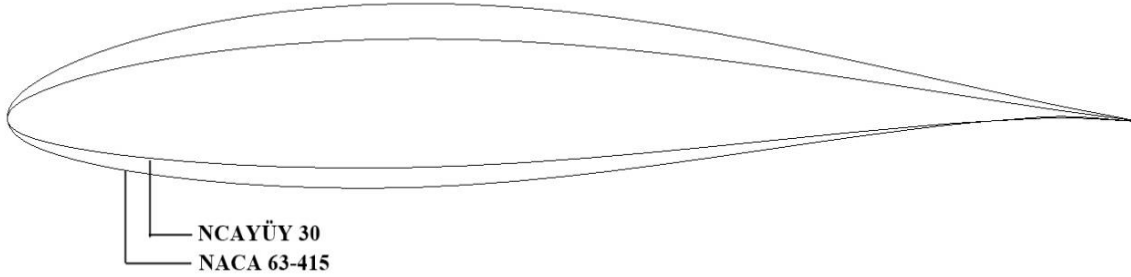
3.1.1. Geometrinin Oluşturulması

Ticari rüzgâr türbinlerinde genellikle NACA serisi kanat profilleri tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında standart NACA 63-415 kanat profilinin alt ve üst yüzeyi değiştirilerek SOLIDWORKS programı yardımıyla yeni kanat profilleri üretilmiştir. Şekil 3.1’de standart NACA 63-415 kanat profilinin alt yüzeyi %10, %20 ve %30 azaltılarak oluşturan sırası ile NCAY 10, NCAY 20 ve NCAY 30 olarak adlandırılan yeni kanat profilleri verilmiştir.



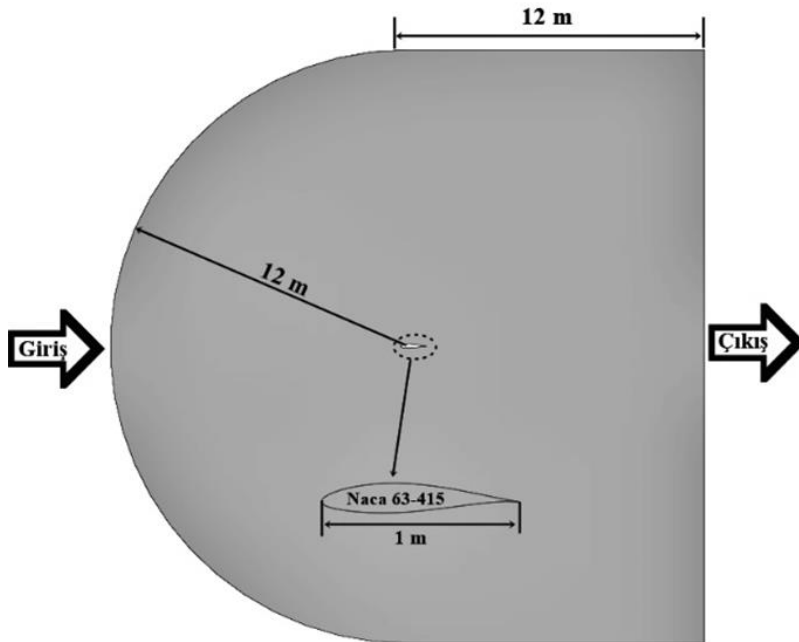
Şekil 3.1. NACA 63-415 kanat profilinin alt yüzeyi değiştirilerek üretilen yeni kanat profilleri

Şekil 3.2’de standart NACA 63-415 kanat profilinin alt ve üst yüzeyi %30 azaltılarak oluşturulan NCAYÜY 30 olarak adlandırılan yeni kanat profilleri verilmiştir.



Şekil 3.2. NACA 63-415 kanat profilinin alt ve üst yüzeyi değiştirilerek üretilen yeni kanat profili

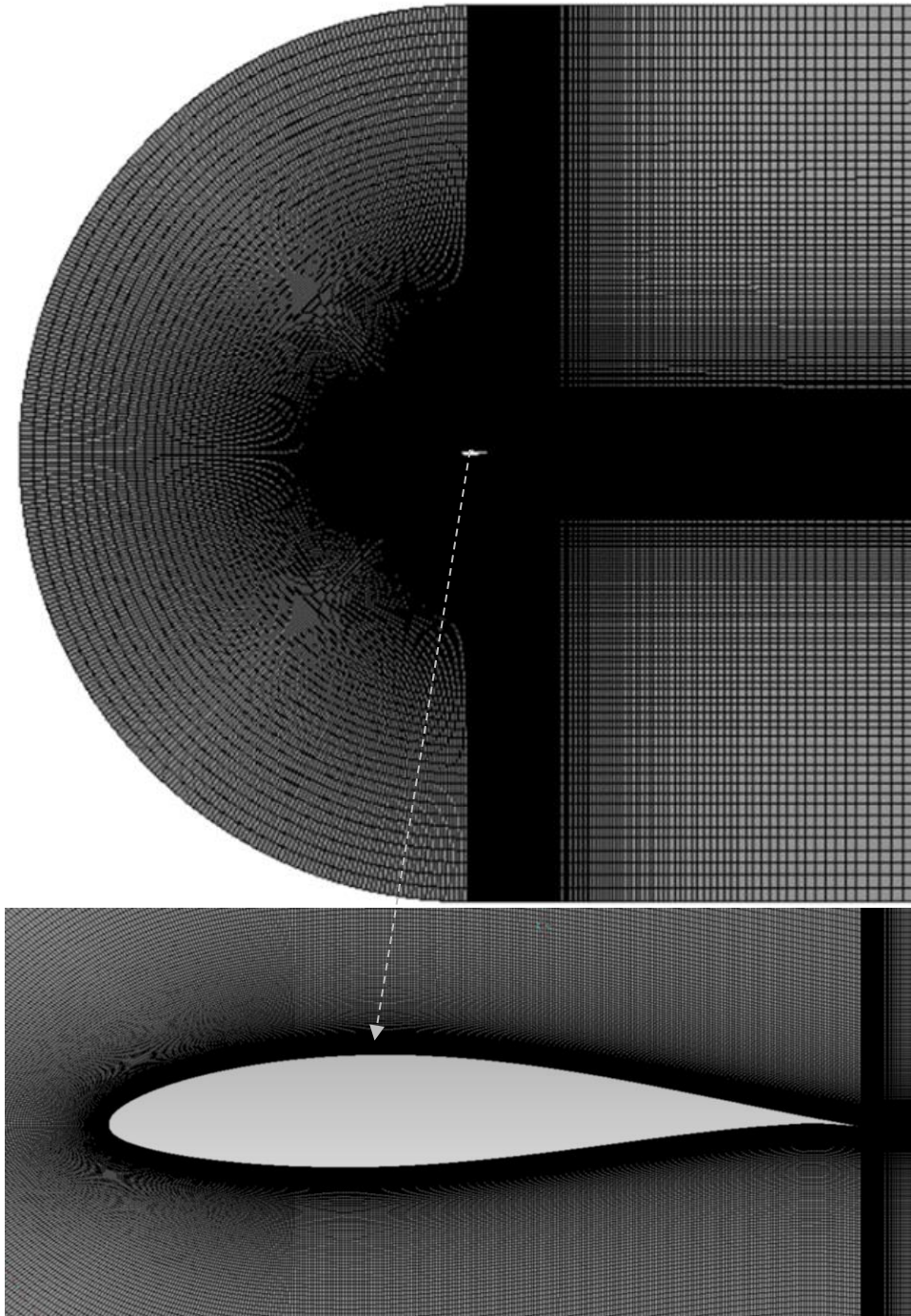
Daha sonra ANSYS Workbench platformunda bulunan Fluid Flow (Fluent) analiz sistemi seçilerek SOLIDWORKS programında üretilen kanat profilleri DesignModeler kısmına aktarılmıştır. Şekil 3.3’te görüldüğü gibi Fluid Flow (Fluent) analiz sisteminin DesignModeler kısmında kanat profillerinin etrafına yarım daire ve dikdörtgenden oluşan akış bölgesi çizilmiştir. NACA 63-415 kanat profilinin etrafındaki akış alanının boyutları, hava girişi ve çıkışı görülmektedir. Tüm kanat profillerinde aynı akış alanı kullanılmıştır.



Şekil 3.3. NACA 63-415 kanat profilinin etrafındaki akış alanı

3.1.2. Sayısal ağın oluşturulması

Fluid Flow (Fluent) analiz sisteminin Meshing (ağ oluşturma) kısmında Şekil 3.4'te görüldüğü gibi akış alanının sayısal ağı oluşturulmuştur. Giriş ve çıkış sınır şartları isimlendirilmiştir. Akış alanının sayısal ağı Şekil 3.4'te görüldüğü gibi dörtgen elemanlardan oluşmaktadır.



Şekil 3.4. Hesaplama bölgesinin ağ yapısı

Kanat profilinin hücum kenarı çevresi ve kuyruk iz bölgesinde yüksek gradyanlar oluşmaktadır. Bu nedenle kanat profilinin sınırlarına yakın kısımlarda akış özelliklerinin daha iyi tahmin edilebilmesi için eleman sayısı artırılırken kanat sınırından uzaklaştıkça sayısal ağ seyrekleştirilmiştir. Hesaplama alanında toplam eleman sayısı 300250'dir.

3.2. Kanat Tasarımı

3.2.1. Geometrinin oluşturulması

Bu çalışmada NACA 63-415 ve yeni üretilen kanat profilleri kullanılarak üç boyutlu kanat geometrileri oluşturulmuştur. Öncelikle türbin kanadının üç boyutlu katı modelinin oluşturulması için gerekli olan geometrik parametreler hesaplanmıştır. Türbin rotorunun göbeğinden r kadar uzaklıktaki belirlenen her bir düzlem veya istasyondaki $c(r)$ kanat profilinin optimum çalışma noktasındaki veter uzunluğu aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır (Üzüm, 2015).

$$c(r) = \frac{1}{z} \cdot \frac{16\pi}{C_L} \cdot r \cdot \sin^2 \left[\frac{1}{3} \cdot \arctan \left(\frac{R}{\lambda_{\text{tasarım}} \cdot r} \right) \right] \quad (3.1)$$

Burada z kanat sayısı, C_L kaldırma kuvveti katsayısı, R kanat yarıçapı ve $\lambda_{\text{tasarım}}$ tasarım kanat uç hız oranıdır. Optimum çalışma noktasında kanadın veter uzunluğunun yanında profil bağlama açısının da bilinmesi gerekmektedir. Optimum bağlama açısı aşağıda verilen denklem ile hesaplanmaktadır (Onat, Kepçeler ve Orgül, 2004).

$$\alpha_b = \frac{2}{3} \arctan \left(\frac{R}{\lambda_{\text{tasarım}} \cdot r} \right) - \alpha_{\text{tasarım}} \quad (3.2)$$

Burada $\alpha_{\text{tasarım}}$ tasarım hücum açısıdır. Çizelge 3.1'de üç boyutlu modellemesi yapılan NACA 63-415 kanat profilin 0° - 20° hücum açısı aralığında C_L , C_D ve C_L/C_D gibi boyutsuz aerodinamik parametrelerinin değerleri verilmiştir. NACA 63-415 kanat profilinin aerodinamik parametrelerinin değerleri incelendiğinde C_L/C_D oranının maksimum değerinin 8° hücum açısında elde edildiği görülmüştür. Bu nedenle 8° hücum açısı tasarım hücum açısı olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 3.1. NACA 63-415 kanat profilinin farklı hücum açıları için aerodinamik parametrelerinin değişimi

Hücum açısı	C_L	C_D	C_L/C_D
0°	0,30546652	0,011259589	27,12945561
2°	0,52553236	0,012098368	43,43828523
4°	0,73658046	0,013514063	54,50473777
6°	0,9326604	0,015596295	59,80012561
8°	1,10611490	0,018492365	59,81468027
10°	1,24654980	0,02258701	55,18879214
12°	1,33813340	0,028912355	46,28240764
14°	1,36173520	0,039854003	34,16809097
16°	1,31509220	0,058229577	22,58460851
18°	1,22088670	0,085414315	14,29370124
20°	1,10436310	0,12372341	8,926064194

NACA 63-415 kanat profilinin aerodinamik değerleri incelendiğinde kaldırma kuvvetinin, sürüklenme kuvvetine oranının (C_L/C_D) maksimum değeri 8° hücum açısında ulaşıldığı için bu açı değeri tasarım hücum açısı olarak kabul edilmiştir. Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak NACA 63-415 kanat profilinin $z=3$, $R=20$ m, $\alpha_{\text{tasarım}}=8^\circ$ için Çizelge 3.1 kullanılarak c veter uzunluğu ve α_b bağlama açısı aşağıda hesaplanmıştır.

$$c(1) = \frac{1}{3} \cdot \frac{16\pi}{1.10611490} \cdot 1 \cdot \sin^2 \left[\frac{1}{3} \cdot \arctan \left(\frac{20}{4.1} \right) \right] = 2,959004531 \quad (3.3)$$

$$\alpha_b = \frac{2}{3} \arctan \left(\frac{20}{4.1} \right) - 8 = 44,46004502 \quad (3.4)$$

$\lambda_{\text{tasarım}} = 4$, $\alpha_{\text{tasarım}} = 8^\circ$, $z = 3$, $R = 20$ m ve NACA 63-415 kanat profili için Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak türbin kanadı uzunluğu boyunca 1 m aralıklarla hesaplanan optimum veter uzunluğu ve bağlama açısı değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=4$) kanat modeli için optimum bağlama açısı ve veter uzunluğu değerleri

NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}} = 4$)				
İstasyon	r (m)	Bağlama Açısı (°)	Veter Uzunluğu (m)	Profil Tipi
Ön Düzlem	0	0	1	Dairesel
Düzlem 1	1	44,46004502	2,959004531	NACA 63-415
Düzlem 2	2	37,46572701	4,524093196	NACA 63-415
Düzlem 3	3	31,35749565	5,153171159	NACA 63-415
Düzlem 4	4	26,22679450	5,246649431	NACA 63-415
Düzlem 5	5	22,00	5,073536902	NACA 63-415
Düzlem 6	6	18,53704739	4,787645980	NACA 63-415
Düzlem 7	7	15,69178519	4,468274342	NACA 63-415
Düzlem 8	8	13,33692214	4,153094112	NACA 63-415
Düzlem 9	9	11,36973607	3,858271952	NACA 63-415
Düzlem 10	10	9,710034118	3,589395934	NACA 63-415
Düzlem 11	11	8,295969854	3,347083851	NACA 63-415
Düzlem 12	12	7,079909965	3,129776972	NACA 63-415
Düzlem 13	13	6,025007350	2,935100948	NACA 63-415
Düzlem 14	14	5,102549372	2,760509689	NACA 63-415
Düzlem 15	15	4,289965882	2,603573871	NACA 63-415
Düzlem 16	16	3,569349758	2,462095306	NACA 63-415
Düzlem 17	17	2,926360223	2,334137803	NACA 63-415
Düzlem 18	18	2,349407331	2,218019768	NACA 63-415
Düzlem 19	19	1,829041891	2,112290951	NACA 63-415
Düzlem 20	20	1,357495645	2,015704278	NACA 63-415

$\lambda_{\text{tasarım}} = 5$, $\alpha_{\text{tasarım}} = 8^\circ$, $z = 3$, $R = 20$ m ve NACA 63-415 kanat profili için Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak türbin kanadı uzunluğu boyunca 1 m aralıklarla hesaplanan optimum veter uzunluğu ve bağlama açısı değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=5$) kanat modeli için optimum bağlama açısı ve veter uzunluğu değerleri

NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}} = 5$)				
İstasyon	r (m)	Bağlama Açısı (°)	Veter Uzunluğu (m)	Profil Tipi
Ön Düzlem	0	0	1	Dairesel
Düzlem 1	1	42,64250435	2,770849908	NACA 63-415
Düzlem 2	2	34,28996588	3,942219965	NACA 63-415
Düzlem 3	3	27,42006824	4,205210407	NACA 63-415
Düzlem 4	4	22,0	4,058829522	NACA 63-415
Düzlem 5	5	17,7732055	3,767163732	NACA 63-415
Düzlem 6	6	14,46004502	3,447046351	NACA 63-415
Düzlem 7	7	11,82992086	3,143718582	NACA 63-415
Düzlem 8	8	9,710034118	2,871516747	NACA 63-415
Düzlem 9	9	7,974992650	2,632398720	NACA 63-415
Düzlem 10	10	6,534272991	2,423815801	NACA 63-415
Düzlem 11	11	5,322071015	2,241928702	NACA 63-415
Düzlem 12	12	4,289965882	2,082859097	NACA 63-415
Düzlem 13	13	3,401819313	1,943126577	NACA 63-415
Düzlem 14	14	2,630263934	1,819755674	NACA 63-415
Düzlem 15	15	1,954278119	1,710256455	NACA 63-415
Düzlem 16	16	1,357495645	1,612563422	NACA 63-415
Düzlem 17	17	0,827013277	1,524966939	NACA 63-415
Düzlem 18	18	0,352538473	1,446050031	NACA 63-415
Düzlem 19	19	-0,074227974	1,374634411	NACA 63-415
Düzlem 20	20	-0,460045017	1,30973599	NACA 63-415

$\lambda_{\text{tasarım}} = 6$, $\alpha_{\text{tasarım}} = 8^\circ$, $z = 3$, $R = 20$ m ve NACA 63-415 kanat profili için Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak türbin kanadı uzunluğu boyunca 1 m aralıklarla hesaplanan optimum veter uzunluğu ve bağlama açısı değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=6$) kanat modeli için optimum bağlama açısı ve veter uzunluğu değerleri

NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}} = 6$)				
İstasyon	r (m)	Bağlama Açısı (°)	Veter Uzunluğu (m)	Profil Tipi
Ön Düzlem	0	0	1	Dairesel
Düzlem 1	1	40,86717051	2,591729007	NACA 63-415
Düzlem 2	2	31,35749565	3,43544744	NACA 63-415
Düzlem 3	3	24,00852500	3,454387731	NACA 63-415
Düzlem 4	4	18,53704739	3,191763987	NACA 63-415
Düzlem 5	5	14,46004502	2,872538626	NACA 63-415
Düzlem 6	6	11,36973607	2,572181302	NACA 63-415
Düzlem 7	7	8,975563375	2,309991001	NACA 63-415
Düzlem 8	8	7,079909965	2,086517981	NACA 63-415
Düzlem 9	9	5,548757886	1,896967464	NACA 63-415
Düzlem 10	10	4,289965882	1,735715914	NACA 63-415
Düzlem 11	11	3,238932512	1,597691506	NACA 63-415
Düzlem 12	12	2,349407331	1,478679845	NACA 63-415
Düzlem 13	13	1,587596394	1,375283754	NACA 63-415
Düzlem 14	14	0,928331836	1,284791897	NACA 63-415
Düzlem 15	15	0,352538473	1,205041692	NACA 63-415
Düzlem 16	16	-0,154474045	1,134301546	NACA 63-415
Düzlem 17	17	-0,604184659	1,07117651	NACA 63-415
Düzlem 18	18	-1,005681992	1,014534841	NACA 63-415
Düzlem 19	19	-1,366248875	0,963451478	NACA 63-415
Düzlem 20	20	-1,691785195	0,917164628	NACA 63-415

$\lambda_{\text{tasarım}} = 7$, $\alpha_{\text{tasarım}} = 8^\circ$, $z = 3$, $R = 20$ m ve NACA 63-415 kanat profili için Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak türbin kanadı uzunluğu boyunca 1 m aralıklarla hesaplanan optimum veter uzunluğu ve bağlama açısı değerleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=7$) kanat modeli için optimum bağlama açısı ve veter uzunluğu değerleri

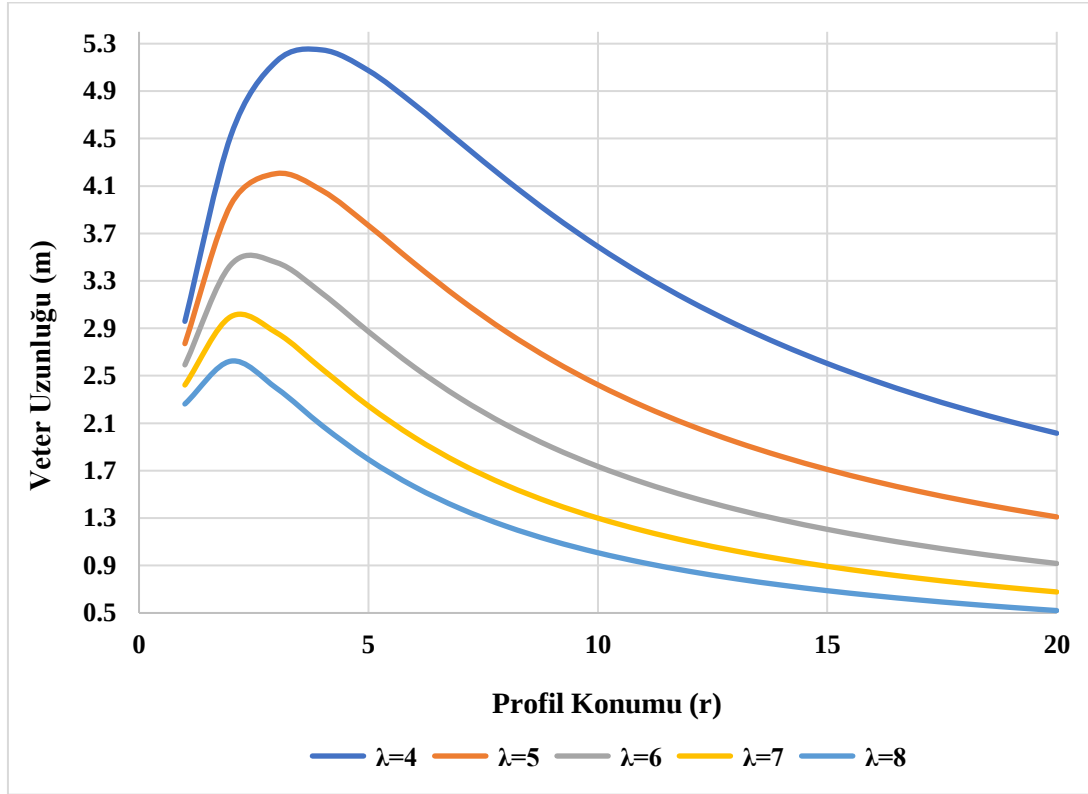
NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}} = 7$)				
İstasyon	r (m)	Bağlama Açısı (°)	Veter Uzunluğu (m)	Profil Tipi
Ön Düzlem	0	0	1	Dairesel
Düzlem 1	1	39,13996919	2,422053143	NACA 63-415
Düzlem 2	2	28,67198653	2,998229919	NACA 63-415
Düzlem 3	3	21,06854598	2,862038347	NACA 63-415
Düzlem 4	4	15,69178519	2,553299624	NACA 63-415
Düzlem 5	5	11,82992086	2,245513273	NACA 63-415
Düzlem 6	6	8,975563375	1,979992286	NACA 63-415
Düzlem 7	7	6,802319021	1,759477671	NACA 63-415
Düzlem 8	8	5,102549372	1,577434108	NACA 63-415
Düzlem 9	9	3,741718562	1,426357831	NACA 63-415
Düzlem 10	10	2,630263934	1,299825481	NACA 63-415
Düzlem 11	11	1,706850413	1,192761065	NACA 63-415
Düzlem 12	12	0,928331836	1,101250198	NACA 63-415
Düzlem 13	13	0,263604556	1,022286314	NACA 63-415
Düzlem 14	14	-0,310252898	0,953549522	NACA 63-415
Düzlem 15	15	-0,810468088	0,893234872	NACA 63-415
Düzlem 16	16	-1,250218896	0,839924277	NACA 63-415
Düzlem 17	17	-1,639745463	0,792492205	NACA 63-415
Düzlem 18	18	-1,987118379	0,750036314	NACA 63-415
Düzlem 19	19	-2,298779844	0,711826183	NACA 63-415
Düzlem 20	20	-2,579931764	0,677265127	NACA 63-415

$\lambda_{\text{tasarım}} = 8$, $\alpha_{\text{tasarım}} = 8^\circ$, $z = 3$, $R = 20$ m ve NACA 63-415 kanat profili için Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak türbin kanadı uzunluğu boyunca 1 m aralıklarla hesaplanan optimum veter uzunluğu ve bağlama açısı değerleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.

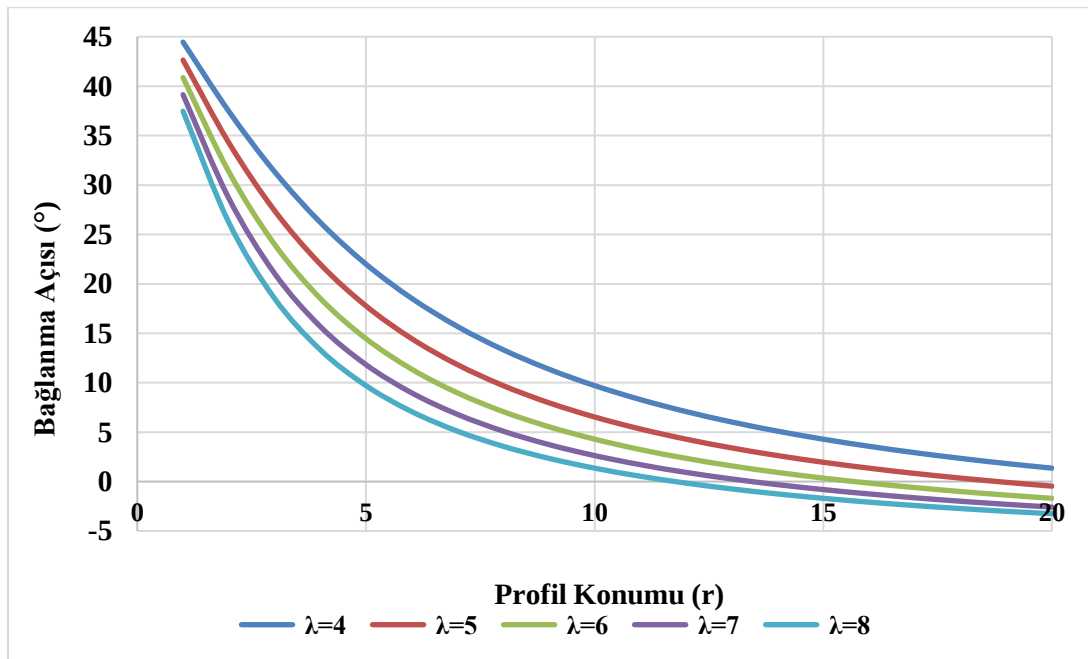
Çizelge 3.6. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=8$) kanat modeli için optimum bağlama açısı ve veter uzunluğu değerleri

NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}} = 8$)				
İstasyon	r (m)	Bağlama Açısı ($^\circ$)	Veter Uzunluğu (m)	Profil Tipi
Ön Düzlem	0	0	1	Dairesel
Düzlem 1	1	37,46572701	2,262046598	NACA 63-415
Düzlem 2	2	26,22679450	2,623324716	NACA 63-415
Düzlem 3	3	18,53704739	2,393822990	NACA 63-415
Düzlem 4	4	13,33692214	2,076547056	NACA 63-415
Düzlem 5	5	9,710034118	1,794697967	NACA 63-415
Düzlem 6	6	7,079909965	1,564888486	NACA 63-415
Düzlem 7	7	5,102549372	1,380254844	NACA 63-415
Düzlem 8	8	3,569349758	1,231047653	NACA 63-415
Düzlem 9	9	2,349407331	1,109009884	NACA 63-415
Düzlem 10	10	1,357495645	1,007852139	NACA 63-415
Düzlem 11	11	0,536177377	0,922909651	NACA 63-415
Düzlem 12	12	-0,154474045	0,850726160	NACA 63-415
Düzlem 13	13	-0,742981964	0,788718786	NACA 63-415
Düzlem 14	14	-1,250218896	0,734933742	NACA 63-415
Düzlem 15	15	-1,691785195	0,687873471	NACA 63-415
Düzlem 16	16	-2,079560566	0,646374939	NACA 63-415
Düzlem 17	17	-2,422742584	0,609523495	NACA 63-415
Düzlem 18	18	-2,728558198	0,576591278	NACA 63-415
Düzlem 19	19	-3,002761574	0,546992686	NACA 63-415
Düzlem 20	20	-3,249989101	0,520251756	NACA 63-415

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 kullanarak hesaplanan bağlanma açısı ve veter uzunluklarının profil konumuna göre değişimleri gösterilmiştir.

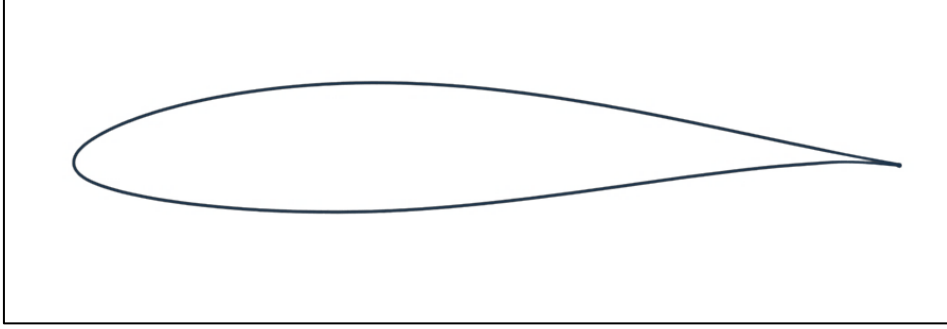


Şekil 3.5. Veter uzunluğunun profil konumuna göre değişimi



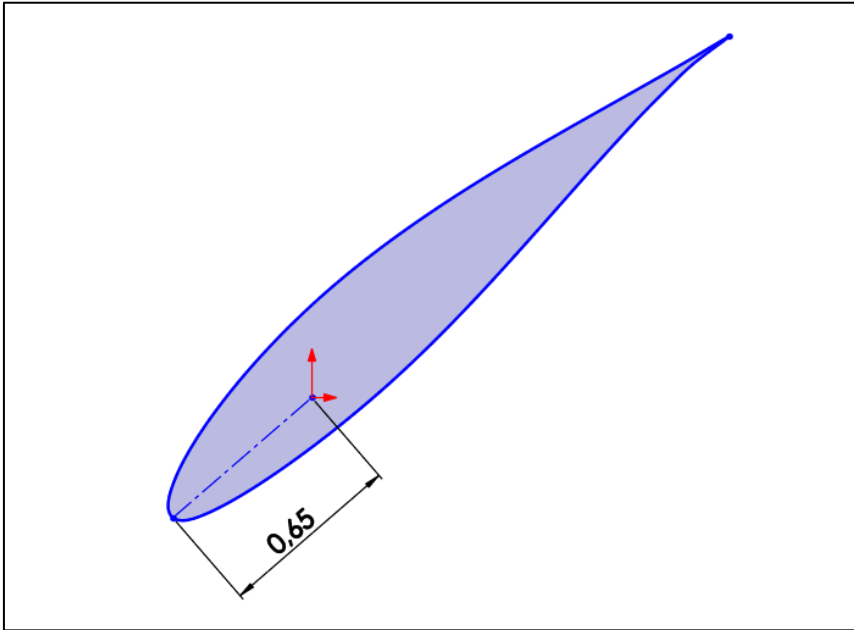
Şekil 3.6. Profil bağlanma açısının profil konumuna göre değişimi

Optimum bağlama açısı ve veter uzunlukları bulunduğundan sonra Şekil 3.7’de görülen NACA 63-415 kanat profilinin SOLIDWORKS programı kullanılarak üç boyutlu türbin kanadı modeli oluşturulmuştur.



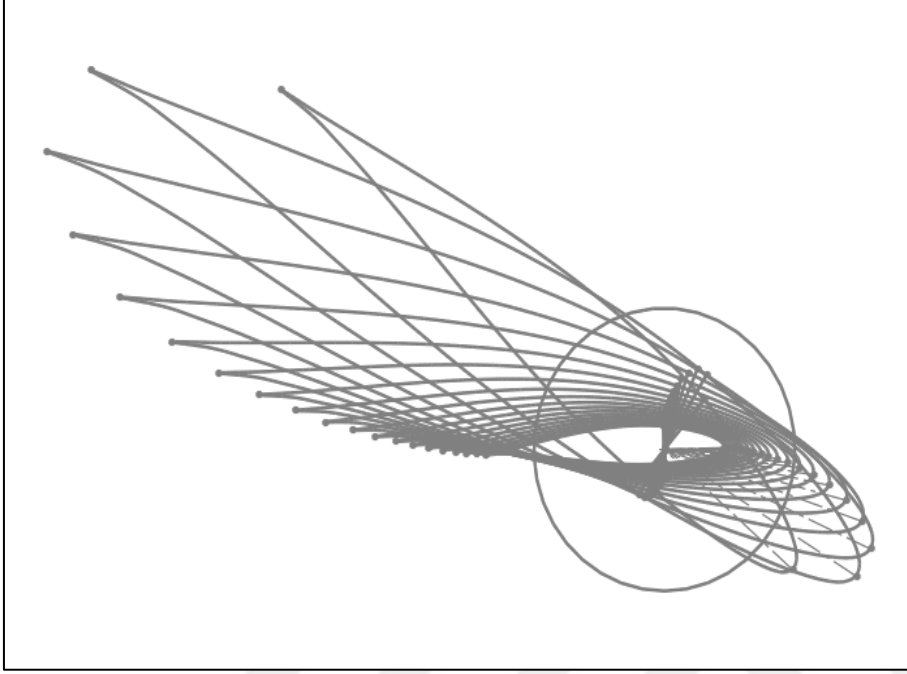
Şekil 3.7. NACA 63-415 kanat profili

İlk önce kanat merkezinden r kadar uzaklıklara göre düzlemler oluşturulmuştur ve kanat profilleri hesaplanan veter uzunlukları kullanarak düzlemlere çizilmiştir. SOLIDWORKS programında kıvrık kanat çizebilmek için düzlemlere çizilen profillerin belirlenen nokta etrafında döndürülmesi gerekir. Düzlemler üzerindeki bu noktalar birleştirilmesi ile oluşan eksene bükme eksenini denir. Bu çalışmada bükme eksenini noktası Şekil 3.8’de görüldüğü gibi NACA 63-415 kanat profilinin veter uzunluğunun %25’i olarak belirlenmiştir.



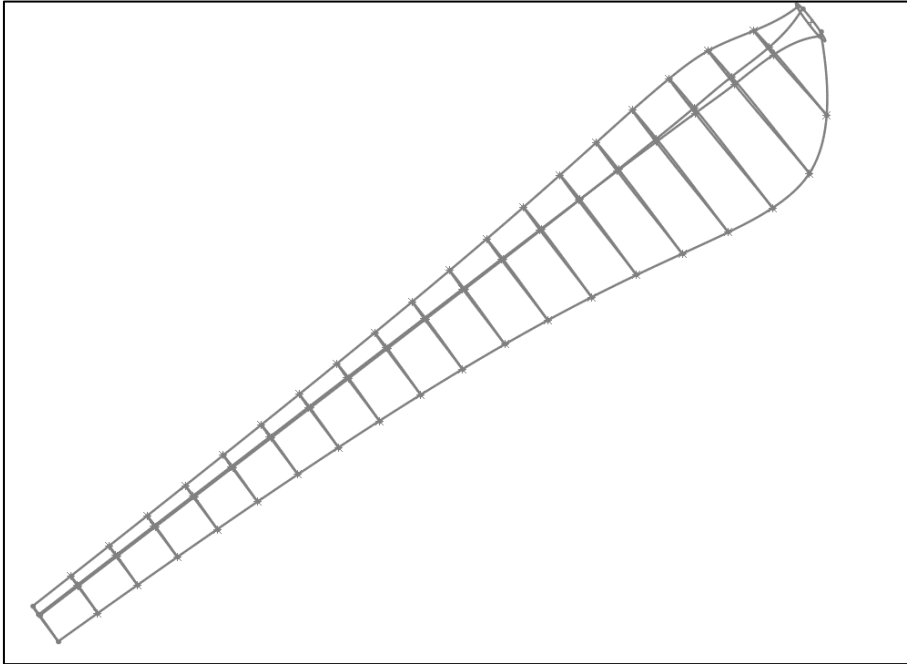
Şekil 3.8. NACA 63-415 kanat profilinin dönme eksenini noktası

Belirlenen bu nokta üzerinden hesaplanan bağlanma açısı değerleri doğrultusunda düzlemlerdeki profiller Şekil 3.9'daki gibi döndürülür.



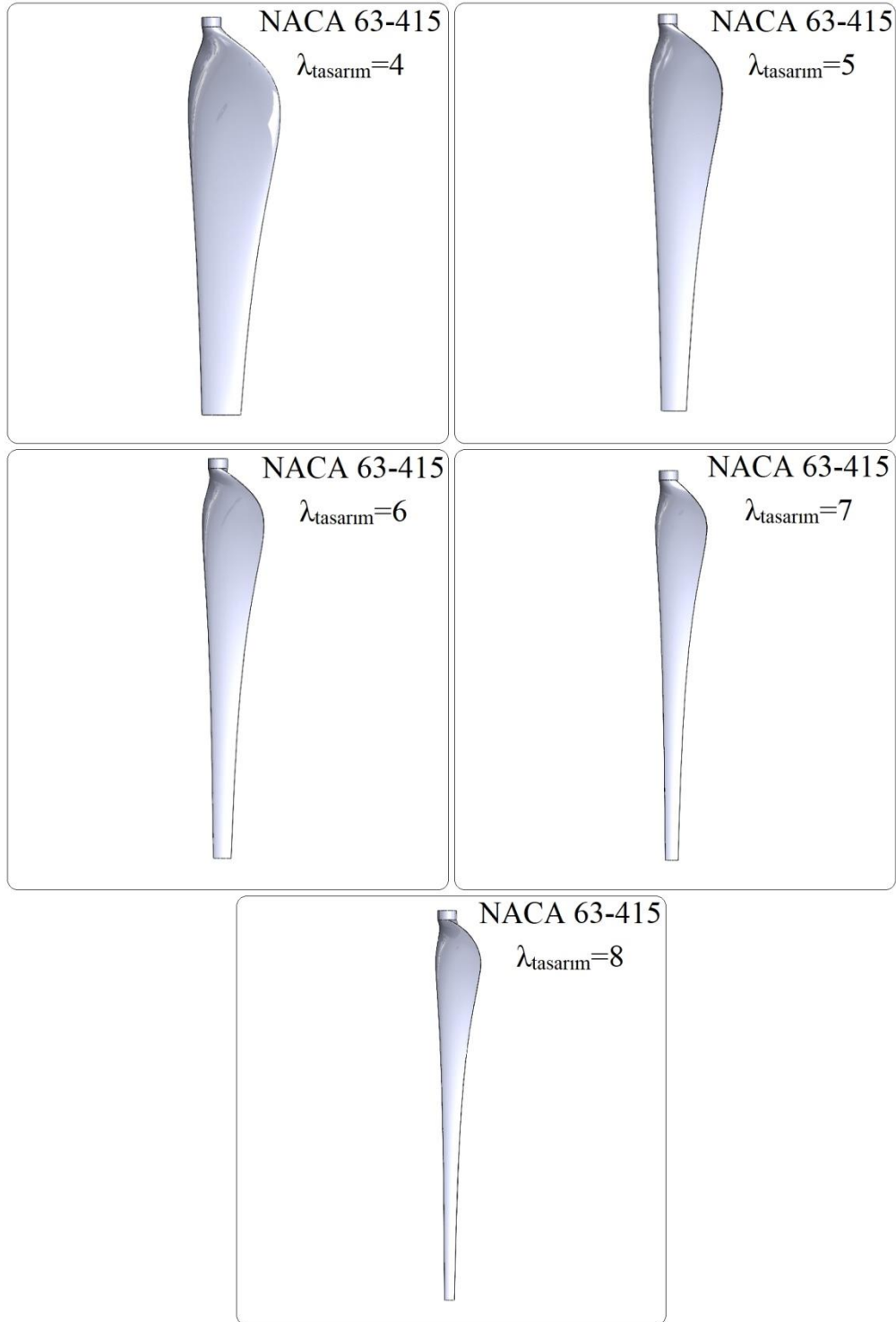
Şekil 3.9. Kanat Profillerinin Döndürülmesi

Daha sonra Şekil 3.10'da görüldüğü gibi kılavuz eğrileri çizilmiştir



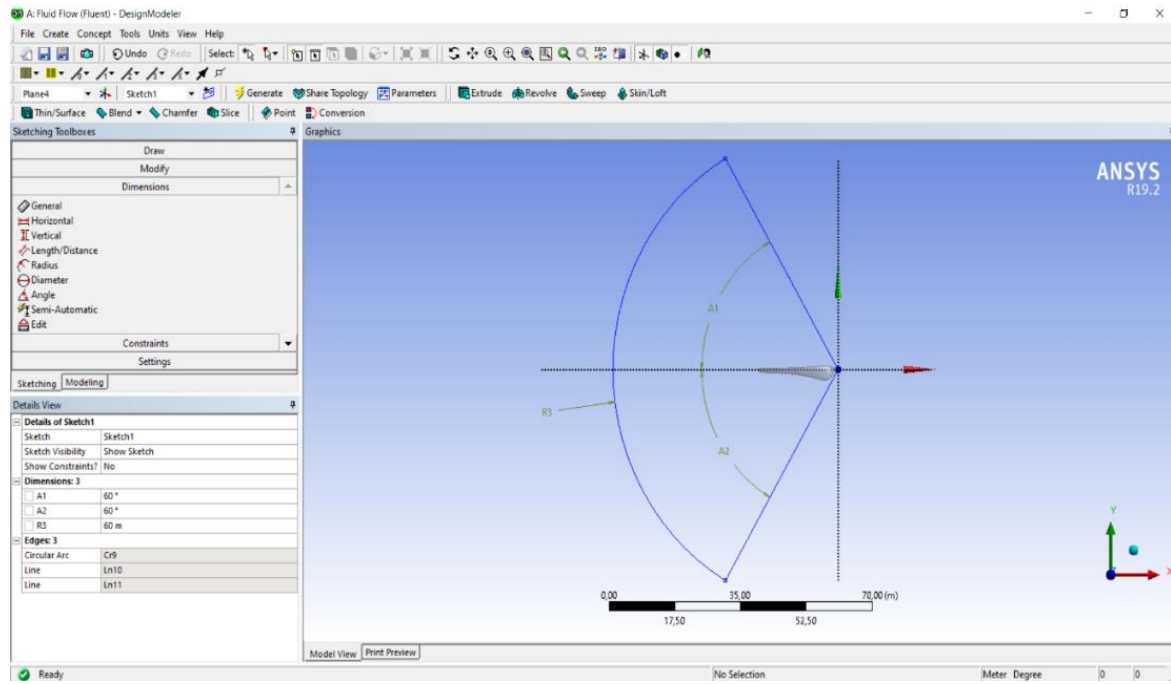
Şekil 3.10. Kanat kılavuz eğrileri

Loft komutu kullanılarak sırası ile profiller seçilmiştir. Böylece başlangıç ve bitiş profillerinin arası doldurularak NACA 63-415 kanat profilinin katı kanat modeli oluşturulmuştur. Şekil 3.11’de farklı tasarım kanat uç hız oranları kullanılarak oluşturulan NACA 63-415 kanat modelleri görülmektedir.



Şekil 3.11. Farklı tasarım uç hız oranlarında oluşturulan NACA 63-415 kanat modelleri

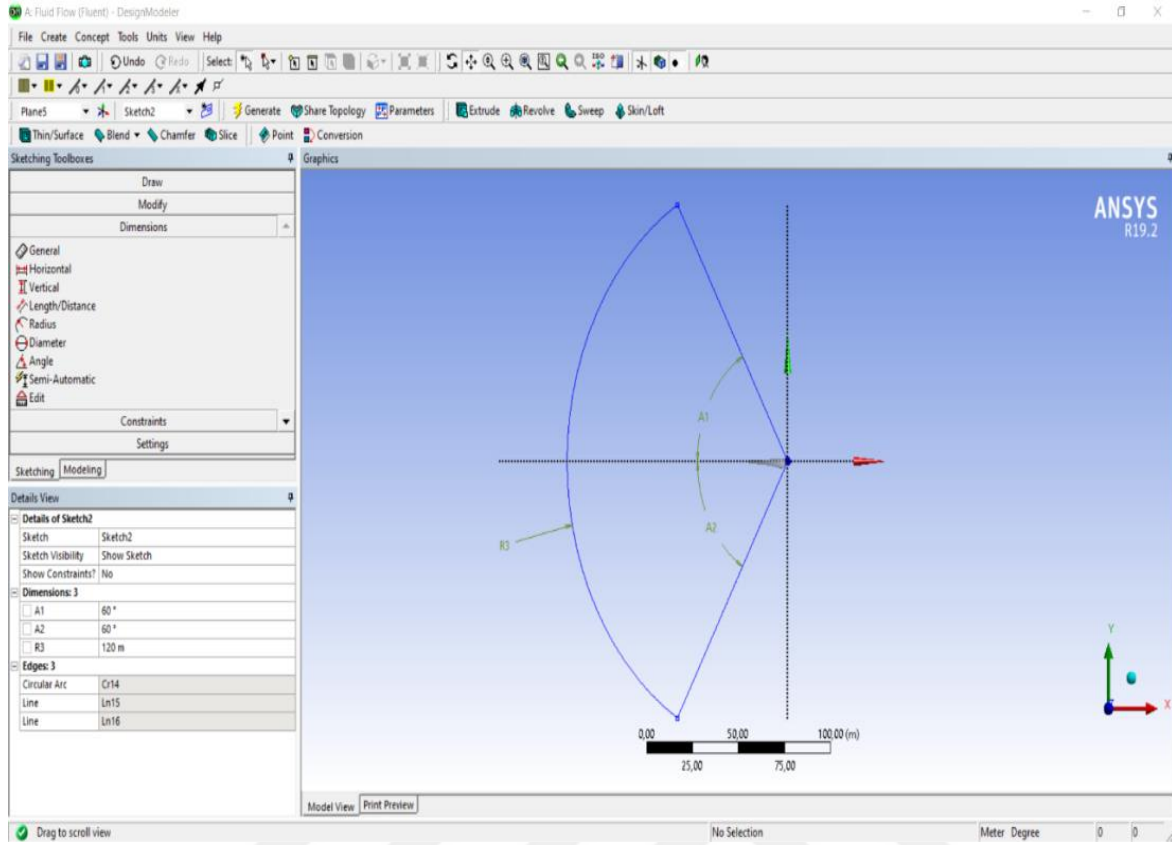
SOLIDWORKS programında çizilen kanat modeli ANSYS Workbench platformunda bulunan Fluid Flow (Fluent) analiz sisteminin DesignModeler kısmına aktarılarak kanat etrafına akış alanı oluşturulmuştur. Akış alanı hesaplama zamanını azaltmak için tüm süpürme alanı yerine 120° 'lik kısmı periyodik olarak kurgulanmıştır. Hava akışı z ekseninde olacağı için kanadın ön kısmına kanattan 60 metre uzakta yeni bir XY düzlemi oluşturulmuştur. Hava girişi için bu düzleme Şekil 3.12'de görüldüğü gibi kanat merkezinden 60 metre çapında ve 120° açılık bir yay çizilmiştir.



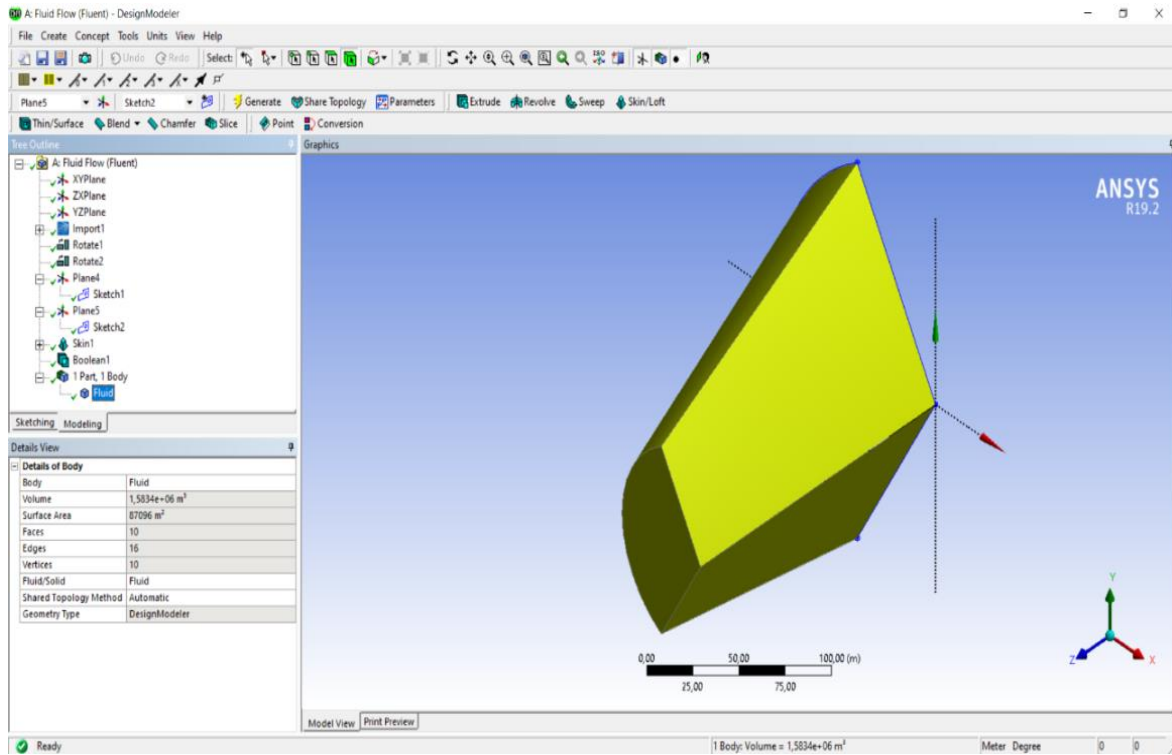
Şekil 3.12. Hava girişi kısmı

Arka tarafa ise kanadın 120 metre gerisinde yeni bir XY düzlemi oluşturulmuştur. Hava çıkışı için bu düzleme Şekil 3.13'te görüldüğü gibi kanat merkezinden 120° açılık ve 120 metre çapında bir yay çizilmiştir.

İki düzlemde oluşturulan yaylar kullanılarak Skin/Loft komutu ile türbin kanadının etrafındaki akış için kontrol hacmi oluşturulmuştur. Sonra kontrol hacmi akışkan olarak seçilip Boolean operatörü ile kontrol hacminden kanat geometrisi çıkarılmıştır. Böylece Şekil 3.14'te görüldüğü sadece akışkanın olduğu kontrol hacmi oluşturulmuştur.



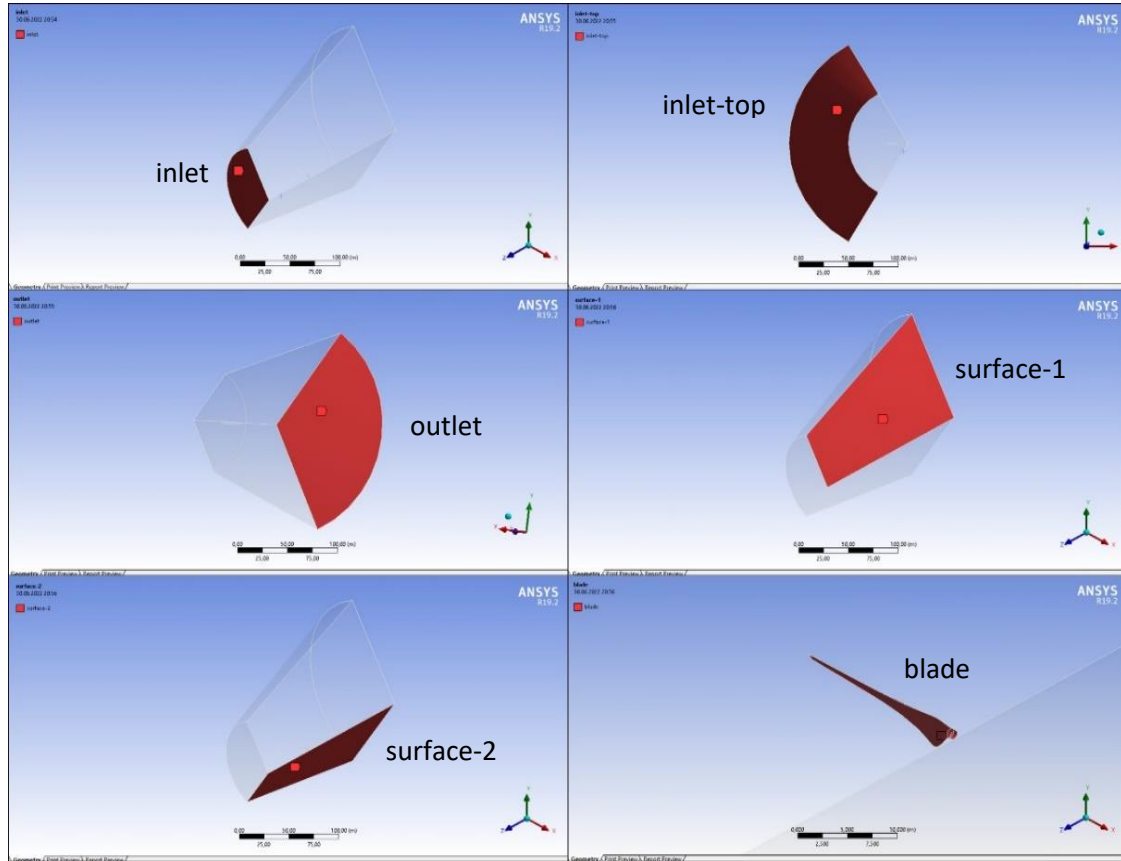
Şekil 3.13. Hava çıkışı kısmı



Şekil 3.14. Akış hacmi

3.2.2. Sayısal ağı oluşturulması

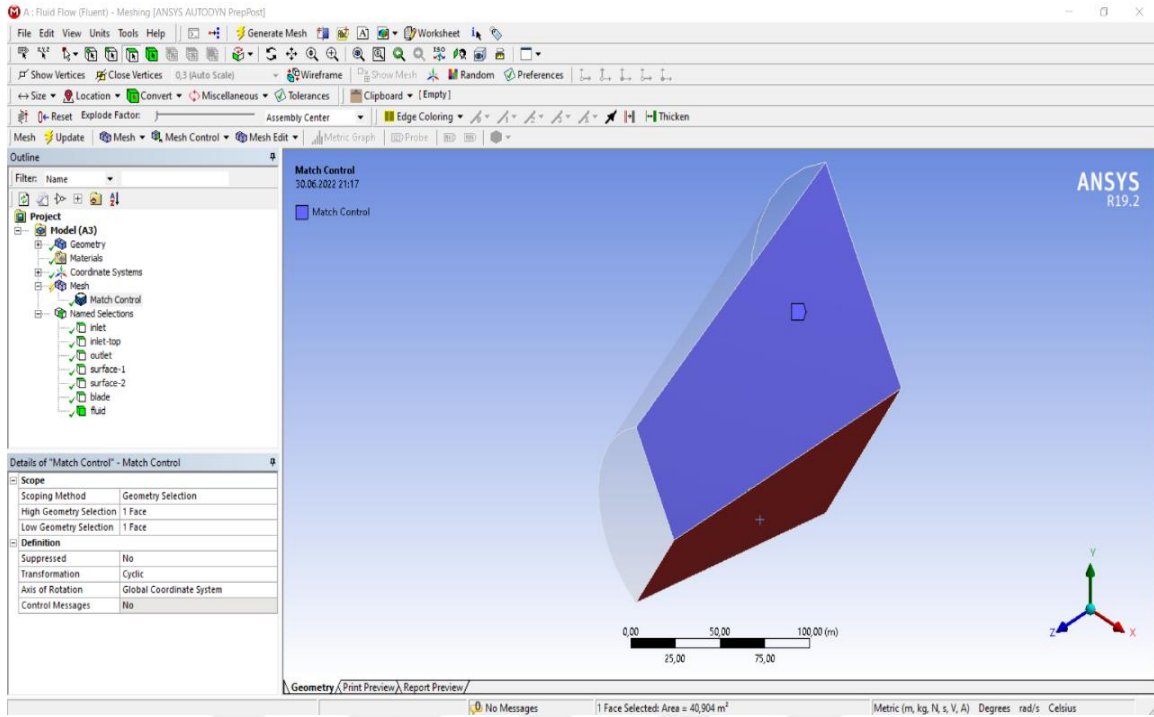
ANSYS Workbench platformunun Fluid Flow (Fluent) analiz sisteminin Meshing (ağ oluşturma) kısmında Şekil 3.15'te görüldüğü gibi giriş sınır koşulu (inlet), çıkış sınır koşulu (outlet), rüzgâr türbin kanadı (blade), kontrol hacmin iç yüzeyleri (surface-1 ve surface-2) ve kontrol hacmin dış yüzeyi (inlet-top) olarak isimlendirilmiştir.



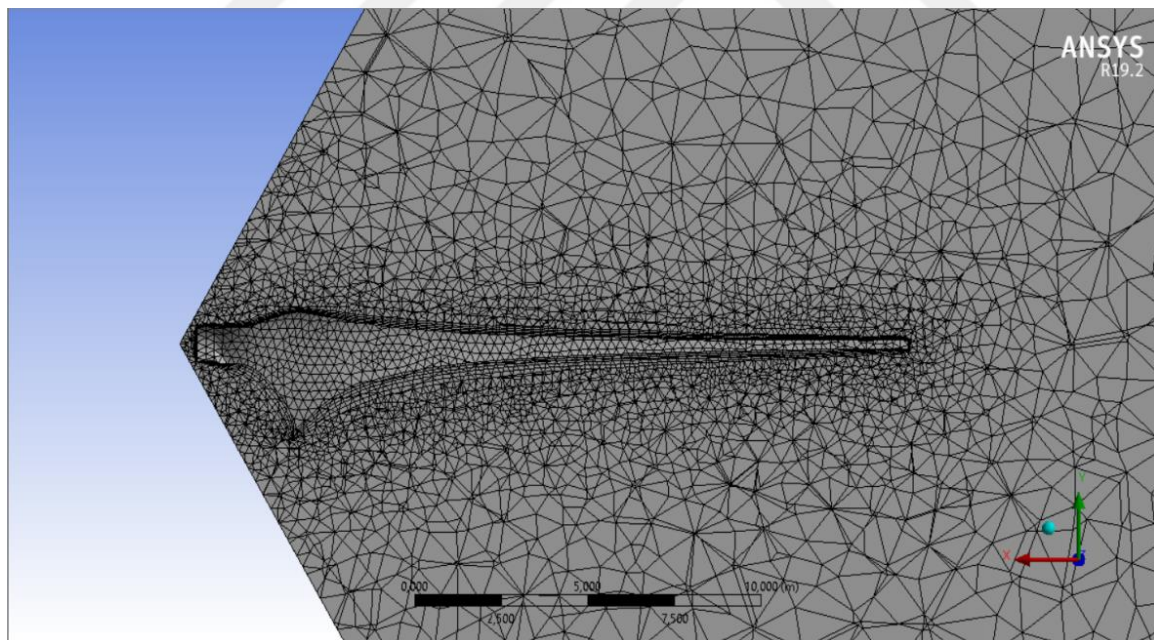
Şekil 3.15. Geometri yüzeylerinin isimlendirilmesi

Surface-1 ve surface-2 yüzeylerinin aynı ağ yapısına sahip olması için Şekil 3.16'da görüldüğü gibi Match Control (Eşleştirme Kontrolü) komutu kullanılmıştır. High geometry için Surface-1 yüzeyi ve Low geometry için Surface-2 yüzeyi seçilmiştir ve yüzeylere cyclic (daireysel) olarak tamamen aynı tip sayısal ağ yapılmıştır.

Ardından türbin kanadının (blade) yüzeyine Face Sizing uygulanarak eleman büyüklüğü 0,2 m olan Şekil 3.17'de görüldüğü gibi yüzey sayısal ağı oluşturulmuştur. Face sizing kullanılırken davranış “hard” seçilmiştir.

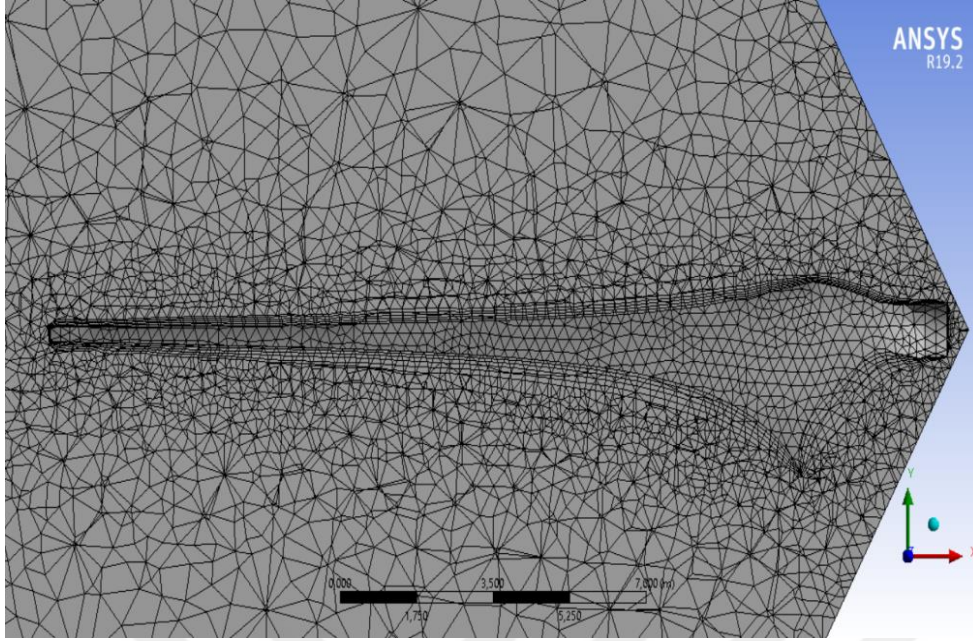


Şekil 3.16. Match control işlemi



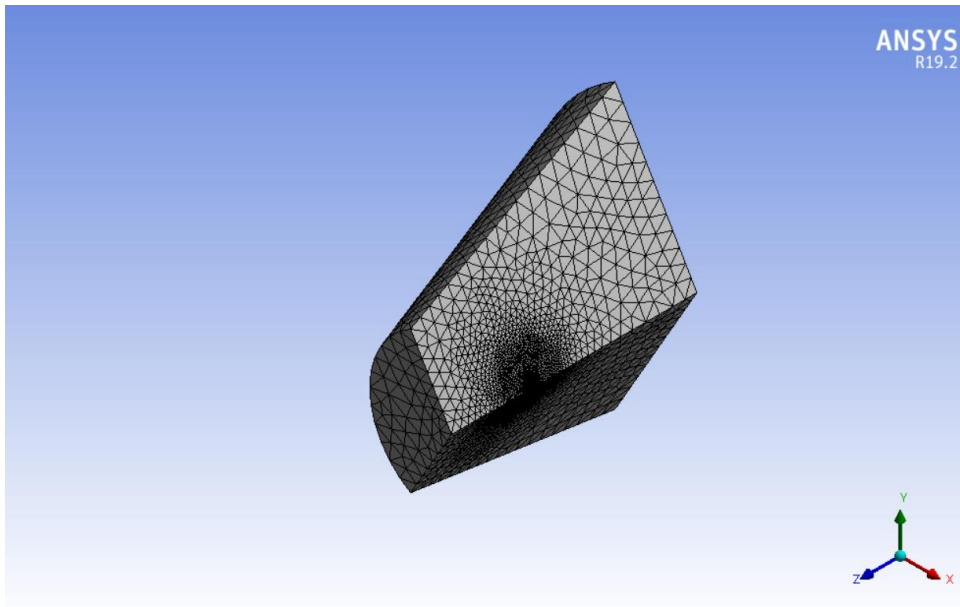
Şekil 3.17. Kanat yüzeyi ve etrafındaki akışın sayısal ağ yapısı

Kanat yüzeyine yakın kısımlarda daha iyi bir sınır tabakası çözümlemesi yapılabilmesi için Şekil 3.18’de görüldüğü gibi inflation komutu uygulanmıştır. “Inflation” oluşturmak için smooth transition yöntemi kullanılmıştır. Maksimum tabaka sayısı 5 ve büyüme oranı (growth rate) 1,2 seçilmiştir.



Şekil 3.18. Kanat yüzeyine yakın kısımlarda inflation komutunun uygulanması

Kanat etrafında sayısal ağın eleman sayısını artırmak için Body Sizing komutu kullanılmıştır. Bu komut ile kanat etrafında eleman sayısı yoğunluğunu artırmak için küre etkisi (Sphere of Influence) uygulanmıştır. Küre yarıçapı 18 m ve eleman boyutu 1,8 seçilmiştir. Son durumda Şekil 3.19’da görüldüğü gibi eleman sayısı 224246 olan çözüm ağı oluşturulmuştur.



Şekil 3.19. Akış hacminin sayısal ağ yapısı

İki boyutlu ve üç boyutlu kanat geometrilerinin ağ yapısı oluşturulduktan sonra Fluid Flow (Fluent) analiz sisteminin Setup kısmında akışkanın (hava) özellikleri, türbülans modeli ve sınır koşulları için parametreler ve analiz için gerekli olan diğer bilgiler girilerek kanat tasarımının aerodinamik performansı hesaplanmıştır. Aşağıda iki boyutlu ve üç boyutlu modellerin ANSYS Fluent programında analizi tanıtılmıştır.

3.3. Çözücü Ayarlarının Girilmesi

Bu çalışmada akış hacminin çözümü için HAD tabanlı çözüm yapan ANSYS FLUENT paket programı kullanılmıştır. Tüm hesaplamalarda çözücü tipi olarak basınç tabanlı çözücü (Pressure-Based Solver) tipi seçilmiştir. Basınç tabanlı çözücü tipi gazların yoğunluk değişiminin (sıkıştırılabilirliğinin) dikkate alınmadığı Mach sayısı 0,3'ün altında olduğu hızlarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada incelenen hız aralığında Mach sayısı 0,3'ün altında olduğu için basınç tabanlı çözücü tipi seçilmiştir. ANSYS FLUENT programında korunum denklemleri sonlu hacim yöntemi ile ayrıklaştırılmıştır ve ayrıklaştırılan denklemler Coupling algoritması kullanılarak çözülmüştür. Gradyanların hesaplamasında hücre tabanlı Least Square yöntemi kullanılmıştır. Kanat tarafındaki akış sürekli, türbülanslı ve sıkıştırılmaz olarak kabul edilmiştir. Havanın yoğunluğu $1,225 \text{ kg/m}^3$, dinamik viskozitesi $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ olarak alınmıştır. Hesaplamalarda yakınsama kriteri iki boyutlu ve üç boyutlu modelde tüm büyüklükler için sırasıyla 10^{-6} ve 10^{-5} alınmıştır.

3.3.1. Türbülans modeli

Kanat profilinin etrafındaki akışın sayısal analizinde Spalarat Almaras ve SST k- ω türbülans modelleri kullanılmıştır. SST k- ω türbülans modeli deneysel verilerle daha uyumlu olduğundan üç boyutlu sayısal çalışmalarda SST k- ω türbülans modeli kullanılmıştır.

Spalart – Allmaras türbülans modeli

Spalart-Allmaras türbülans modeli, kinematik girdap türbülans viskozitesine modellemek için geliştirilen ve tek bir taşıma denklemini sahip olan bir modeldir. Reynolds sayısı düşük olan akışlarla ilgili sistemlerin aerodinamik performans hesaplamalarında

kullanılmaktadır (Spalart ve Allmaras, 1992). Bu modelde türbülans viskozite aşağıda gösterilen tek taşınım denklemi ile çözülmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{v}u_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_{\tilde{v}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2}\rho \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + S_{\tilde{v}} \quad (3.5)$$

Burada G_v türbülans viskozite üretimini göstermektedir. Y_v duvar blokajını ve viskoz sönümlenmesi nedeniyle duvara yakın bölgede oluşan türbülanslı viskozitenin yok olmasını temsil etmektedir. $\sigma_{\tilde{v}}$ ve C_{b2} sabit terimlerdir. $S_{\tilde{v}}$ kullanıcı tanımlı kaynak terimidir.

SST k- ω türbülans modeli

SST (Shear-Stress Transport) k- ω türbülans modeli k- ϵ ve k- ω modellerinin birleşmesi ile oluşmuştur (Menter, 1994). SST k- ω türbülans modelinde k (türbülans kinetik enerji) ve ω (spesifik yayılma oranı) iki ayrı taşınım denklemiyle hesaplanmaktadır. SST k- ω türbülans modeli duvara yakın viskoz bölgede standart k- ω modeli gibi, serbest akış bölgesinde ise k- ϵ türbülans modeli gibi davranmaktadır (Langtry ve Menter, 2009). SST k- ω türbülans modelinin k ve ω taşınım denklemleri sırasıyla denklem 3.6 ve 3.7’de verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial_k}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial_k}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (3.7)$$

Burada, Γ_k ve Γ_ω sırasıyla k ve ω için etkin yayılma gücünü gösterir. G_k ve G_ω ortalama hız gradyanı nedeniyle k ve ω üretimini temsil etmektedir. Y_k ve Y_ω ise sırasıyla türbülans nedeniyle k ve ω ’nın yayılmasını ifade etmektedir. S_k ve S_ω kullanıcı tarafından tanımlanan kaynak terimleridir. D_ω çapraz yayılım terimini göstermektedir. Γ_k ve Γ_ω k- ϵ ile k- ω türbülans modelleri arasında geçişi sağlayan terimlerdir ve aşağıda gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (3.8)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (3.9)$$

Denklem 3.8 ve 3.9’da μ_t türbülans kinematik viskozitedir.

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left(\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega}\right)} \quad (3.10)$$

Burada S gerinim oranı büyüklüğüdür. Denklem 3.4 ve 3.5’te σ_k ve σ_ω aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1/\sigma_{k,1} + (1 - F_1)/\sigma_{k,2}} \quad (3.11)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1 - F_1)/\sigma_{\omega,2}} \quad (3.12)$$

Burada F_1 ve F_2 karıştırma fonksiyonlarıdır.

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0,09^* \omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2} \right] \right]^4 \right\} \quad (3.13)$$

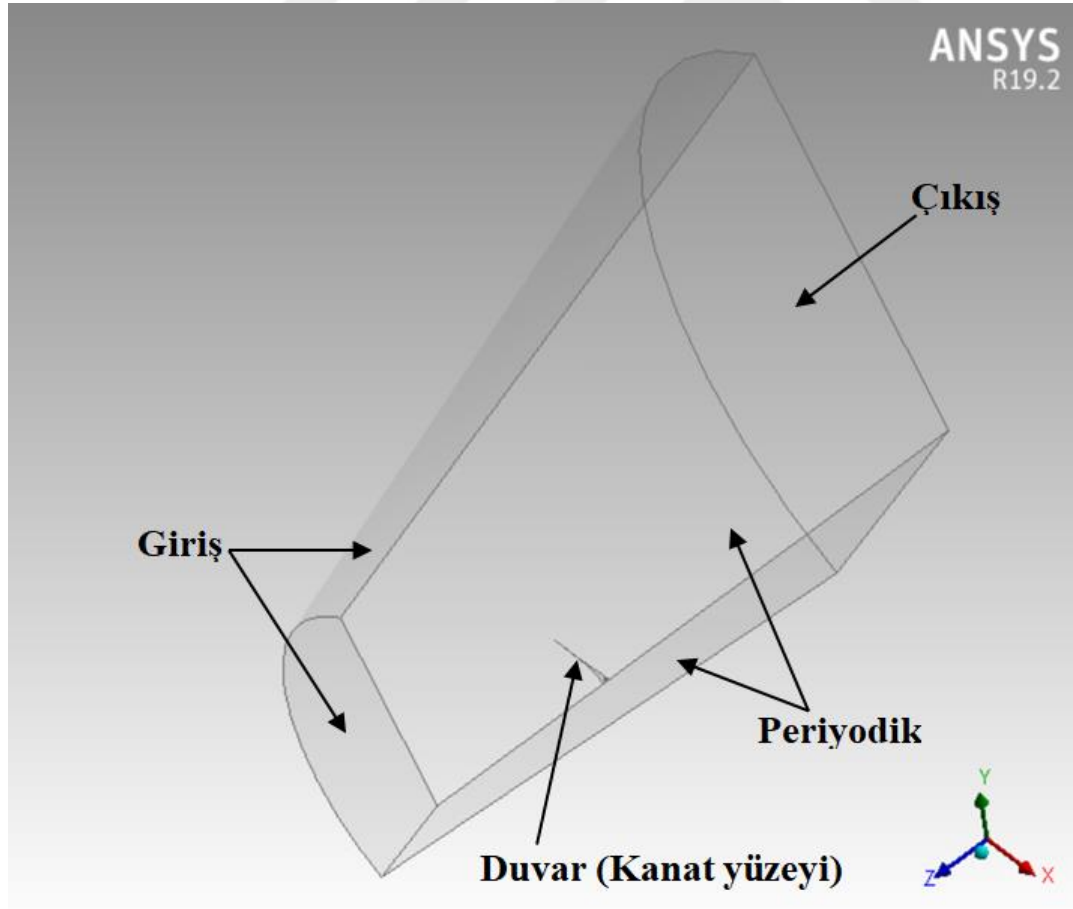
$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{0,09^* \omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (3.14)$$

$$D_\omega^+ = \max \left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \quad (3.15)$$

Burada y yüzey mesafesidir. D_{ω}^+ çapraz yayılım teriminin pozitif kısmıdır. Burada $\sigma_{k1} = 1,176$, $\sigma_{k2} = 1,0$, $\sigma_{\omega 1} = 2,0$ ve $\sigma_{\omega 2} = 1681$ 'dir (Ansys Fluent 19.2, 2018).

3.3.2. Sınır koşulu

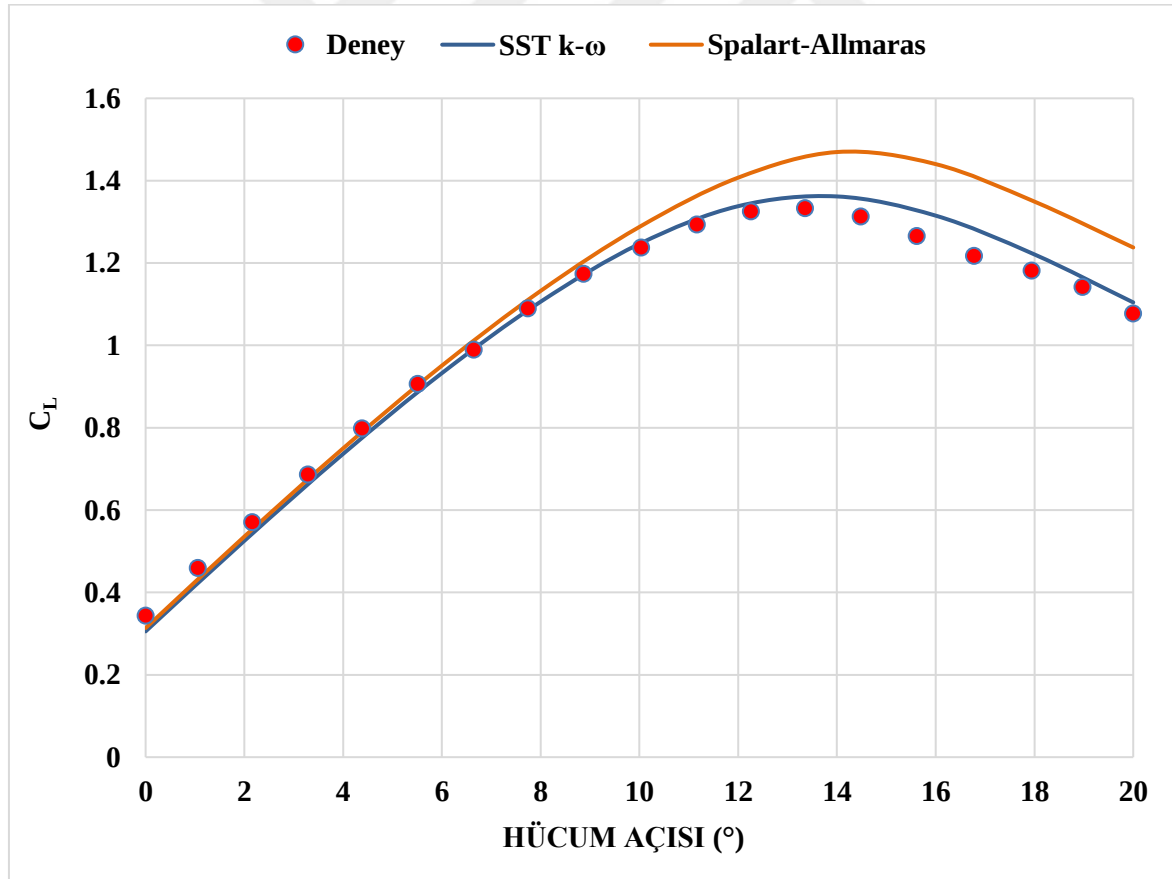
Havanın giriş kısmı hız girişi sınır koşulu olarak belirlenmiştir. İki boyutlu çalışmalarda havanın giriş hızı 23,37 m/s ve Reynolds sayısı $1,6 \times 10^6$ 'dır. Üç boyutlu çalışmalarda havanın giriş hızı 4-16 m/s'dir. Havanın çıkış kısmı tüm hesaplamalarda basınç çıkış sınır koşulu olarak belirlenmiştir. Çıkışta hava basıncı atmosferiktir. Hesaplama süresinin azaltılması için akış döngüsel olarak periyodik kabul edilmiştir. Şekil 20'de periyodik sınır koşulu uygulanan yüzeyler gösterilmiştir. İki boyutlu çalışmada Şekil 3.4'teki kanat profilinin sınırlarına ve Şekil 3.20'deki kanadın yüzeylerine duvar sınır koşulu uygulanmıştır. Hesaplamalarda duvar pürüzsüz olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.20. Sınır koşulları

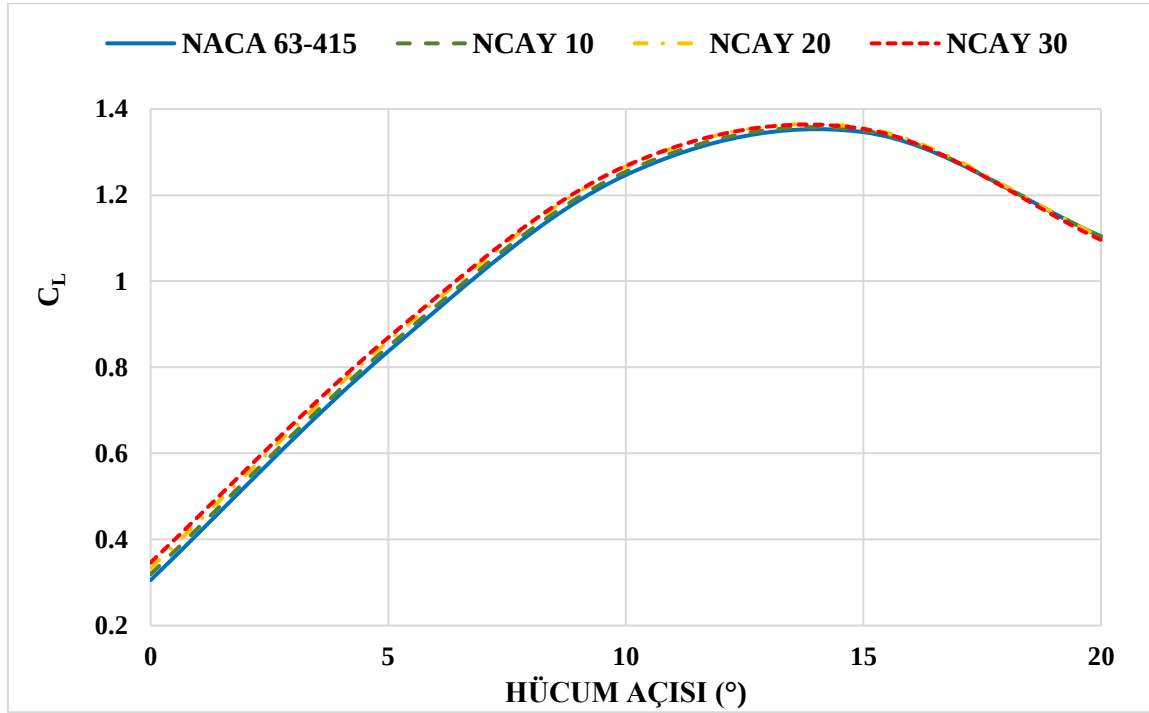
4. KANAT PROFİLİ ANALİZİNDE ELDE EDİLEN BULGULAR

Bu bölümde standart NACA 63-415 kanat profilinin alt ve üst yüzeyi değiştirilerek oluşturan NCAY 10, NCAY 20, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat profillerinin aerodinamik performansa etkisi incelenmiştir. Kanat profillerinin etrafındaki akışın simülasyonu ANSYS Fluent programı ile yapılmıştır. $1,6 \times 10^6$ Reynolds sayısında, 0° - 20° hücum açısı aralığında deneysel veriler kullanılarak NACA 63-415 kanat profili modelinin doğrulanması yapılmıştır (Bertagnolio, Sørensen, Johansen ve Fuglsang, 2001). Deneysel veriler Spalart Almaras ve SST k- ω türbülans modelleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi Spalart Almaras modeline göre SST k- ω türbülans modelinin sayısal değerleri deneysel C_L değerlerine daha uyum göstermiştir. C_L değerleri deneysel ve sayısal olarak en fazla 13° ile 14° arasında maksimum değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir.

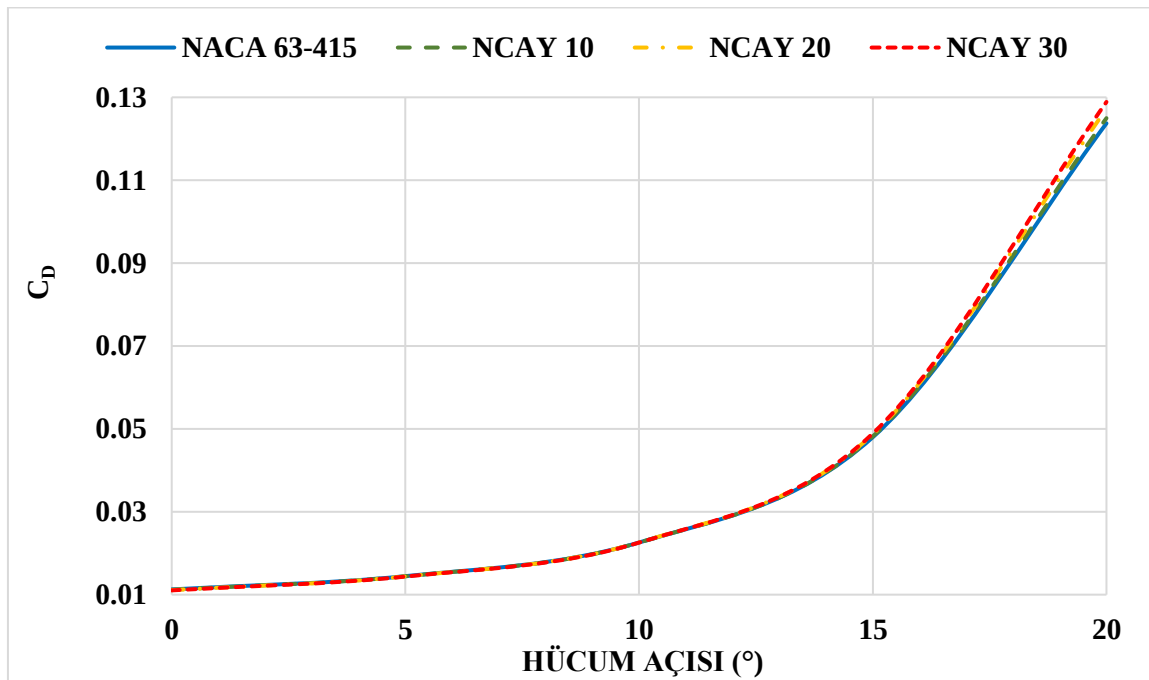


Şekil 4.1. Hesaplanan ve deney sonucu elde edilen C_L değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'te $1,6 \times 10^6$ Reynolds sayısında ve 0° ile 20° hücum açısı aralığında, NCAY 10, NCAY 20 ve NCAY 30 kanat profillerinin C_L , C_D ve C_L/C_D değerlerinin NACA 63-415 kanat profili ile karşılaştırılması görülmektedir.

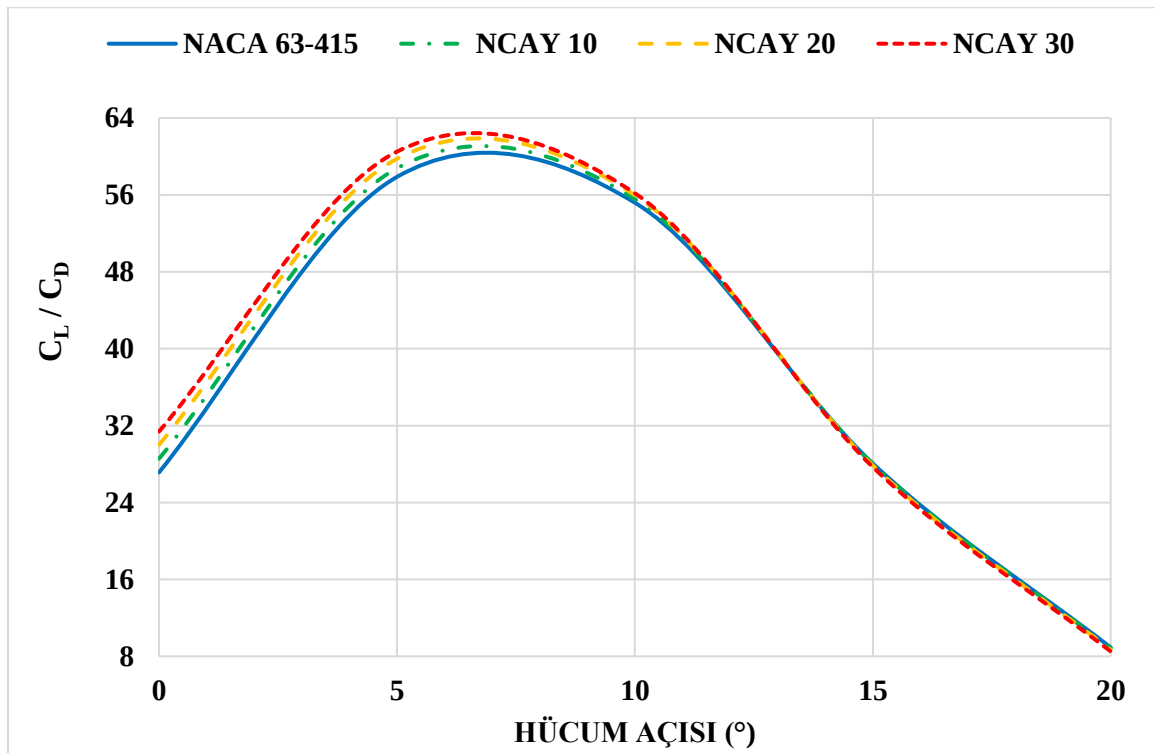


Şekil 4.2. Kanat profilinin alt yüzeyinin C_L 'ye etkisi



Şekil 4.3. Kanat profilinin alt yüzeyinin C_D 'ye etkisi

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi 0° - 15° hücum açısı aralığında yeni kanat profillerinin C_L değerleri NACA 63-415 kanat profiline göre artmıştır. Bu aralıkta C_L değerinde en fazla artış NCAY 30 kanat profilinde olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.2’de 15° hücum açısından sonra C_L değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmemiştir. Diğer yandan Şekil 4.3’te görüldüğü gibi 15° hücum açısına kadar yeni kanat profillerinin C_D değerine belirgin bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. 15° hücum açısından sonra ise yeni kanat profillerinin C_D değerlerinin NACA 63-415 kanat profiline göre arttığı ve en fazla artışın NCAY 30 kanat profilinde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4. Kanat profilinin alt yüzeyinin C_L/C_D 'ye etkisi

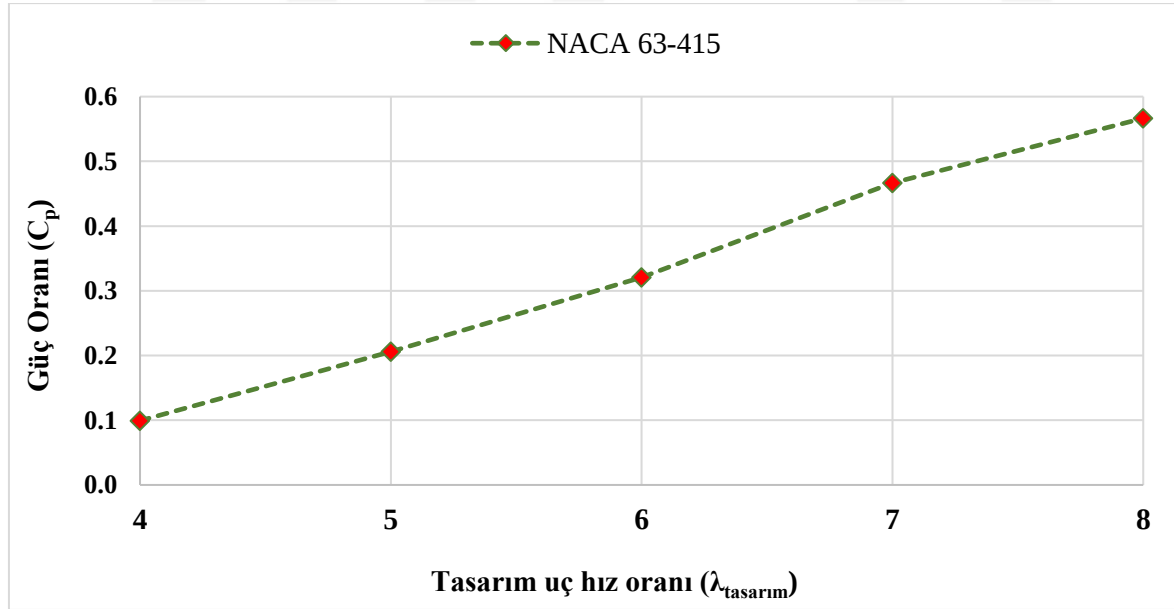
Bu nedenle Şekil 4.4’te görüldüğü gibi 0° hücum açısından yaklaşık 12° hücum açısına kadar standart NACA 63-415 kanat profiline göre yeni kanat profilleri C_L/C_D değerini artırmıştır. Bu açıdan sonra yeni kanat profillerinde C_D değerlerinde artış olduğu için C_L/C_D değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Şekil 4.4’te yaklaşık 12° hücum açısına kadar diğer kanat profillere göre NCAY 30 kanat profilinin C_L/C_D değerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu nedenle NCAY 30 kanat profili en fazla aerodinamik performansı iyileştirilmiştir.

5. TÜRBİN KANADI ANALİZİNDE ELDE EDİLEN BULGULAR

Bu bölümde standart NACA 63-415, iki boyutlu analizde diğer profillere göre daha yüksek C_L/C_D değerleri elde edilen NCAY 30 ve bu kanat profilinin üst yüzeyi %30 azaltılarak üretilen NCAYÜY 30 kanat profilleri ile oluşturulan kanat modellerinin aerodinamik performansı incelenmiştir. Kanat modellerinin etrafındaki akışın simülasyonu iki boyutlu analizde deneysel verilere daha uyumlu olan SST k- ω türbülans modeli ile yapılmıştır. İlk olarak standart NACA 63-415 kanat modelinde kanat uç hız oranında, bağlama açısında ve kanat uzunluğundaki değişimin aerodinamik performansa etkisi değerlendirilmiştir. Daha sonra optimum parametreler belirlenerek NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modellerinin aerodinamik performansı karşılaştırılmıştır.

5.1. Kanat Uç Hız Oranındaki Değişimin Aerodinamik Performansa Etkisi

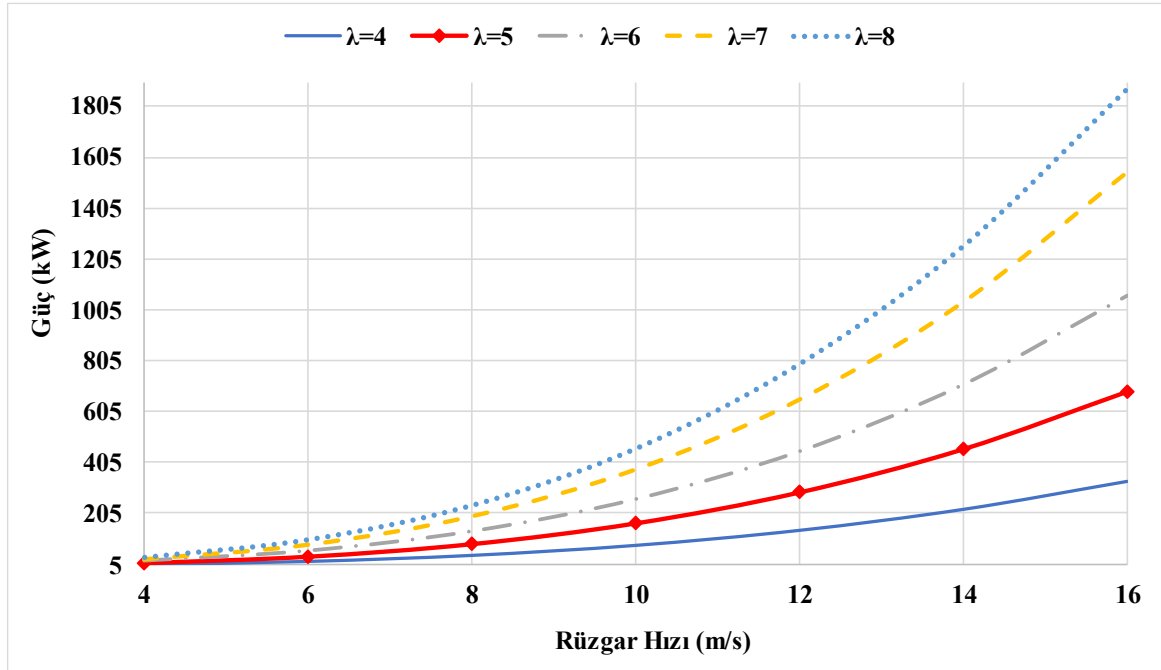
Şekil 5.1’de $\alpha_{\text{tasarım}} = 8^\circ$ ve 66° kanat açısında üretilen NACA 63-415 türbin kanadı modelinde farklı tasarım kanat uç hız oranlarında ($\lambda_{\text{tasarım}} = 4-8$) elde edilen güç katsayıları (C_p) görülmektedir.



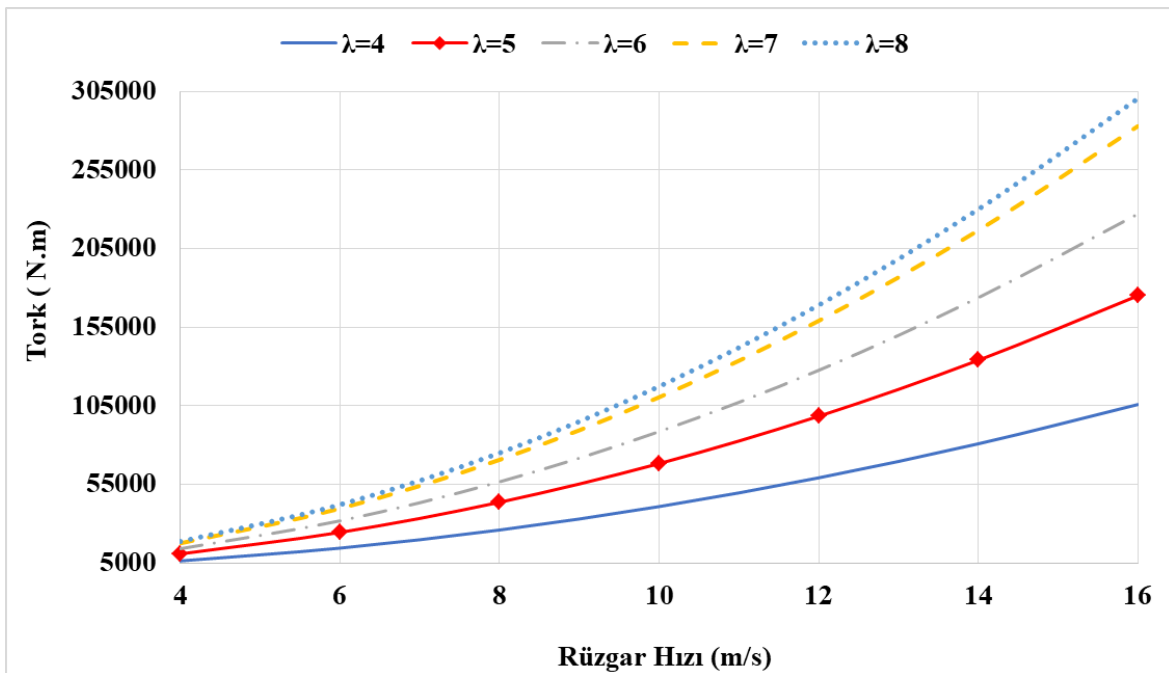
Şekil 5.1. NACA 63-415 için türbin kanadı güç katsayısının tasarım uç hız oranı ile değişimi

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi tasarım uç hız oranı ($\lambda_{\text{tasarım}}$) arttıkça güç oranı (C_p) artmıştır ve en yüksek C_p değeri $\lambda_{\text{tasarım}} = 8$ ile üretilen kanat modeli ile elde edilmiştir.

Şekil 5.2 ve 5.3'te NACA 63-415 kanat profili kullanılarak farklı tasarım uç hız oranlarında ($\lambda_{\text{tasarım}} = 4-8$) üretilen kanat modellerinin 4-16 m/s rüzgâr hızlarında HAD analizi ile elde edilen güç ve tork değerleri görülmektedir.



Şekil 5.2. Farklı rüzgâr hızlarında tasarım uç hız oranına ($\lambda_{\text{tasarım}}$) bağlı olarak güç değişimi

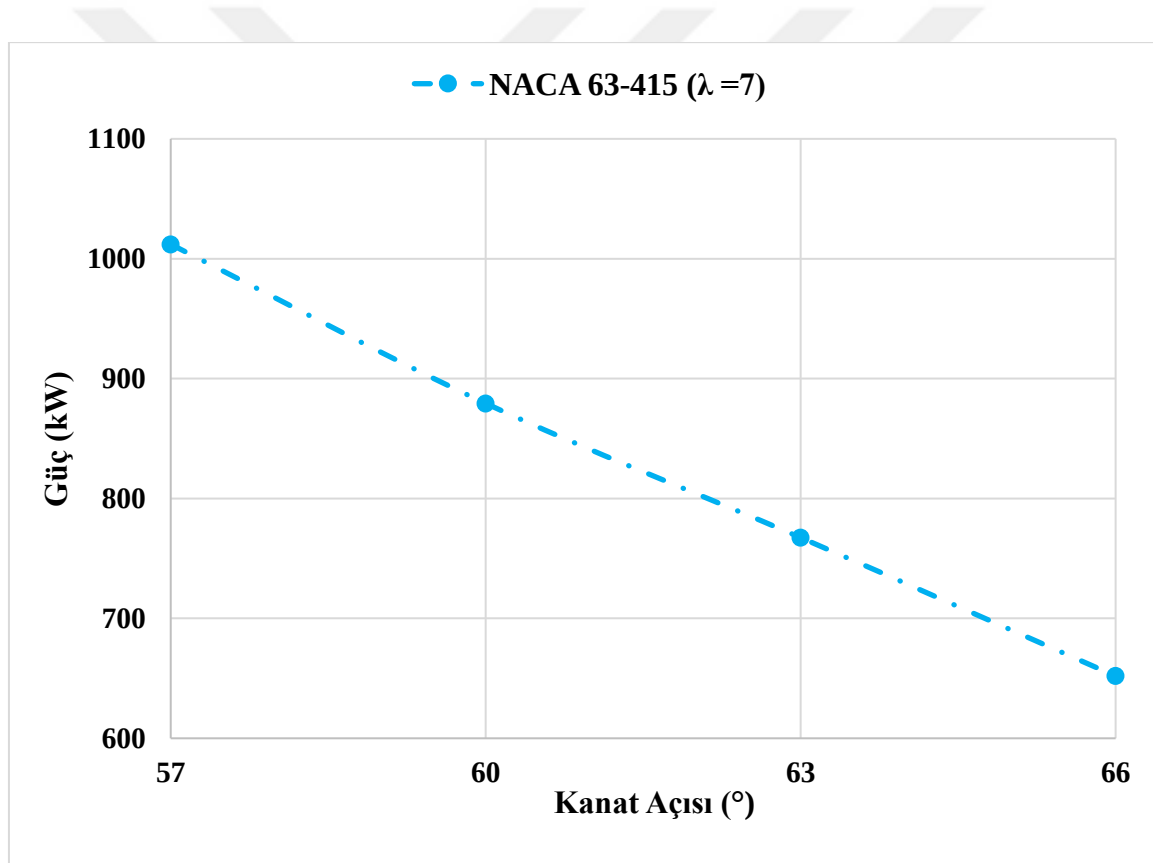


Şekil 5.3. Farklı rüzgâr hızlarında tasarım uç hız oranına ($\lambda_{\text{tasarım}}$) bağlı olarak tork değişimi

Şekil 5.2 ve 5.3'te görüldüğü gibi rüzgâr hızı arttıkça tüm $\lambda_{\text{tasarım}}$ değerleri için güç ve tork değerleri artmıştır. Ayrıca tüm rüzgâr hızlarında $\lambda_{\text{tasarım}}$ değerleri artıkça HAD analizi ile elde edilen güç ve tork değerleri artmıştır. $\lambda_{\text{tasarım}} = 8$ ve 16 m/s rüzgâr hızında maksimum güç ve tork değerleri elde edilmiştir.

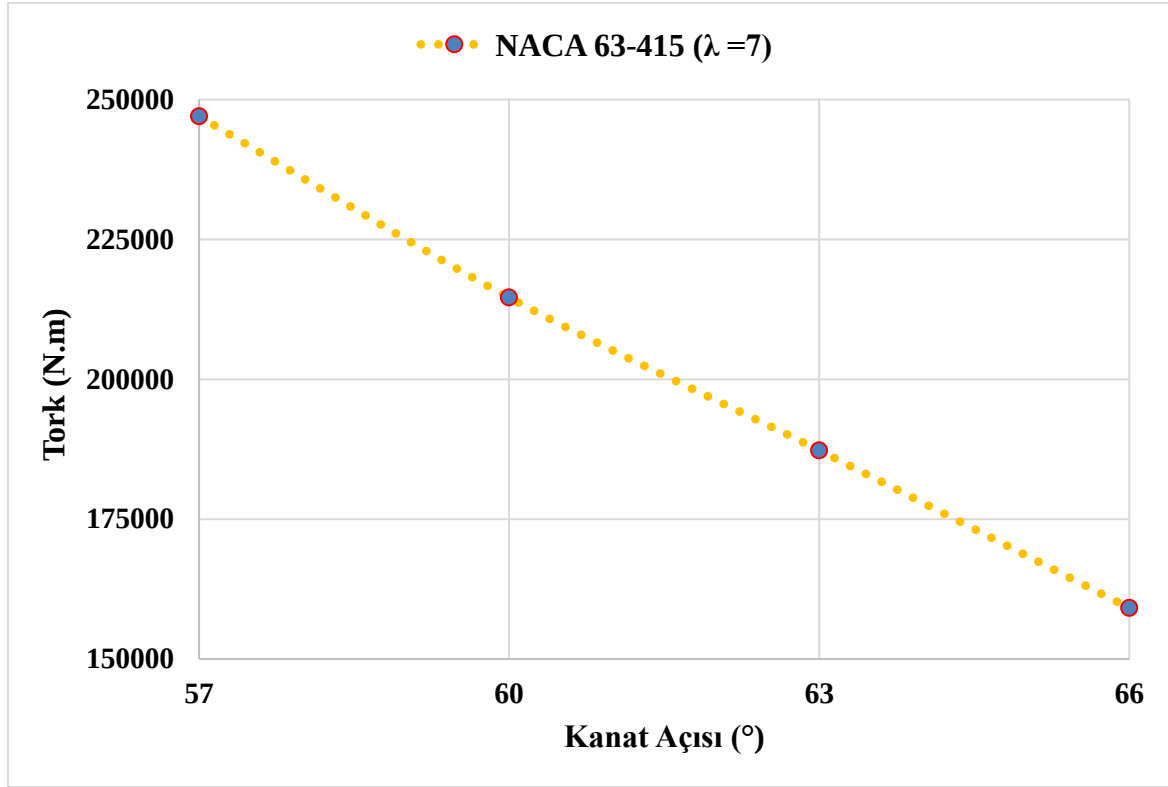
5.2. Kanat Açısındaki Değişimin Aerodinamik Performansa Etkisi

Şekil 5.4'te $\alpha_{\text{tasarım}} = 8^\circ$, $\lambda_{\text{tasarım}} = 7$ tasarım kanat uç hız oranında, 20 m kanat uzunluğunda ve farklı kanat açılarında (57° , 60° , 63° ve 66°) üretilen NACA 63-415 kanat modelinin 12 m/s rüzgâr hızı için HAD analizi ile hesaplanan güç değerleri görülmektedir.



Şekil 5.4. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=7$) için gücün kanat açısı ile değişimi

Şekil 5.5'te $\alpha_{\text{tasarım}} = 8^\circ$, $\lambda_{\text{tasarım}} = 7$ tasarım kanat uç hız oranında, 20 m kanat uzunluğunda ve farklı kanat açılarında (57° , 60° , 63° ve 66°) üretilen NACA 63-415 kanat modelinin 12 m/s rüzgâr hızı için HAD analizi ile hesaplanan tork değerleri görülmektedir.



Şekil 5.5. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=7$) için torkun kanat açısı ile değişimi

Şekil 5.4 ve 5.5'te görüldüğü kanat açısı artıkça güç ve tork değerleri azalmıştır. En yüksek tork ve güç değerleri 57° kanat açısında elde edilmiştir.

5.3. Kanat Uzunluğundaki Değişimin Aerodinamik Performansa Etkisi

Bu bölümde mevcut kanat uzunluğu ($R = 20$ m) %25 artırılarak ve %25 azaltılarak sırasıyla $R = 15$ m ve $R = 25$ m uzunluğundaki yeni NACA 63-415 kanat modellerinin aerodinamik performansa etkisi araştırılmıştır. Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak NACA 63-415 kanat profili, $\alpha_{\text{tasarım}} = 8^\circ$ ve sırasıyla $R = 15$ m ve $R = 25$ m için c veter uzunlukları ve α_b bağlama açıları hesaplanmıştır. Elde edilen veriler Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

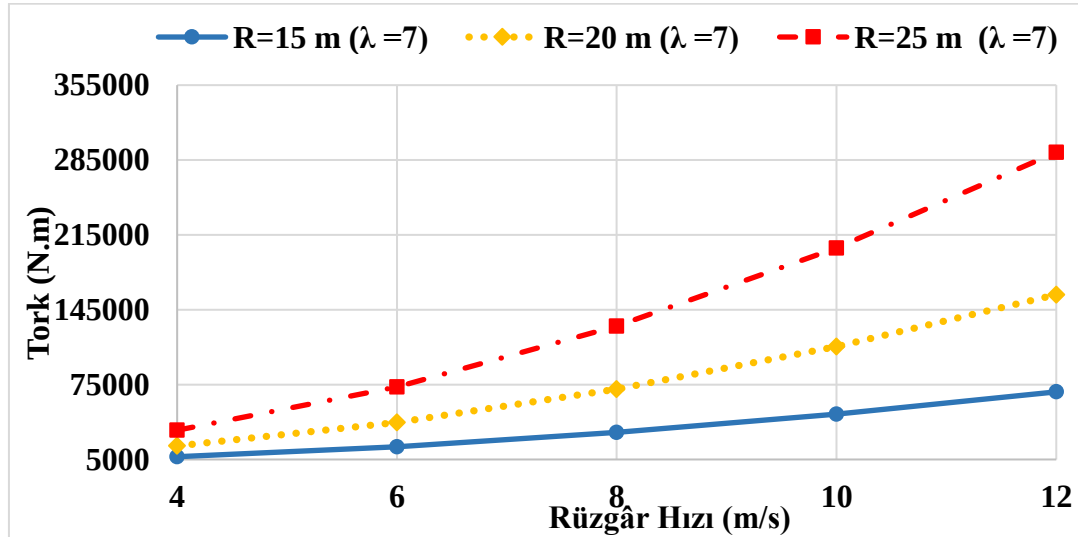
Çizelge 5.1. 15 m kanat uzunluğu için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri

NACA 63-415 (15 m, $\lambda_{\text{tasarım}}=7$)				
İstasyon	r (m)	Bağlanma Açısı (°)	Veter Uzunluğu (m)	Profil Tipi
Ön Düzlem	0	0	1	Dairesel
Düzlem 1	1	35,32207101	2,063817510	NACA 63-415
Düzlem 2	2	23,31662267	2,206906081	NACA 63-415
Düzlem 3	3	15,69178519	1,914974718	NACA 63-415
Düzlem 4	4	10,78572674	1,613856918	NACA 63-415
Düzlem 5	5	7,465727009	1,371245622	NACA 63-415
Düzlem 6	6	5,102549372	1,183075581	NACA 63-415
Düzlem 7	7	3,347017074	1,036297954	NACA 63-415
Düzlem 8	8	1,996719419	0,919911591	NACA 63-415
Düzlem 9	9	0,928331836	0,825937648	NACA 63-415
Düzlem 10	10	0,063171385	0,748752029	NACA 63-415
Düzlem 11	11	-0,651029358	0,684373725	NACA 63-415
Düzlem 12	12	-1,250218896	0,629943208	NACA 63-415
Düzlem 13	13	-1,759872799	0,583369894	NACA 63-415
Düzlem 14	14	-2,198517473	0,543097783	NACA 63-415
Düzlem 15	15	-2,579931764	0,507948846	NACA 63-415

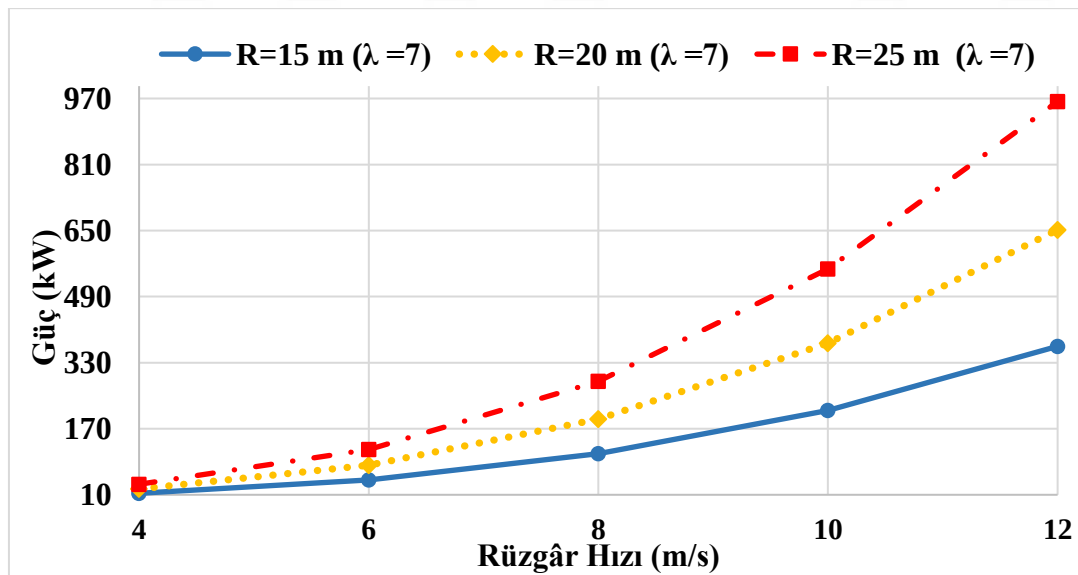
Çizelge 5.2. 25 m kanat uzunluğu için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri

NACA 63-415 (25 m, $\lambda_{\text{tasarım}}=7$)				
İstasyon	r (m)	Bağlanma Açısı (°)	Veter Uzunluğu (m)	Profil Tipi
Ön Düzlem	0	0	1	Dairesel
Düzlem 1	1	41,57183570	2,662262666	NACA 63-415
Düzlem 2	2	32,50078244	3,629446796	NACA 63-415
Düzlem 3	3	25,31316049	3,733591393	NACA 63-415
Düzlem 4	4	19,84019980	3,506598977	NACA 63-415
Düzlem 5	5	15,69178519	3,191624530	NACA 63-415
Düzlem 6	6	12,50847969	2,880178853	NACA 63-415
Düzlem 7	7	10,02057351	2,600730218	NACA 63-415
Düzlem 8	8	8,038232967	2,358351317	NACA 63-415
Düzlem 9	9	6,429623427	2,150299440	NACA 63-415
Düzlem 10	10	5,102549372	1,971792635	NACA 63-415
Düzlem 11	11	3,991556435	1,818029930	NACA 63-415
Düzlem 12	12	3,049338505	1,684808456	NACA 63-415
Düzlem 13	13	2,241077541	1,568632512	NACA 63-415
Düzlem 14	14	1,540694175	1,466652931	NACA 63-415
Düzlem 15	15	0,928331836	1,376562747	NACA 63-415
Düzlem 16	16	0,388641663	1,296493810	NACA 63-415
Düzlem 17	17	-0,090406366	1,224927959	NACA 63-415
Düzlem 18	18	-0,518361287	1,160624917	NACA 63-415
Düzlem 19	19	-0,902891103	1,102565195	NACA 63-415
Düzlem 20	20	-1,250218896	1,049905346	NACA 63-415
Düzlem 21	21	-1,565444355	1,001943007	NACA 63-415
Düzlem 22	22	-1,852783973	0,958089538	NACA 63-415
Düzlem 23	23	-2,115752697	0,917848543	NACA 63-415
Düzlem 24	24	-2,357302891	0,880798919	NACA 63-415
Düzlem 25	25	-2,579931764	0,846581409	NACA 63-415

Şekil 5.6 ve 5.7’de 15, 20 ve 25 m kanat uzunluğuna sahip NACA-63-415 kanat modelleri kullanılarak HAD analizi ile elde edilen tork ve gücün farklı rüzgâr hızları (4-12 m/s) ile değişimi görülmektedir.



Şekil 5.6. Farklı kanat uzunlukları sahip NACA 63-415 kanat modellerinin Tork-Rüzgâr Hızı eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 5.7. Farklı kanat uzunlukları sahip NACA 63-415 kanat modellerinin Güç-Rüzgâr Hızı eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 5.6 ve 5.7’de görüldüğü gibi rüzgâr hızı arttıkça tork ve güç değerleri artmıştır. En yüksek tork ve güç değerleri 12 m/s rüzgâr hızında 25 m uzunluğunda kanat modeli ile elde edilmiştir.

5.4. Kanat Yüzeyindeki Değişikliğin Aerodinamik Performansa Etkisi

Bu bölümde NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat profilleri kullanılarak oluşturulan kanat modellerinin aerodinamik performansa etkisi araştırılmıştır. Çizelge 5.3'te NACA 63-415 kanat modellerinin çizimi için gerekli veriler verilmiştir.

Çizelge 5.3. NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=7$, $\alpha_{\text{tasarım}} = 7$) kanat modeli için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri

NACA 63-415 ($\lambda_{\text{tasarım}}=7$, $\alpha_{\text{tasarım}} = 7$)				
İstasyon	r (m)	Bağlanma Açısı (°)	Veter Uzunluğu (m)	Profil Tipi
Ön Düzlem	0	0	1	Dairesel
Düzlem 1	1	40,13996919	2,612986638	NACA 63-415
Düzlem 2	2	29,67198653	3,234584154	NACA 63-415
Düzlem 3	3	22,06854598	3,087656429	NACA 63-415
Düzlem 4	4	16,69178519	2,754579444	NACA 63-415
Düzlem 5	5	12,82992086	2,422529908	NACA 63-415
Düzlem 6	6	9,975563375	2,136077568	NACA 63-415
Düzlem 7	7	7,802319021	1,898179508	NACA 63-415
Düzlem 8	8	6,102549372	1,701785222	NACA 63-415
Düzlem 9	9	4,741718562	1,538799412	NACA 63-415
Düzlem 10	10	3,630263934	1,402292358	NACA 63-415
Düzlem 11	11	2,706850413	1,286787920	NACA 63-415
Düzlem 12	12	1,928331836	1,188063136	NACA 63-415
Düzlem 13	13	1,263604556	1,102874430	NACA 63-415
Düzlem 14	14	0,689747102	1,028719029	NACA 63-415
Düzlem 15	15	0,189531912	0,96364970	NACA 63-415
Düzlem 16	16	-0,250218896	0,906136564	NACA 63-415
Düzlem 17	17	-0,639745463	0,854965362	NACA 63-415
Düzlem 18	18	-0,987118379	0,809162620	NACA 63-415
Düzlem 19	19	-1,298779844	0,767940336	NACA 63-415
Düzlem 20	20	-1,579931764	0,730654789	NACA 63-415

Çizelge 5.4'te NCAY 30 kanat modellerinin çizimi için gerekli veriler verilmiştir.

Çizelge 5.4. NCAY 30 ($\lambda_{\text{tasarım}}=7$, $\alpha_{\text{tasarım}} = 7$) kanat modeli için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri

NCAY 30 ($\lambda_{\text{tasarım}} = 7$, $\alpha_{\text{tasarım}} = 7$)				
İstasyon	r (m)	Bağlanma Açısı (°)	Veter Uzunluğu (m)	Profil Tipi
Ön Düzlem	0	0	1	Dairesel
Düzlem 1	1	40,13996919	2,586847941	NCAY 30
Düzlem 2	2	29,67198653	3,202227381	NCAY 30
Düzlem 3	3	22,06854598	3,056769430	NCAY 30
Düzlem 4	4	16,69178519	2,727024340	NCAY 30
Düzlem 5	5	12,82992086	2,398296422	NCAY 30
Düzlem 6	6	9,975563375	2,114709573	NCAY 30
Düzlem 7	7	7,802319021	1,879191298	NCAY 30
Düzlem 8	8	6,102549372	1,684761619	NCAY 30
Düzlem 9	9	4,741718562	1,523406218	NCAY 30
Düzlem 10	10	3,630263934	1,388264696	NCAY 30
Düzlem 11	11	2,706850413	1,273915692	NCAY 30
Düzlem 12	12	1,928331836	1,176178489	NCAY 30
Düzlem 13	13	1,263604556	1,091841958	NCAY 30
Düzlem 14	14	0,689747102	1,018428363	NCAY 30
Düzlem 15	15	0,189531912	0,954009947	NCAY 30
Düzlem 16	16	-0,250218896	0,897072136	NCAY 30
Düzlem 17	17	-0,639745463	0,846412819	NCAY 30
Düzlem 18	18	-0,987118379	0,801068259	NCAY 30
Düzlem 19	19	-1,298779844	0,760258338	NCAY 30
Düzlem 20	20	-1,579931764	0,723345772	NCAY 30

Çizelge 5.5'te NCAYÜY 30 kanat modelinin çizimi için gerekli veriler verilmiştir.

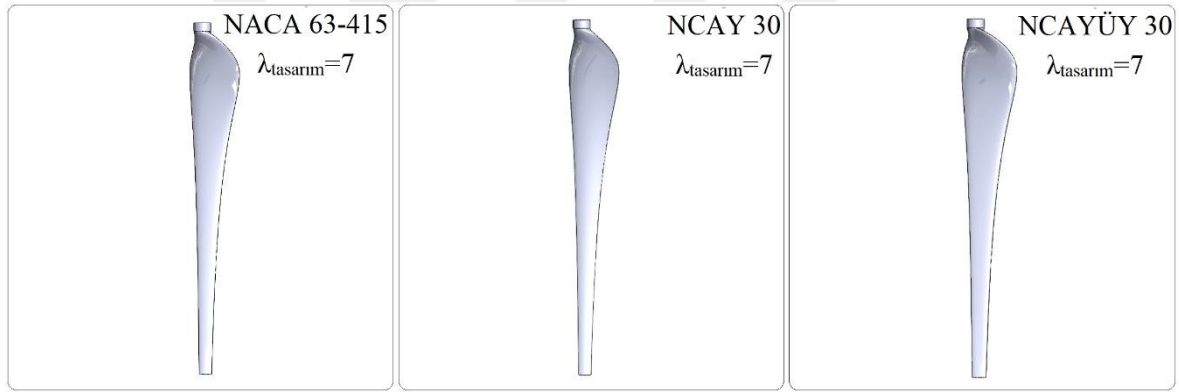
Çizelge 5.5. NCAYÜY 30 ($\lambda_{\text{tasarım}}=7$, $\alpha_{\text{tasarım}} = 7$) kanat modeli için optimum bağlanma açısı ve veter uzunluğu değerleri

NCAYÜY 30 ($\lambda_{\text{tasarım}}=7$)				
İstasyon	r (m)	Bağlanma Açısı (°)	Veter Uzunluğu (m)	Profil Tipi
Ön Düzlem	0	0	1	Dairesel
Düzlem 1	1	40,13996919	2,837936771	NCAYÜY 30
Düzlem 2	2	29,67198653	3,513047168	NCAYÜY 30
Düzlem 3	3	22,06854598	3,353470541	NCAYÜY 30
Düzlem 4	4	16,69178519	2,991719199	NCAYÜY 30
Düzlem 5	5	12,82992086	2,631083758	NCAYÜY 30
Düzlem 6	6	9,975563375	2,319970943	NCAYÜY 30
Düzlem 7	7	7,802319021	2,061592411	NCAYÜY 30
Düzlem 8	8	6,102549372	1,848290683	NCAYÜY 30
Düzlem 9	9	4,741718562	1,671273542	NCAYÜY 30
Düzlem 10	10	3,630263934	1,523014695	NCAYÜY 30
Düzlem 11	11	2,706850413	1,397566563	NCAYÜY 30
Düzlem 12	12	1,928331836	1,290342633	NCAYÜY 30
Düzlem 13	13	1,263604556	1,197820093	NCAYÜY 30
Düzlem 14	14	0,689747102	1,117280708	NCAYÜY 30
Düzlem 15	15	0,189531912	1,046609607	NCAYÜY 30
Düzlem 16	16	-0,250218896	0,984145206	NCAYÜY 30
Düzlem 17	17	-0,639745463	0,928568713	NCAYÜY 30
Düzlem 18	18	-0,987118379	0,878822845	NCAYÜY 30
Düzlem 19	19	-1,298779844	0,834051765	NCAYÜY 30
Düzlem 20	20	-1,579931764	0,793556332	NCAYÜY 30

Çizelge 5.3, 5.4 ve 5.5'teki optimum veter uzunlukları ve bağlama açıları sırasıyla Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak $\lambda_{\text{tasarım}} = 7$, $\alpha_{\text{tasarım}} = 7^\circ$, $z = 3$ ve $R = 20$ m için hesaplanmıştır.

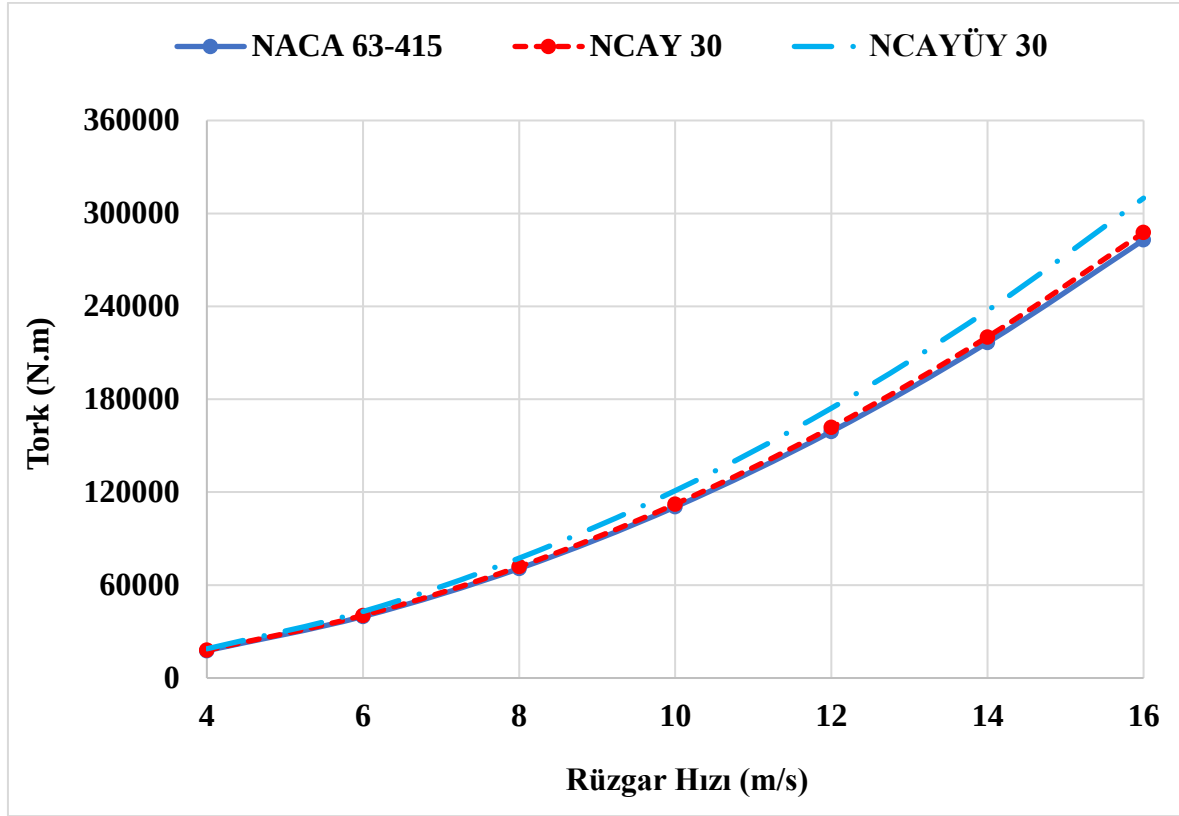
Bölüm 5.1'de $\lambda_{\text{tasarım}} = 8$ ile maksimum güç ve tork elde edilmişken mevcut literatürde $\lambda_{\text{tasarım}}$ değeri 6-7 arasında iken türbin kanadının aerodinamik performansının optimum olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle kanat modelleri oluşturulurken $\lambda_{\text{tasarım}} = 7$ alınmıştır.

NCAY 30 kanat profilinde maksimum C_L/C_D değeri Şekil 4.4'te görüldüğü gibi yaklaşık 7° hücum açısında elde edilmiştir. Bu nedenle yeni üretilen kanat modellerinde tasarım hücum açısı $\alpha_{\text{tasarım}} = 7^\circ$ alınmıştır. Kanat uzunluğu 20 m ve kanat açısı 66° 'dir. Şekil 5.8'de üretilen NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modelleri görülmektedir.

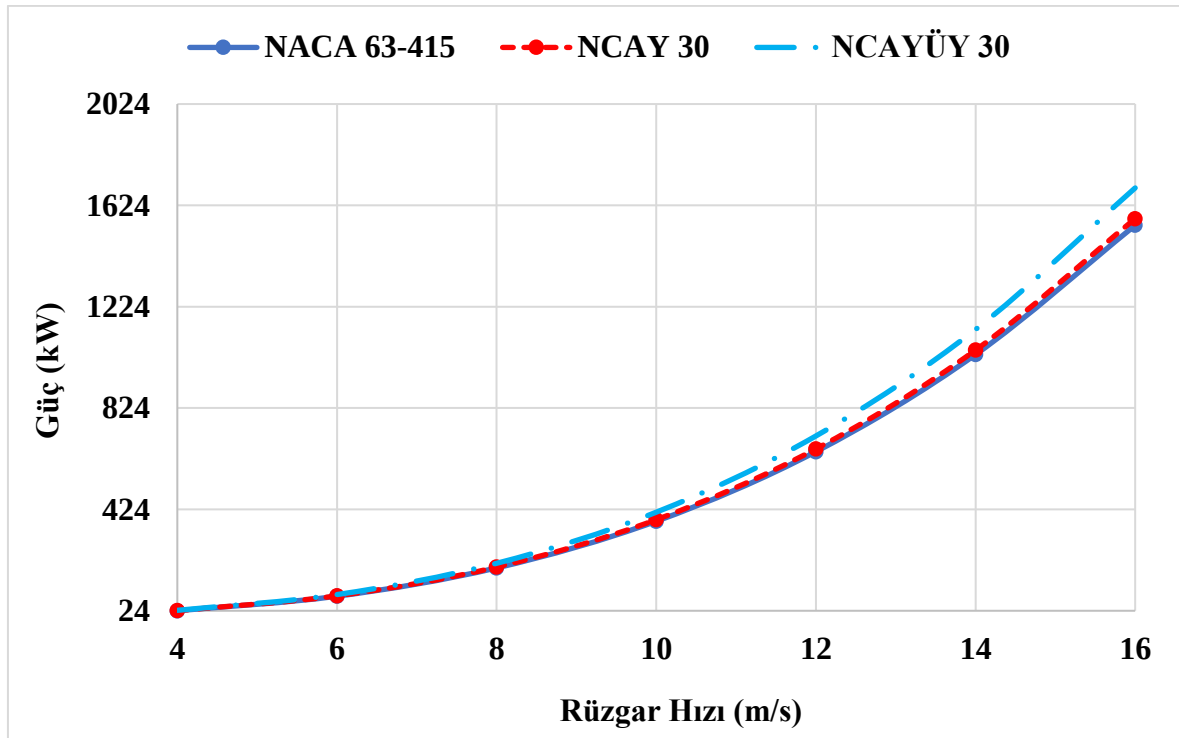


Şekil 5.8. $\lambda_{\text{tasarım}} = 7$ tasarım uç hız oranında oluşturulan NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modelleri

Şekil 5.9 ve 5.10'da NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modellerinin 4-16 m/s rüzgâr hızı aralığında HAD analizi ile hesaplanan tork ve güç değerleri görülmektedir.



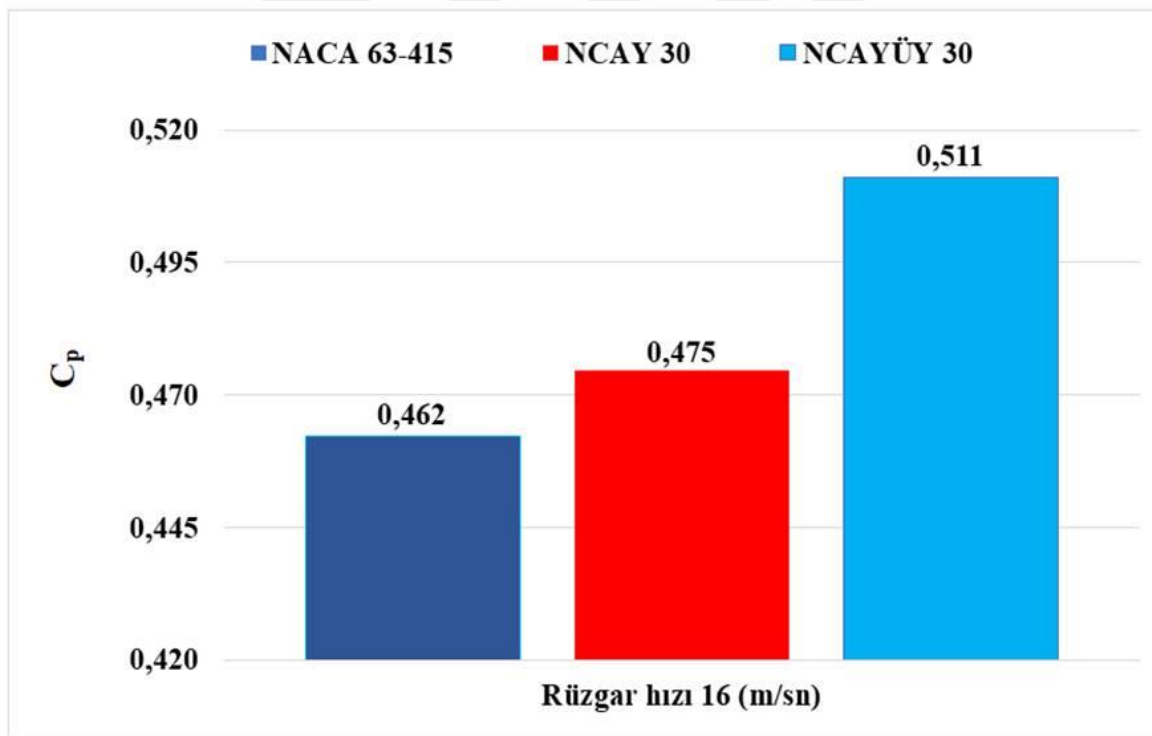
Şekil 5.9. NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modellerinin Tork-Rüzgâr Hızı eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 5.10. NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modellerinin Güç-Rüzgâr Hızı eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da görüldüğü gibi tüm kanat modellerinde rüzgâr hızı arttıkça tork ve güç artmıştır ve maksimum tork ve güç 16 m/s rüzgar hızında elde edilmiştir. Şekil 5.10’da görüldüğü gibi diğer kanat modelleriyle karşılaştırıldığında NCAYÜY 30 kanat modeli ile 10 m/s rüzgar hızından sonra gücün belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir.

Ayrıca 16 m/s rüzgâr hızında diğer kanat modellerine göre NCAYÜY 30 kanat modelinde türbin gücünün belirgin bir şekilde iyileştiği gözlemlenmiştir. Bu hızda standart NACA 63-415 kanat modeli ile 1545,4 kW türbin gücü elde edilirken NCAYÜY 30 kanat modeli ile 1692,9 kW türbin gücü elde edilmiştir. Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da incelen tüm kanat modellerinde maksimum tork ve güç 16 m/s rüzgâr hızında elde edildiği için yeni üretilen kanat modellerinin C_p değerine etkisi bu hızda incelenmiştir. Şekil 5.11’de standart NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modellerinin 16 m/s rüzgâr hızında hesaplanan C_p değerlerinin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 5.11. NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modellerinin 16 m/s için Güç Oranlarının karşılaştırılması

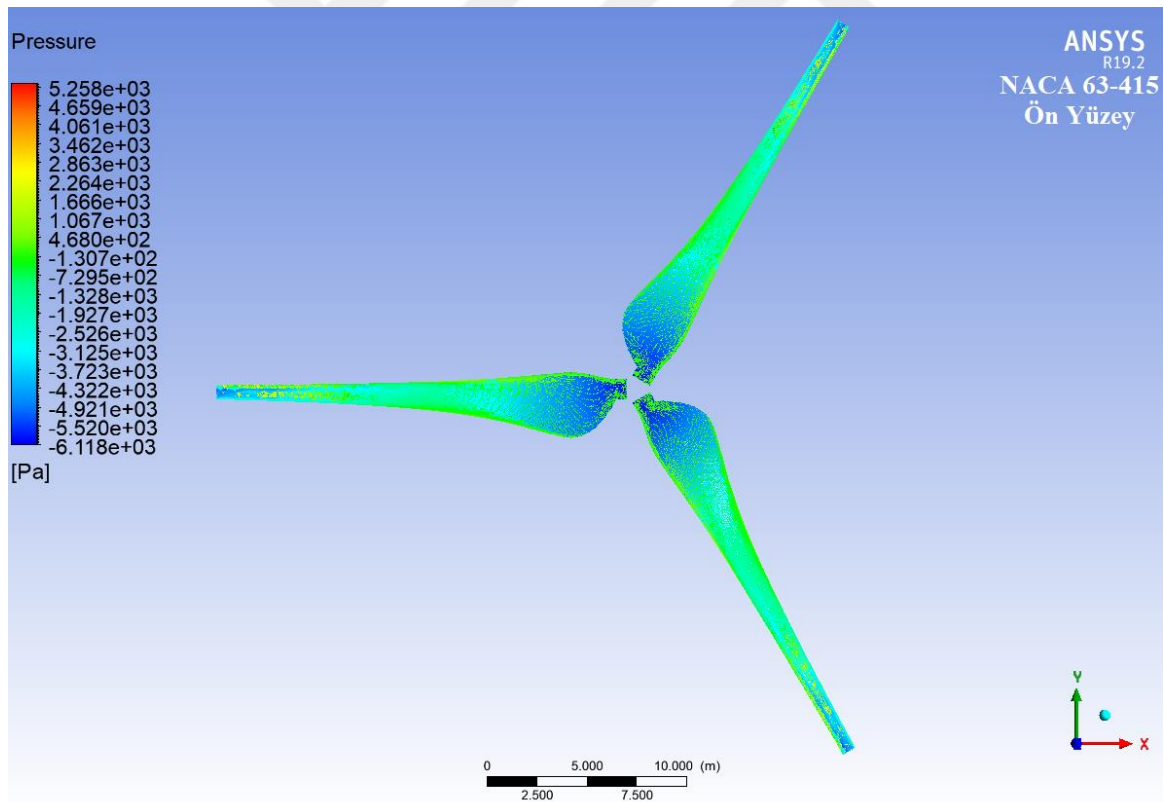
Şekil 5.11’de standart NACA-63-415 kanat modeline göre yeni üretilen kanat modellerinin güç oranını iyileştirdiği görülmektedir. En yüksek güç oranı 0,51 olarak standart NACA

63-415 kanat profilinin alt ve üst yüzeyinin %30 azaltılarak oluşturulan NCAYÜY 30 kanat modelinde elde edilmiştir. NCAYÜY 30 kanat modelinin standart NACA 63-415 kanat modeline göre C_p değerini %10,62 artırmıştır.

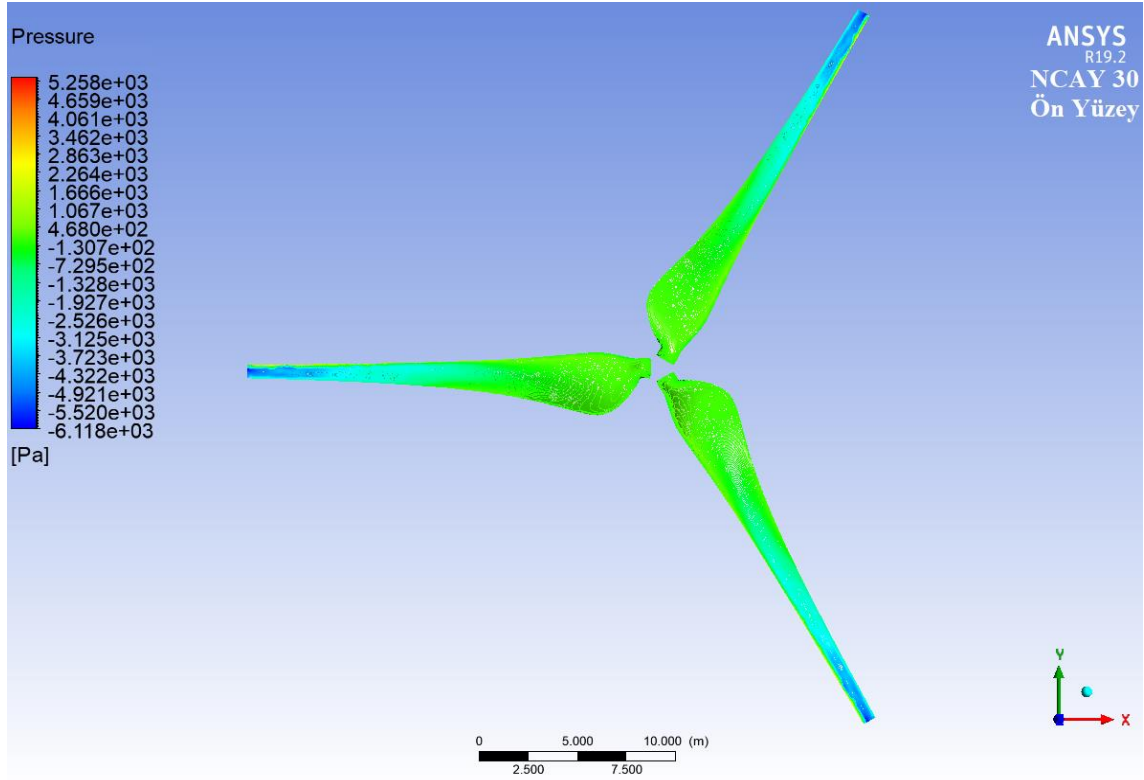
En yüksek C_p değeri 16 m/s rüzgar hızında elde edildiği için bu hızda yeni oluşturulan kanat modellerinin kanat üzerindeki basınç ve hız dağılımına etkisi araştırılmıştır.

Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te sırasıyla NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modellerinin 16 m/s rüzgâr hızında ön yüzeyindeki basınç dağılımları gösterilmiştir.

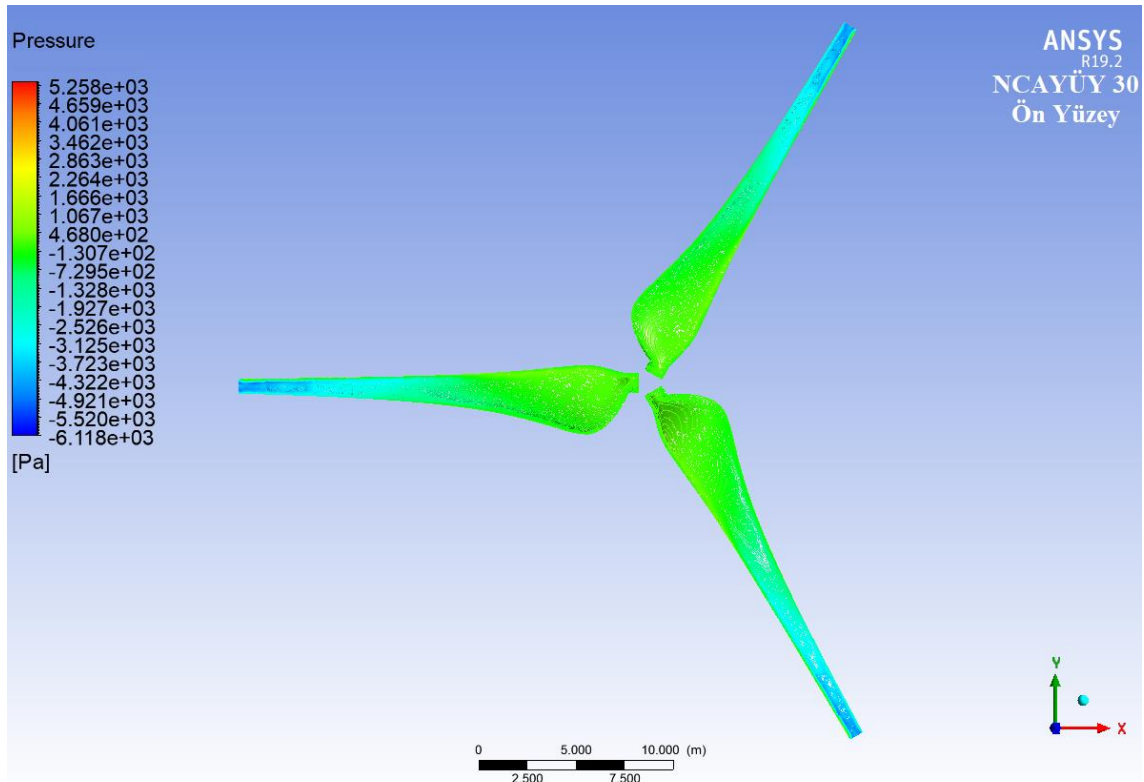
Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de sırasıyla NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modellerinin 16 m/s rüzgâr hızında arka yüzeyindeki basınç dağılımları gösterilmiştir.



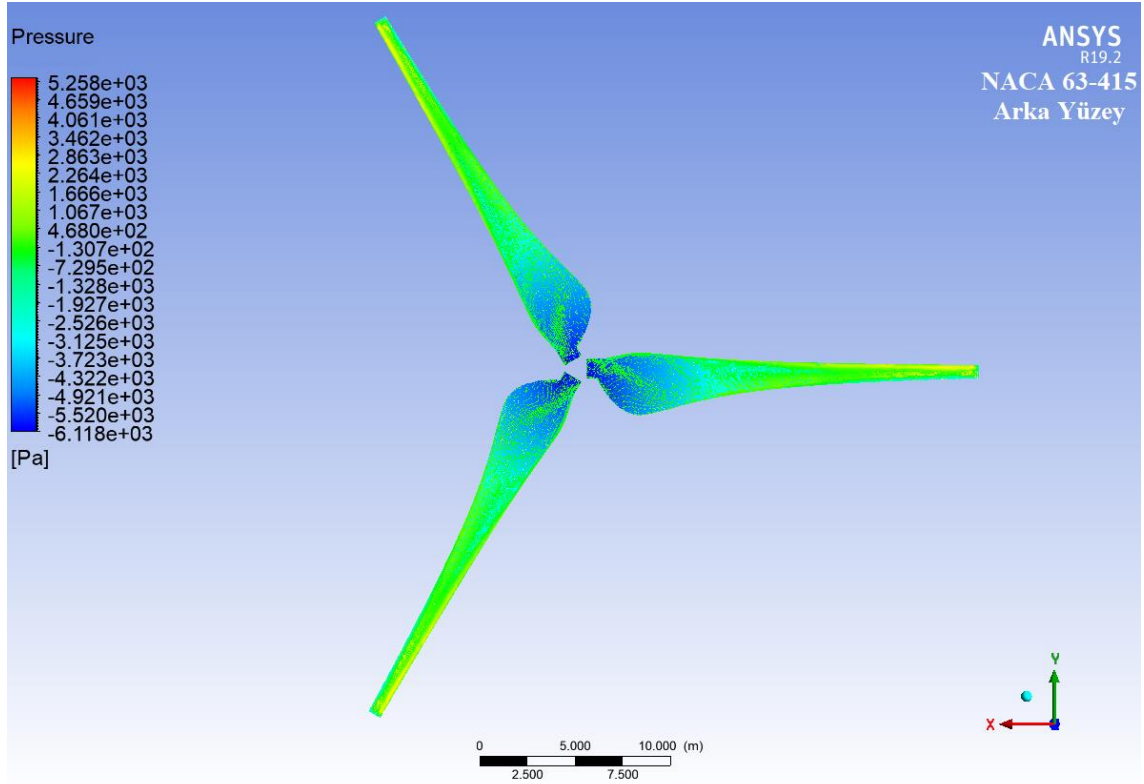
Şekil 5.12. NACA 63-415 kanat modelinin ön yüzeyindeki basınç dağılımı



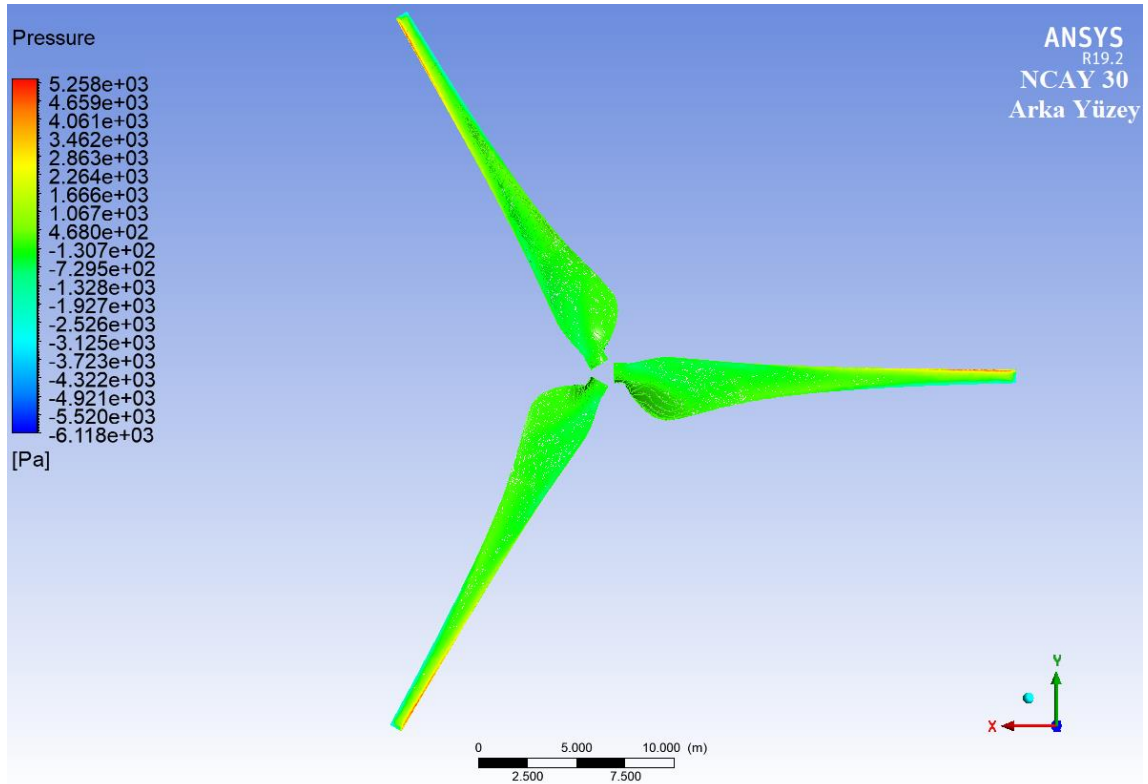
Şekil 5.13. NCAY 30 kanat modelinin ön yüzeyindeki basınç dağılımı



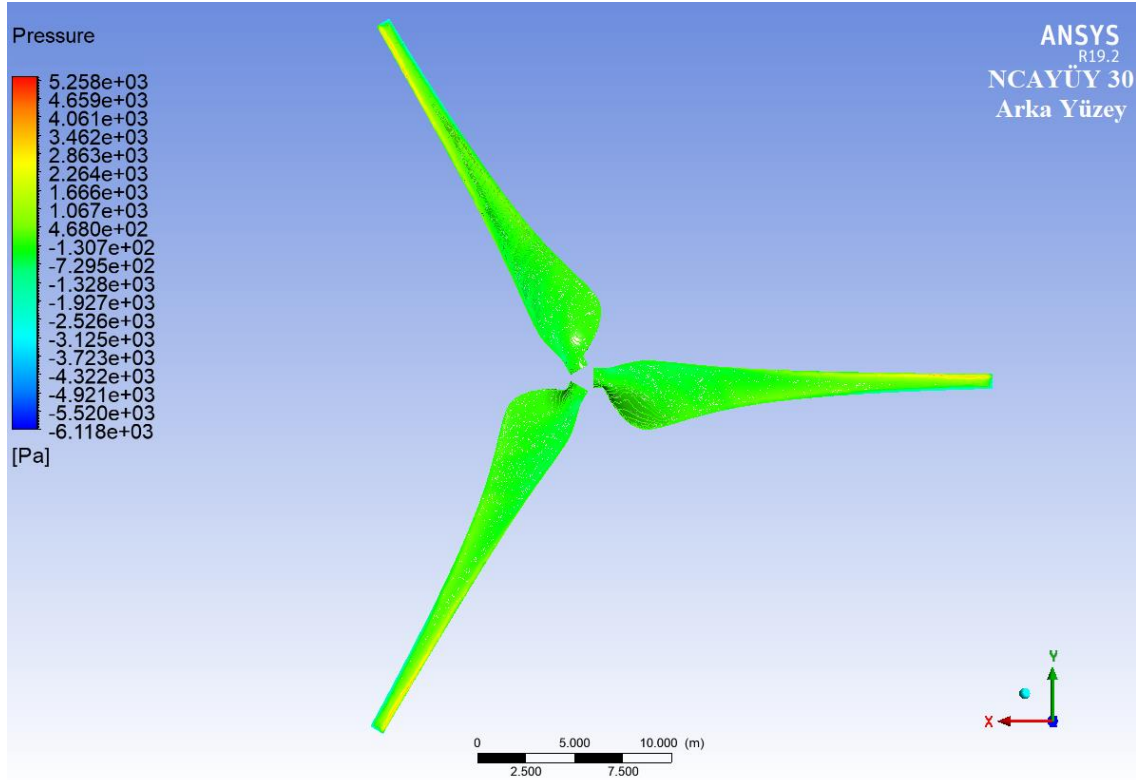
Şekil 5.14. NCAYÜY 30 kanat modelinin ön yüzeyindeki basınç dağılımı



Şekil 5.15. NACA 63-415 kanat modelinin arka yüzeyindeki basınç dağılımı



Şekil 5.16. NCAY 30 kanat modelinin arka yüzeyindeki basınç dağılımı

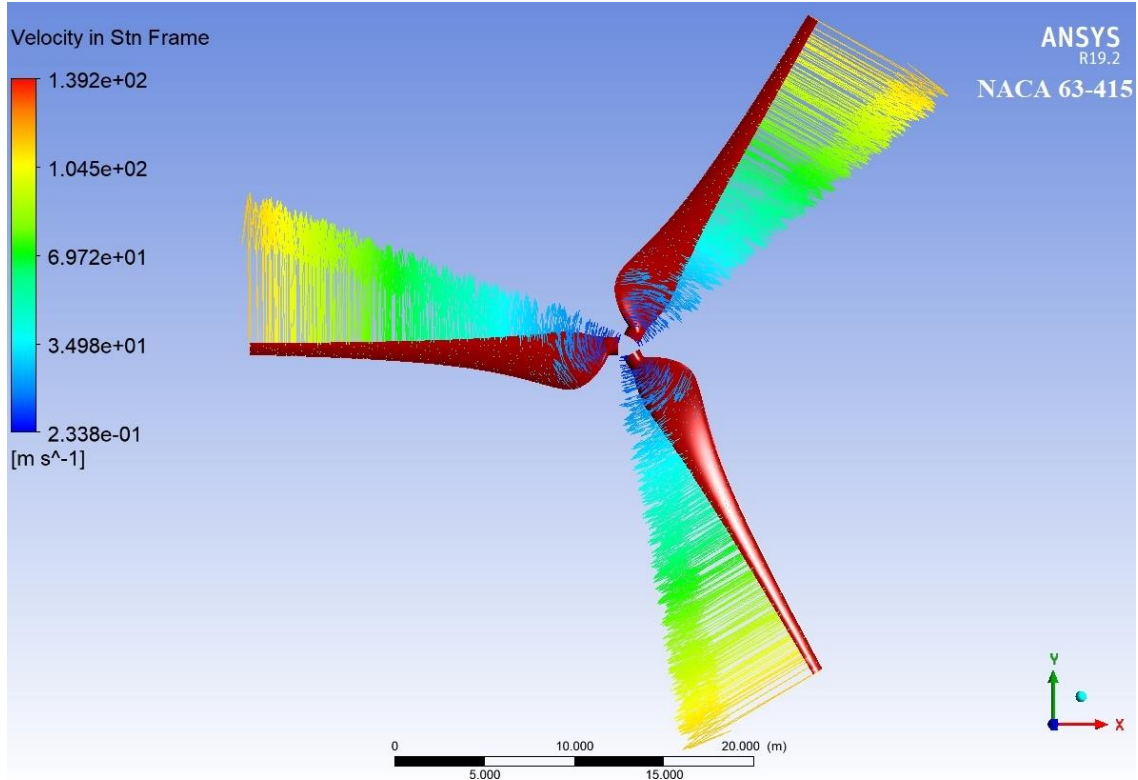


Şekil 5.17. NCAYÜY 30 kanat modelinin arka yüzeyindeki basınç dağılımı

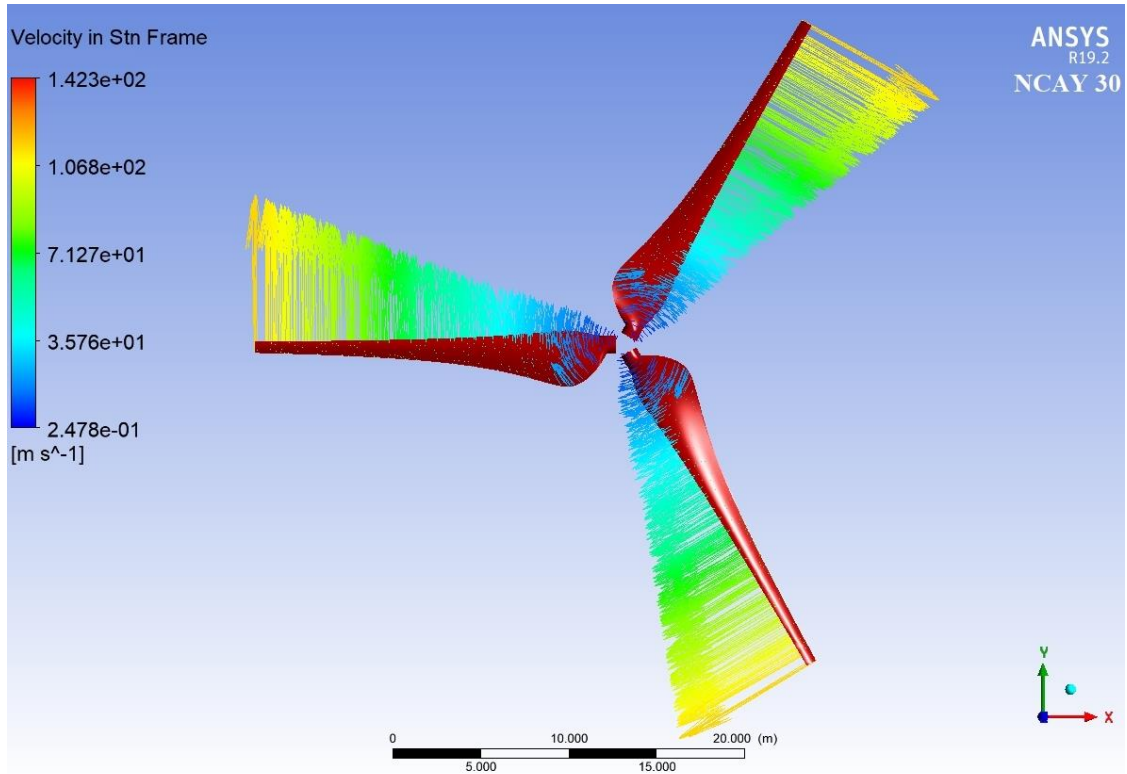
Rüzgâr türbininde akış kanadın üzerinden geçerken kanadın ön yüzeyinde (emme tarafında) hızlanırken kanadın arka tarafında (basınç tarafında) yavaşlamaktadır. Bu nedenle ön yüzeyde basınç azalırken alt yüzeyde basınç artmaktadır. Bu iki yüzey arasında basınç farkının artması türbin gücünü artırmaktadır. İncelen tüm kanat modellerinin ön yüzeylerindeki basınç (Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve 5.14), arka yüzeylerdeki basınca (Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve 5.17) göre daha azdır. Şekil 5.15'teki standart NACA 63-415 kanat modeli ile karşılaştırıldığında, Şekil 5.16 ve 5.17'de görülen yeni kanat modellerinin arka yüzeylerinin özellikle orta ve kök kısımlarında basıncın arttığı gözlemlenmektedir.

Ayrıca standart NACA 63-415 kanat modeline göre, yeni kanat modellerinin ön yüzeyinin uç kısmında basınç azalırken arka yüzeyin uç kısmında basıncı artmıştır. Sonuç olarak yeni kanat modelleri, standart NACA 63-415 kanat modeline göre arka yüzey ile ön yüzey arasında basınç farkını artırmıştır.

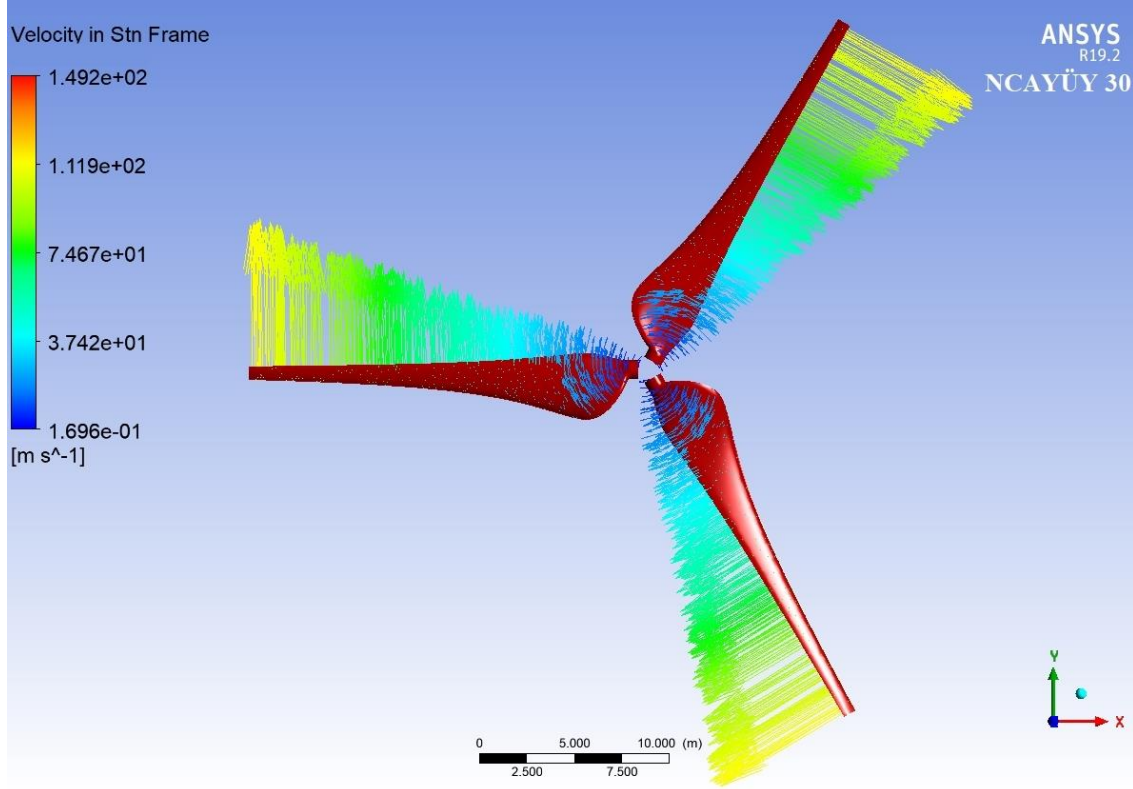
Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve 5.20'de NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modellerinin standart çerçevede hız vektörlerinin dağılımı görülmektedir.



Şekil 5.18. NACA 63-415 kanat modelinde hız vektörünün dağılımı



Şekil 5.19. NCAY 30 kanat modelinde hız vektörünün dağılımı



Şekil 5.20. NCAYÜY 30 kanat modelinde hız vektörünün dağılımı

Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de görüldüğü gibi beklenen bir şekilde tüm kanat modellerinde kök kısmından uç kısmına doğru gidildikçe hız artmaktadır. NACA 63-415, NCAY 30 ve NCAYÜY 30 kanat modellerinde sırasıyla kanadın uç kısmında maksimum hızları yaklaşık olarak 139, 142 ve 149 m/s’dir. Şekil 5.20’de görüldüğü gibi NCAYÜY 30 kanat modeli özellikle kanatların uç kısımlarında diğer kanat modellerine göre hızı daha fazla iyileştirmiştir ve NACA 63-415 kanat modeline göre NCAYÜY 30 kanat modelinde maksimum hız %7,2 artmıştır.

Sonuç olarak NCAYÜY 30 kanat modelinin 16 m/s rüzgar hızında arka yüzey ve ön yüzey arasındaki basınç farkını artırması ve uç kısımda kanat hızını iyileştirmesi, Şekil 5.11’de görüldüğü gibi bu kanat modeli ile maksimum C_p değerinin elde edilmesine neden olmuştur.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek fosil yakıt fiyatları, enerji güvenliği endişeleri ve iklim değişikliği gibi problemler nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları, gelecekte de rüzgâr enerji potansiyeli açısından zengin bir ülke olan Türkiye’de ve dünyada daha önemli hale gelecektir. Bu nedenle bu tez çalışmasında bir yenilenebilir enerji türü olan rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üreten rüzgâr türbinlerinin kanat geometrisinin optimizasyonu yapılarak türbin verimini artırmak amaçlanmıştır.

Bu çalışmada yatay eksenli üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılan NACA 63-415 kanat profilinin alt ve üst yüzeyinin geometrisi değiştirilerek SOLIDWORKS programı ile yeni kanat profilleri ve katı modelleri üretilmiştir. Üretilen kanat geometrilerine ANSYS Workbench platformunun Fluid Flow (Fluent) analiz sisteminin DesignModeler kısmında akış bölgesi oluşturulmuştur. Fluid Flow (Fluent) analiz sisteminin Meshing (ağ oluşturma) kısmında yeni geometrilerin sayısal ağ oluşturulmuştur. ANSYS Fluent programı ile sayısal ağ oluşturulan geometrilerin akış analizi yapılmıştır.

Bu çalışmada kanat tasarımı optimizasyonunda iki ve üç boyutlu sayısal çalışmayı içeren iki aşamalı yöntem kullanılmıştır. Birinci aşamada, standart NACA 63-415 kanat profilinin alt yüzeyi %10, %20 ve %30 azaltılarak üretilen sırası ile NCAY 10, NCAY 20 ve NCAY 30 olarak adlandırılan yeni kanat profilleri üretilmiştir. Kanat profillerinin etrafındaki akışın simülasyonu ANSYS Fluent programı ile yapılmıştır. $1,6 \times 10^6$ Reynolds sayısında, 0° - 20° hücum açısı aralığında Standart NACA 63-415 kanat profilinin Spalarat Almaras ve SST k- ω türbülans modelleri ile hesaplanan C_L değerleri deneysel veriler kullanılarak karşılaştırılmıştır (Bertagnolio, Sørensen, Johansen ve Fuglsang, 2001). SST k- ω türbülans modeli ile elde edilen sonuçlar deneysel C_L değerlerine daha uyum olduğu için iki boyutlu ve üç boyutlu çalışmalarda SST k- ω türbülans modeli kullanılmıştır.

Yeni üretilen kanat profilleri ile ilgili iki boyutlu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde etmiştir.

- Kanat profilinin alt ve üst yüzeyinde değişiklikler bu yüzeylerdeki akış hızını ve basıncı etkilemektedir.
- Kanat profili geometrisinde yapılan değişiklikler kanadın alt ve üst yüzeyi arasında basınç farkını artırarak rüzgâr türbinin aerodinamik performansını iyileştirmektedir.
- Standart NACA 63-415 kanat profilinin alt yüzeyinin azaltılması ile üretilen yeni profiller 12° hücum açısına kadar standart NACA 63-415 kanat profiline göre C_L/C_D değerini artırmıştır.
- Maksimum C_L/C_D değeri yaklaşık 7° hücum açısında NCAY 30 kanat profili ile elde edilmiştir.

İkinci aşamada kanat uzunluğu boyunca 1 m aralıklarla oluşturan düzlemlere, hesaplanan optimum veter uzunluğunda ve bağlama açısında profiller yerleştirilerek SOLIDWORKS programında Loft komutu ile katı kanat modelleri üretilmiştir. Oluşturulan üç boyutlu kanat geometrileri ile kanat uç hız oranında, kanat açısında, kanat uzunluğunda ve kanat yüzeyindeki değişimin aerodinamik performansa etkisi araştırılmıştır.

Farklı tasarım uç hız oranlarında ($\lambda_{\text{tasarım}} = 4-8$) üretilen NACA 63-415 türbin kanadı modellerinin aerodinamik performansa etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar tasarım uç hız oranında artışın güç oranı (C_p) değerini artırdığı göstermiştir. Maksimum C_p değeri $\lambda_{\text{tasarım}} = 8$ ile elde edilmiştir. Ayrıca 4-16 m/s rüzgâr hızlarında oluşturulan NACA 63-415 kanat modellerinin güç ve tork değerleri hesaplanmıştır. En yüksek güç ve tork değerleri $\lambda_{\text{tasarım}} = 8$ olan kanat modelinde ve 16 m/s rüzgâr hızında elde edilmiştir. $\lambda_{\text{tasarım}} = 8$ ile maksimum güç ve tork elde edilmişken mevcut literatürde $\lambda_{\text{tasarım}} = 6-7$ için türbin kanadının aerodinamik performansının optimum olduğu görülmüştür. Bu nedenle sayısal analizlerde $\lambda_{\text{tasarım}} = 7$ alınmıştır.

NACA 63-415 kanat modeli kullanılarak 12 m/s rüzgâr hızında kanat açılarındaki değişimin ($57^\circ-66^\circ$) türbin torkuna ve gücüne etkisi araştırılmıştır. Kanat açısı artıkça güç ve tork değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. En yüksek tork ve güç değerleri 57° kanat açısında elde edilmiştir.

Mevcut kanat uzunluğunun ($R = 20$ m) %25 artırılması ve %25 azaltılması ile oluşturulan sırasıyla $R = 15$ m ve $R = 25$ m uzunluğundaki yeni NACA 63-415 kanat modellerinin 4-12

m/s rüzgâr hızlarında aerodinamik performansa etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar en yüksek tork ve güç değerlerinin 12 m/s rüzgâr hızında 25 m uzunluğunda kanat modeli ile elde edildiğini göstermiştir.

$\lambda_{\text{tasarım}}=7$ ve 4-16 m/s rüzgâr hızlarında standart NACA 63-415, NCAY 30 ve standart NACA 63-415 kanat profilinin alt ve üst yüzeyi %30 azaltılarak oluşturulan NCAYÜY 30 kanat modellerinin aerodinamik performansa etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar standart NACA 63-415 kanat modeline göre yeni kanat modellerinin kanat arka yüzeylerindeki basıncı ve kanadın uç kısmında hızı iyileştirdiğini göstermiştir. Maksimum hız NACA 63-415 kanat modeline göre NCAYÜY 30 kanat modelinde %7,2 artmıştır. Tüm kanat modellerinde rüzgâr hızı arttıkça tork, güç ve C_p değeri artmıştır. Maksimum tork, güç ve C_p değeri 16 m/s rüzgâr hızında arka yüzey ile ön yüzey arasında basınç farkını ve uç kısmında kanat hızını artıran NCAYÜY 30 kanat modeli ile elde edilmiştir. Maksimum C_p değeri 0,511 olarak bu kanat modeli ile elde edilmiştir ve standart NACA 63-415 kanat modeline göre C_p değeri %10,62 artmıştır.

Sonuç olarak bu çalışmada yatay eksenli rüzgâr türbini kanadının performansının kanat uzunluğu, açısı, uç hız oranı ve yüzey geometrisi gibi birçok parametreye bağlı olduğu anlaşılmıştır. Gelişmiş HAD paket programları bu parametrelerinin birbirleri ile etkileşimleri ve kanat optimizasyonu ile ilgili çok yararlı bir test ortamı sağlamaktadır. Bu çalışmada rüzgâr türbini kanadı tasarımında kullanılan iki aşamalı yöntem rüzgâr türbini kanadı ile ilgili ileride yapılacak çalışmalara yardımcı olacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada bilgisayar ortamında geliştirilen NCAYÜY 30 kanadı üretilerek rüzgâr tüneline deneysel analizleri yapılarak hesaplanan C_p değerlerinin deneysel verilerle doğrulanmasının yapılması yararlı olacaktır. Ayrıca kanat üzerinde akışı etkileyen önemli bir parametre olan kanat yüzeyi pürüzlülüğün yeni üretilen kanatların aerodinamik performansına etkisi ileriki aşamada araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abbas, Z., Abbas, S., Butt, Z., & Pasha, R. A. (2018). Design and Parametric Investigation of Horizontal Axis Wind Turbine. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 23(3), 345-351.
- Altaee, A., Khlaifat, N., Zhou, J., & Huang, Y. (2020). A review of the key sensitive parameters on the aerodynamic performance of a horizontal wind turbine using Computational Fluid Dynamics modelling. *AIMS Energy*, 8(3), 493–524.
- Anderson, C. (2020) *Wind Turbines: Theory and Practice*, UK: Cambridge University Press, 322.
- ANSYS FLUENT 19.2 (2018) Theory Guide, *Ansys Inc.*, Canonsburg PA, USA.
- Apaydın, M., Üstün, A. K., Kurban, M., & Filik, Ü. B. (2009). *Rüzgâr Enerjisinde Kullanılan Asenkron Jeneratörler*. V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Diyarbakır.
- Aşkan, A., Tangöz, S. (2018). The impact of aspect ratio on aerodynamic performance and flow separation behavior of a model wing composed from different profiles. *Journal of Energy Systems*. 2(4), 224-237.
- Ataseven, M.S. ve Ataseven, S., (2009). *Rüzgâr Ölçüm Sistemleri*. II. Rüzgâr Enerjisi Sempozyumu, Samsun.
- Aubrun, S., Leroy, A., & Devinant, P. (2017). A review of wind turbine-oriented active flow control strategies. *Experiments in Fluids*, 58(10), 1-21.
- Avcı, B., Yılmaz, T. B. 2012. *Rüzgâr Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi*. Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- Bai, C. J., & Wang, W. C. (2016). Review of computational and experimental approaches to analysis of aerodynamic performance in horizontal-axis wind turbines (HAWTs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 506-519.
- Bakırcı, M., & Yılmaz, S. (2018). Theoretical and computational investigations of the optimal tip-speed ratio of horizontal-axis wind turbines. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(6), 1128-1142.
- Baydemir, T. (2020). Epoksi Reçine Teknolojileri. *TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*, 2020(Aralık), 24-33.
- Bertagnolio, F., Sørensen, N., Johansen, J., & Fuglsang, P. (2001). *Wind turbine airfoil catalogue*. Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R No. 1280(EN), 50-57.
- Cam Elyaf San. A.Ş.. (2018). *CTP Teknolojisi*, Kocaeli:Cam Elyaf Sanayii Yayınları.

- Campbell, F. C. (2010). *Structural composite materials*. USA: ASM international, 39-48.
- Douvi, E. C., & Margaris, D. P. (2012, July). *Aerodynamic characteristics of s809 vs. NACA 0012 airfoil for wind turbine applications*. In Proceedings of the 5th International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering, 5th IC-SCCE, Greece.
- Douvi, E. C., & Margaris, D. P. (2014). *Computational Study Of The Flow Over a Horizontal Axis Wind Turbine Rotor*. 6 th International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering, 6 th IC-SCCE, Athens.
- Durgun, İ. (2014). *El Yatırma Yöntemi ile Kompozit Parça Üretimi*, 7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Ankara
- Düz, H. (2016). Rüzgâr türbinleri için farklı kanat profillerinin sayısal olarak test edilmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 4(2), 41-51.
- Elibüyük, U. ve Üçgül, İ. (2014). Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri. *SDÜ Yekarum e-Dergi*, 2(3).
- Eltayesh, A., Castellani F., Burlando M., Hanna, M. B., Huzayyin A. S., El-Batsh H. M., & Becchetti M. (2021). Experimental and numerical investigation of the effect of blade number on the aerodynamic performance of a small-scale horizontal axis wind turbine. *Alexandria Engineering Journal*, 60(4), 3931-3944.
- Erişen, A., & Bakırcı, M. (2014). NACA 0012 ve NACA 4412 Kanat kesitlerinin yeniden tasarlanarak HAD ile analiz edilmesi. *Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2(1), 50-82.
- Görgülü, Y. F., Özgür, M. A., & Köse, R. (2021). CFD analysis of a NACA 0009 aerofoil at a low Reynolds number. *Politeknik Dergisi*, 24(3), 1237-1242.
- Güleren, K. M., & Demir, S. (2011). Rüzgâr türbinleri için düşük hücum açılarında farklı kanat profillerinin performans analizi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 31(2), 51-59.
- Gülmez, S. (2018). *Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler*. Tezsiz Yüksek Lisans Projesi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Hansen, Martin O.L. (2008) *Aerodynamics of Wind Turbine* (Second Edition). UK and USA: Earthscan, 162-166.
- Hasan, M. M., El-Shahat, A., & Rahman, M. (2017). Performance investigation of three combined airfoils bladed small scale horizontal axis wind turbine by BEM and CFD analysis. *Journal of Power and Energy Engineering*, 5(5), 14-27.
- İnternet: Anadolu Balata. URL: <http://www.anadolubalata.com/ruzgar-turbin-ve-hidro-elektrik-santral-balatalari>. Son Erişim Tarihi: 16.11.2022

- İnternet: Dursun, E. ve Kakilli, A. Türkiye’de Kurulu Rüzgâr Santrallerinde Kullanılan Generatörlerin Karşılaştırılması. URL: https://www.emo.org.tr/ekler/d7f9a33892ed921_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=7. Son Erişim Tarihi: 16.11.2022
- İnternet: Enerji Gazetesi.ist. URL: <https://www.enerjigazetesi.ist/en/ruzgar-turbini-kulesi-ureten-sirket-ihracata-basladi/>. Son Erişim Tarihi: 16.11.2022
- İnternet: Küçükkaya, E. (2019). “Rüzgâr Türbini Bileşenleri Nelerdir?”, URL: <https://www.enerjiportali.com/ruzgar-turbini-nedir-ruzgar-turbini-cesitleri-nelerdir/>. Son Erişim Tarihi: 16.11.2022
- İnternet: Leblebicioğlu, E. (2020). Rüzgâr Türbini Nedir? Nasıl Çalışır?. URL: <https://www.muhendisbeyinler.net/ruzgar-turbini-nedir-nasil-calisir/>. Son Erişim Tarihi: 16.11.2022
- İnternet: SCHAEFFLER. URL: https://www.schaeffler.com.tr/tr/products-and-solutions/industrial/end%C3%BCstriyel/r%C3%BCzgar_sekt%C3%B6r%C3%BC_grubu/r%C3%BCzgar/r%C3%BCzgar_izleme_ve_kanat_ayarlama/. Son Erişim Tarihi: 16.11.2022
- İnternet: Wikipedia. URL: https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Mod-2_Wind_Turbine_Cluster3.jpg. Son Erişim Tarihi: 16.11.2022
- İnternet: Yaşar Üniversitesi Haber Portalı. URL: <https://haber.yasar.edu.tr/genel/yenilenebilir-enerji-izmirde-masaya-yatirildi.html>. Son Erişim Tarihi: 16.11.2022
- Ji, B., Zhong K., Xiong, Q., Qiu, P., Zhang, X., & Wang, L. (2022). CFD simulations of aerodynamic characteristics for the three-blade NREL Phase VI wind turbine model. *Energy*, 249, 123670.
- Karabağ, S. (2011). *Rüzgâr Türbini Kanadı İmalatı*. İzmir Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi, İzmir.
- Karasu, İ., Özden, M., & Genç, M. S. (2018). Performance assessment of transition models for three-dimensional flow over NACA4412 wings at low Reynolds numbers. *Journal of Fluids Engineering*, 140(12), 1-15.
- Kaya, K. ve Koç, E., (2015). Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kanat Profil Tasarımı ve Üretim Esasları. *Mühendis ve Makina*, 56(670), 38-48.
- Keerthana, M., Sriramkrishnan, M., Velayutham, T., Abraham, A., Rajan, S. S., & Parammasivam, K. M. (2012). Aerodynamic analysis of a small horizontal axis wind turbine using CFD. *Journal of Wind and Engineering*, 9(2), 14-28.
- Koç, E ve Şenel, M. C., (2016). Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Optimum Türbin Parametrelerinin Belirlenmesi-Teorik Yaklaşım, *Mühendis ve Makina*, 57(676), 32-40.

- Kody, S., Alpman, E. & Yılmaz, B. (2015). Computational Studies of Horizontal Axis Wind Turbines Using Advanced Turbulence Models. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 26 (2), 30-40
- Krogstad, P. Å., & Lund, J. (2012). An experimental and numerical study of the performance of a model turbine, *Wind Energy*, 15 (3), 443-457.
- Kumar, B. A., Ramalingaiah, D. S., & Ganganna, R. 2015. Computational Investigation of Flow Separation in Incompressible Aerodynamic Regime. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, 4(2), 470-476.
- Langtry, R. B., & Menter, F. R. (2009). Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes. *AIAA journal*, 47(12), 2894-2906.
- Memiş, Ö., (2009). *Balistik Amaçlı Fiber Takviyeli Polimer Matriksli Kompozitler*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Menter, F. R., (1994). Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605.
- Mohamed, E. A., Abdellatif, O. E., & Osman, A. M. (2021). Experimental and numerical investigation into effect of different blade configurations on performance of small-scale wind turbines. *Energy Reports*, 7(3), 138-143.
- Nak, H., (2013). *Değişken Hızlı Değişken Açılı Rüzgâr Türbinlerinin Kontrolü*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Nigam, P. K., Tenguria, N., & Pradhan, M. K. (2017). Analysis of horizontal axis wind turbine blade using CFD. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 9(2), 46-60.
- Nurbay, N. ve Çınar, A. (2005). *Rüzgâr Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması*. III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Kayseri.
- O'Brien, J. M., Young, T. M., O'Mahoney, D. C., & Griffin, P. C. (2017). Horizontal axis wind turbine research: A review of commercial CFD, FE codes and experimental practices. *Progress in Aerospace Sciences*, 92, 1-24.
- Olayemi, O. A., Ogunwoye, O. V., Olabemiwo, J. T., Jinadu, A., & Odetunde, C. (2021). *Analysis of Flow Characteristics around an Inclined NACA 0012 Airfoil Using Various Turbulence Models*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1107(1), 012133.
- Onat, C., Kepçeler, T. ve Orgül, B.O., (2004). Rüzgâr Türbini Kanatlarının Katı Modellemesi, *Mühendis ve Makine*, 45(533), 41-47.

- Özkan, M., & Erkan, O. (2022). Control of a boundary layer over a wind turbine blade using distributed passive roughness. *Renewable Energy*, 184, 421-429.
- Potuk, K. B. 2015. *Rüzgâr Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi*. Yayımlanmamış Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- Rathore, A. S., & Ahmed, S. (2012). Aerodynamic Analysis of Horizontal Axis Wind Turbine By Differential Blade Airfoil Using Computer Program. *IOSR Journal of Engineering*, 2(1), 118.
- Ravi H.C., Madhukeshwara N. and Kumarappa S. (2013) 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), 2778-2785.
- Rehman, S., Alam, M. M., Alhems, L. M., & Rafique, M. M. (2018). Horizontal axis wind turbine blade design methodologies for efficiency enhancement—A review. *Energies*, 11(3), 506.
- Rodriguez, C. V., & Celis, C. (2022). Design optimization methodology of small horizontal axis wind turbine blades using a hybrid CFD/BEM/GA approach. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(6), 1-25.
- Shourangiz-Haghighi, A., Haghnegahdar, M. A., Wang, L., Mussetta, M., Kolios, A., & Lander, M. (2020). State of the art in the optimisation of wind turbine performance using CFD. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(2), 413-431.
- Soğukpınar, H. (2017). Numerical simulation of 4-digit inclined NACA 00xx airfoils to find optimum angle of attack for airplane wing. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(1), 169-178.
- Spalart, P., & Allmaras, S. (1992). A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *In 30th aerospace sciences meeting and exhibit*, 439.
- Şahin, İ. & Acır, A. (2015). Numerical and experimental investigations of lift and drag performances of NACA 0015 wind turbine airfoil. *International Journal of Materials, Mechanics, and Manufacturing*, 3(1), 22-25
- Şenel, M. C., & Koç, E., (2014). Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin Dinamik Davranışı-Teorik Bir Model, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 5(1), 69-80.
- Şentürk, U. (2007). *Bir Rüzgâr Türbininin Performansının Analitik ve Nümerik Olarak İncelenmesi* Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Tanürün, H. E., Ata, İ., Canlı, M. E., & Acır, A. (2020) “Farklı açıklık oranlarındaki NACA-0018 rüzgâr türbini kanat modeli performansının sayısal ve deneysel incelenmesi,” *Politeknik Dergisi*, 23(2), 371-381

- Tong, W. (2010). *Wind power generation and wind turbine design*. USA: WIT press, 277-278.
- Turgut, T., Kayran, A., Alemdaroğlu, N., & Ceylan, M. (2007). Vakum Torbalama Yöntemi İle Kompozit Malzemeden Yapı Üretimi Örnek Bir Havacılık Uygulaması. *Mühendis ve Makina*, 48(566), 14-21.
- Uysal, A., (2008). *Rüzgâr Türbini Kanat Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Üzüm, K. (2015). *Yeni Nesil Teknoloji Kullanarak Küçük Güçlü Rüzgâr Türbini Tasarımı ve Bilgisayar Destekli Analizi*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Yılmaz, İ., Çam, Ö., Taştan, M., & Karcı, A. (2016). Farklı Rüzgâr Türbin Kanat Profillerinin Aerodinamik Performansının Deneysel İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 19(4), 577-584.
- Yossri, W., Ayed, S. B., & Abdelkefi, A. (2021). Airfoil type and blade size effects on the aerodynamic performance of small-scale wind turbines: Computational fluid dynamics investigation. *Energy*, 229, 120739.
- Zhou, F., & Liu, J. (2018). *Pitch controller design of wind turbine based on nonlinear PI/PD control*. Shock and Vibration, 2018, 14.
- Zhu, W. J., Shen, W. Z., & Sørensen, J. N. (2014). Integrated airfoil and blade design method for large wind turbines. *Renewable Energy*, 70, 172-183.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Hakan İNAN
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti

Eğitim Derecesi	Okul/Program	Mezuniyet Yılı
Lisans	Aksaray Üniversitesi	2015
Yüksek Lisans	Amasya Üniversitesi	2022
İş Deneyimi/Yıl	Çalıştığı Yer	Görevi
2015-	Amasya Şeker Fabrikası A.Ş.	Bakım Onarım

Yabancı Dili

İngilizce