



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK KAPASİTELİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ**  
**İÇİN FARKLI KANAT PROFİLLERİNİN HAD**  
**YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

**Mohamed DWEDAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalını**

**Nisan 2023**

**KONYA**

**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Mohamed DWEDAR tarafından hazırlanan “Yüksek Kapasiteli Rüzgâr Türbinleri İçin Farklı Kanat Profillerinin HAD Yöntemi İle İncelenmesi” adlı tez çalışması 03/04 /2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Hüseyin KURT

#### Danışman

Doç. Dr. Faruk KÖSE

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Muharrem Hilmi AKSOY

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN  
Enstitü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all materials and results that are not original to this work.

İmza

Mohamed DWEDAR

Tarih: 03.04.2023

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## YÜKSEK KAPASİTELİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN FARKLI KANAT PROFİLLERİNİN HAD YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

**Mohamed DWEDAR**

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Faruk KÖSE**

**2023, 83 Sayfa**

**Jüri**

**Doç. Dr. Faruk KÖSE  
Prof. Dr. Hüseyin KURT  
Dr.Öğr.Üyesi Muharrem Hilmi AKSOY**

Günümüzde rüzgâr türbinleri için Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği (HAD) simülasyonları türbin ölçeğinde sayısal simülasyonlara ve model tabanlı optimizasyonlara odaklanmaktadır. Bu çalışmada farklı büyük türbin güçleri (10, 25 ve 50 MW) için iki farklı kanat profilleri (NACA 2414, 4415) ile imal edilecek türbinlerin kanat ve bazı ana parçalarının boyutlarının tasarımı yapılmıştır. Her bir türbin 11-14 m/s nominal rüzgâr hızları için tasarım hesapları ve HAD analizleri yapılmıştır. Hareket halindeki türbinin dinamik analizi ile rüzgâr yükünü daha fazla taşıyan ve rüzgâr enerjisi üretiminde daha verimli olan kanatlar HAD yöntemiyle incelenmiştir. Tezde, verimlilik, yıllık elektrik enerjisi üretim miktarı, kanat ve türbin üzerindeki rüzgâr yükleri açısından büyük yüklere sahip rüzgâr türbinleri için uygun kanatların ve diğer ana parçaların seçilmesi araştırma temeli olarak alınmıştır. Referans alınan büyük rüzgâr türbini kanat profillerini seçmek için bir model olmaktadır. Büyük rüzgâr türbinleri tasarlanırken önce kanatların tasarımı yapılmış ve akış analizi ve en iyi seçimi detaylı bir şekilde incelenmiştir. 10 MW'lık rüzgâr türbininde, NACA 4415 profiline sahip olan türbin 11.5 m/s'lik bir rüzgâr hızında en yüksek enerji üretimine ulaşmaktadır. Buna karşılık, NACA 2215 profili olan rüzgâr türbini ise 14.5 m/s'lik bir rüzgâr hızında en yüksek enerji üretimine ulaşmaktadır. 50 MW'lık rüzgâr türbininde kanat uzunluğunun 250 m, ağırlığının 480-500 ton civarında olacağı ve yüksek merkezkaç kuvvetlerin oluşmaması için de rotor dönüş hızının da 0.2-0.8 d/d olması gerektiği bulunmuştur. Her iki NACA profilinden tasarlanmış kanatlar üzerinde oluşan kuvvetler analiz edildiğinde, göbekten kanadın %15 uzaklığında olan kısmın mukavemet açısından en hassas kısım olduğunu göstermiştir. Kanadın bu kısmını takviye etmek için karbon fiber gibi cam elyaftan daha hafif ve daha mukavemetli malzemelerle desteklenmelidir sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji, HAD, Rüzgâr Türbini, Türbin kanadı, Yenilebilir Enerji

**ABSTRACT**

**MS THESIS**

**INVESTIGATION OF DIFFERENT BLADE PROFILES FOR HIGH-CAPACITY  
WIND TURBINES BY CFD METHOD**

**Mohamed DWEDAR**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Mechanical Engineering**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Faruk KÖSE**

**2023, 83 Pages**

**Jury**

**Assoc.Prof. Dr. Faruk KÖSE  
Prof. Dr. Hüseyin KURT  
Asst.Prof.Dr. Muharrem Hilmi AKSOY**

Nowadays, CFD simulations for wind turbines focus on numerical simulations and model-based optimizations at the turbine scale. In this study, the dimensions of the blades and some main parts of the turbines to be manufactured with two different airfoils (such as NACA 2414, 4415) for different large turbine powers (10, 25 and 50 MW) are designed. The design calculations and CFD analyses of each turbine were performed for nominal wind speeds of 11-14 m/s. By dynamic analysis of the turbine in motion, the blades that carry more wind load and are more efficient in wind energy production are analysed by CFD method. In the thesis, the selection of suitable blades and other main parts for wind turbines with large and medium loads in terms of efficiency, annual electrical energy production amount, wind loads on the blade and turbine is taken as the basis of research. The reference large wind turbine serves as a model for selecting the airfoils. When designing large wind turbines, the blades are first designed and the flow analysis and optimal selection are studied in detail. In the 10 MW wind turbine, the turbine with the NACA 4415 profile achieves the highest energy production at a wind speed of 11.5 m/s. In contrast, the wind turbine with the NACA 2215 profile achieves the highest energy production at a wind speed of 14.5 m/s. For a 50 MW wind turbine, it was found that the blade length would be 250 m, the weight would be around 480-500 tons and the rotor rotation speed should be 0.2-0.8 rpm to avoid high centrifugal forces. When the forces on the blades designed from both NACA profiles were analysed, it was found that the part of the blade 15% away from the hub was the most vulnerable in terms of strength. It was concluded that this part of the wing should be reinforced with lighter and stronger materials than glass fiber, such as carbon fiber.

**Keywords:** Energy, CFD, Renewable Energy, Wind Turbine blade

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, enerji analiz yöntemlerini geliştirme isteği ile öz tutku ve motivasyonla hazırlanmıştır. Bu çalışmada, rüzgar türbini kanat profillerini analiz etmek ve seçmek için en etkili yollar kullanılmıştır. Bir sonraki rüzgar türbini tasarım ve imalatlarında bu büyük kapasiteli rüzgar türbinlerinin okyanuslarda yaygın olarak kullanılması ve doğru sonuçların alınabilmesi için HAD yönteminin yaygın olarak kullanılması gerekmektedir.

This study has been prepared with self-passion motivation and a desire to improve energy analysis methods all over the world. In this study, the most effective ways have been used to analyse and select the most effective wind turbine blades profiles. In the next wind turbine design and manufacturing, these large capacity wind turbines should be widely used in the oceans and CFD method should be widely used in order to obtain accurate results.

Mohamed DWEDAR  
Konya, 2023

# İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI .....	ii
TEZ BİLDİRİMİ.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER.....	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	9
3.1. Rüzgâr Türbini Kanadı Tasarımı.....	9
3.1.1. Rüzgâr türbinleri kanadın malzemesinin seçimi .....	10
3.2. Rüzgâr Türbinin Materyal Seçimi.....	11
3.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi.....	12
3.3.1. Süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri.....	15
3.4. Gerekli Güç Tasarımı .....	17
3.6. Konum Seçimi, Arazi ve Denizin Potansiyeli.....	18
3.7. Rüzgâr Türbini Kulesi Tasarımı .....	18
4. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN TASARIM VE ANALİZİ.....	20
4.1. Rüzgâr Türbinleri Kanat Profilinin Seçimi.....	20
4.2. 10 MW Güçteki Rüzgâr Türbininin Analizleri .....	25
4.2.1. Kanatları 4415 NACA profile sahip 10 MW'lık rüzgar türbininin analizi.....	26
4.2.1.1. NACA 4415 10 MW rüzgar türbininin yıllık enerji üretimi .....	31
4.2.2. NACA 2215 profilli 10 MW'lık rüzgâr türbininin analizi.....	32
4.2.2.1. NACA 2215 10 MW'lık rüzgar türbininin yıllık enerji üretimi.....	38
4.2.4. 10 MW'lık rüzgâr türbininin mukavemet analizi .....	39
4.2.4. 10 MW'lık rüzgar türbininin mil tasarımı ve mukavemet analizi .....	42
4.3. 25 MW'lık Rüzgâr Türbininin Analizi.....	43
4.3.1. NACA 4415 profili ile 25 MW'lık Rüzgar Türbininin Analizi.....	44
4.3.1.1. NACA 4415 25 MW'lık rüzgar türbininin yıllık enerji üretimi.....	49
4.3.2 NACA 2215 profili ile 25 MW'lık Rüzgar Türbininin Analizi.....	49
4.3.2.1. NACA 2215 25 MW'lık rüzgar türbininin yıllık enerji üretimi .....	56
4.3.3. 25 MW'lık rüzgar türbini ile farklı rüzgar hızlarında elde edilen güçler.....	56
4.3.4. 25 MW'lık rüzgar türbininin mukavemet analizi .....	56
4.4. 50 MW'lık Rüzgâr Türbininin Analizi.....	60

4.4.1. 4415 NACA profil ile 50 MW'lık rüzgar türbinin analizi .....	61
4.4.1.1. NACA 4415 50 MW'lık rüzgâr türbinin yıllık enerji üretimi.....	65
4.4.2. NACA 2215 profil kanatlı 50 MW'lık rüzgâr türbininin analizi.....	66
4.4.2.1. NACA 2215 kanat profili 50 MW rüzgar türbinin yıllık enerji üretimi.....	72
4.2.4. 50 MW'lık rüzgar türbininin ana mili tasarımı ve mukavemet analizi .....	75
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....	77
5.1. Sonuçlar.....	77
5.2. Öneriler .....	81
KAYNAKLAR .....	82





## SİMGELER VE KISALTMALAR

### SİMGELER

$\alpha$	: hücum açısı ( $^{\circ}$ )
$A$	: süpürme alanı ( $m^2$ )
$g$	: yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ )
$C_D$	: sürüklenme katsayısı
$C_L$	: kaldırma katsayısı
$C_P$	: güç katsayısı
$P$	: güç (W)
$\rho$	: havanın yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
$R$	: kanat yarıçapı (m)
$Re$	: Reynolds sayısı
$U$	: hız (m/s)
$U_{\infty}$	: serbest akış hızı (m/s)
$\lambda$	: uç hız oranı
$\Omega$	: dönme hızı (rad/s)
$Q$	: tork (Nm)
$P_{r_{ss}}$	: eğiklik başlama kesitinin radyal uzaklığının kanat yarıçapına oranı
$P_s$	: uç deplasman miktarının kanat yarıçapına oranı
$\mu$	: dinamik viskozite ( $kg/m \cdot s$ )
$\nu$	: kinematik viskozite ( $m^2/s$ )

### KISALTMALAR

BEM	Kanat Elemanı Momentum Metodu
DERT	Dikey Eksenli Rüzgar Türbini
YAW	Rüzgar türbinini rüzgar yönüne döndüren mekanizma
YERT	Yatay Eksenli Rüzgar Türbini
RT	Rüzgar Türbini

## ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Rüzgâr enerji potansiyeli.....	18
Çizelge 4.1. 10 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilli kanat boyut değerleri.....	27
Çizelge 4.2. 10 MW'lık rüzgar türbinin NACA 2215 profilli kanat boyut değerleri.....	32
Çizelge 4.3. 10 MW'lık rüzgar türbini farklı rüzgar hızlarında üretilen güç.....	39
Çizelge 4.4. 10 MW'lık rüzgar türbinin farklı NACA profillerin üzerindeki basınç.....	43
Çizelge 4.5. 10 MW'lık rüzgar türbin'inin rotor milin özellikleri.....	44
Çizelge 4.6 NACA 2215 Kanat profilin 25 MW'lık RT Çizelgesi .....	49
Çizelge 4.7. 25 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilli kanat boyut değerleri .....	55
Çizelge 4.8. NACA 2215 kanat profilin 25 MW'lık rüzgar türbinin değerleri .....	57
Çizelge 4.9. 25 MW'lık rüzgar türbini ile farklı rüzgar hızlarında üretilen güç.....	59
Çizelge 4.10. 25 MW'lık rüzgar türbini farklı NACA profillerin üzerindeki gerilme basıncı .....	59
Çizelge 4.12 25 MW'lık rüzgar türbininin rotor milin torku [kNm].....	60
Çizelge 4.13. 50 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilli kanadı değerler çizelgesi.....	65
Çizelge 4.14. NACA 2215 kanat profilin 50 MW'lık rüzgar türbinin değerler çizelgesi.....	71
Çizelge 4.15. 50 MW'lık rüzgar türbinin üretilen güç farklı rüzgâr hızlarında.....	73
Çizelge 4.16. 50 MW'lık rüzgar türbinin farklı NACA profillerinde üzerindeki gerilme basıncı değerleri	
Çizelge 4.17 50 MW'lık rüzgar türbininin rotor milin özellikleri.....	75
Çizelge 4.18 50 MW'lık rüzgar türbininin rotor milin mukavemet analizi.....	75
Çizelge 5.1. Farklı rüzgar türbinlerin kulesinin et kalınlığı.....	78
Çizelge 5.2. 10, 25 ve 50 MW'lık türbinlerin farklı rüzgar hızlarında ve farklı türbin kanat profillerinde elde edilen güçler.....	79
Çizelge 5.3 Farklı türbin güçleri (10, 25 ve 50 MW) ve devir sayılarında rüzgar türbinlerinin millerinde elde edilen torklar [kNm].....	80

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Türbin kanadı profili kesiti kısımları (Corke, 2018).....	9
Şekil 3.2. Kanadın malzemesi ve kompozisyonu (Anonymous, 2022).....	11
Şekil 3.3. ANSYS programı ile NACA profilin tasarımı (ANSYS, 2023) ).....	14
Şekil 3.4. 2215 NACA profilin kanadı etkiyen mukavemetin analizi (Qblade, 2022).....	15
Şekil 3.5. Rüzgâr Türbinin Akışkan analizi (Qblade, 2022).....	16
Şekil 3.6. ANSYS Fluent Rüzgar Türbin kanadın sınır şartları.....	18
Şekil. 3.7. ANSYS fluentte ağ yapısı (meshing).....	18
Şekil 3.7. Rüzgâr türbin kulesinin segmentleri.....	19
Şekil 4.1. NACA 4415 kanat profilinin görünümü ve karakteristik değerleri (QBlade, 2022).....	21
Şekil 4.2. NACA 4415 kanadın profilin sürüklenme ile kaldırma katsayıları (QBlade, 2022).....	22
Şekil 4.3. NACA 4415 kanadın profili Sürüklenme ve Kaldırma katsayıları (QBlade, 2022).....	22
Şekil 4.4. NACA 4415 eğim açısı [Alfa], Kaldırma ( $C_l$ ) ve Sürüklenme ( $C_d$ ) Katsayıları (QBlade, 2022).....	23
Şekil 4.5. NACA 2215 profilin tasarımı (QBlade, 2022).....	23
Şekil 4.6. NACA 2215 kanadın profilin Sürüklenme ve Kaldırma katsayıları (QBlade, 2022).....	24
Şekil 4.7. NACA 2215 kanadın profili sürüklenme ile Kaldırma katsayıları (QBlade, 2022).....	24
Şekil 4.8. NACA 2215 eğim açısı [Alfa], Kaldırma ve sürüklenme katsayıları (QBlade, 2022).....	25
Şekil 4.9. NACA 2215-4415 profilin gürültü frekansı (QBlade, 2022).....	25
Şekil 4.10. 10 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilin kanadı.....	28
Şekil 4.11. Elde edilebilen güç ve rüzgar hızı ilişkisi.....	28
Şekil 4.12. 10 MW'lık rüzgâr türbinin NACA 4415 profilin kanadı mukavemetin analizi.....	29
Şekil 4.13. NACA 4415 profili 10 MW rüzgar türbinin akış analizi.....	30
Şekil 4.14. 10 MW'lık rüzgâr türbinin NACA 4415 profilin güç katsayısı.....	31
Şekil 4.15. 10 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilin hücum açısı.....	31
Şekil 4.16. 10 MW'lık rüzgar türbinin 2215 NACA profilin kanatları.....	32
Şekil 4.17.-Elde edilebilen güç ve rüzgâr hızı ilişkisi.....	33
Şekil 4.18. 10 MW'lık rüzgâr türbinin 2215-4415 NACA profilin üzerindeki itme kuvveti.....	33
Şekil 4.19. 10 MW'lık rüzgâr türbinin 2215 NACA profilin kanatların mukavemet analizi.....	34
Şekil 4.20. NACA 2215 profili 10 MW'lık rüzgâr türbinin akış analizi.....	35
Şekil 4.21. 10 MW'lık rüzgar türbinin güç katsayısı farklı NACA profillerinde.....	36
Şekil 4.22. Hücum açısı ve rotor çapı ilişkisi.....	37
Şekil 4.23. NACA 2215-4415 profillerinde elde edilebilen güç.....	38
Şekil 4.24. ANSYS fluent programıyla NACA 4415 profilin kanadın üzerindeki akış analizi.....	40
Şekil 4.25. ANSYS fluent programıyla NACA 2215 profilin kanadın üzerindeki akış analizi.....	40
Şekil 4.26. 10 MW'lık rüzgar türbinin farklı kanat profillerin basınç analizi.....	45
Şekil 4.27. 25 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilin kanatları.....	45
Şekil 4.28. 25 MW'lık rüzgar türbinin 4415 NACA profilin kanatların mukavemet analizi.....	48
Şekil 4.29. 25 MW'lık rüzgar türbininin NACA 4415 profili elde edilebilen güç [kW].....	48
Şekil 4.30. 25 MW'lık rüzgar türbinin 4415 NACA profilin üzerindeki itme kuvveti.....	50
Şekil 4.31. NACA 4415 profili 25 MW'lık rüzgar türbinin simülasyonun analizi.....	52
Şekil 4.32. 25 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilin güç katsayısı.....	52
Şekil 4.33. 25 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilin hücum açısı.....	47
Şekil 4.34. 25 MW'lık rüzgar türbinin NACA 2215 profilin kanatları.....	49
Şekil 4.35. 25 MW'lık rüzgar türbinin 2215 NACA profilin kanatların mukavemet analizi.....	50
Şekil 4.36. 25 MW'lık rüzgar türbinin NACA 2215-4415 profili elde edilebilen güç [kW].....	50
Şekil 4.37. 25 MW'lık rüzgâr türbininin 2215-4415 NACA profilin üzerindeki itme kuvveti.....	52
Şekil 4.38. NACA 2215 profili 25 MW'lık rüzgar türbininin analizi.....	53
Şekil 4.39. 25 MW'lık rüzgar türbinin NACA 2215 profilin güç katsayısı.....	54
Şekil 4.40. 25 MW'lık rüzgar türbinin NACA 2215 profilin hücum açısı.....	54
Şekil 4.41. ANSYS Fluent programıyla NACA 2215 profili 25 MW'lık rüzgâr türbinin kanat profillerinin akışkan analizi.....	56
Şekil 4.42. ANSYS Fluent programıyla NACA 4415 profili 25 MW'lık rüzgâr türbinin kanat profillerinin akışkan analizi.....	56
Şekil 4.43. 25 MW'lık rüzgar türbinin farklı kanat profillerin basınç analizi.....	58
Şekil 4.45. 50 MW'lık rüzgar türbininin NACA 4415 profilin kanadı ile elde edilebilen güçler [kW].....	61
Şekil 4.46. 50 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilin mukavemetin analizi.....	62
Şekil 4.47. NACA 4415 profili 50 MW'lık rüzgar türbininin simülasyonun analizi.....	63

<b>Şekil 4.48.</b> 50 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilin güç katsayısı.....	64
<b>Şekil 4.49.</b> 50 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilin hücum açısı.....	64
<b>Şekil 4.50.</b> 50 MW'lık rüzgâr türbinin NACA 2215 profilin kanatları.....	68
<b>Şekil 4.51.</b> 50 MW'lık rüzgar türbinin 2215 NACA profilin kanatların mukavemet analizi.....	68
<b>Şekil 4.52.</b> 50 MW'lık rüzgar türbininin NACA 2215 profili elde edilebilen güç [kW].....	69
<b>Şekil 4.53.</b> 50 MW'lık rüzgar türbinini 2215 NACA profilli kanadın itme kuvveti.....	69
<b>Şekil 4.54.</b> NACA 2215 profili 50 MW'lık rüzgar türbinin simülasyonun analizi.....	70
<b>Şekil 4.55.</b> 50 MW'lık rüzgâr türbinin NACA 2215 profilin güç katsayısı.....	70
<b>Şekil 4.56.</b> 50 MW'lık rüzgar türbinin NACA 2215 profilin hücum açısı.....	70
<b>Şekil 4.57.</b> ANSYS Fluent programıyla kanat NACA 4415 profillerinin 50 MW rüzgâr türbinin mukavemet analizi.....	72
<b>Şekil 4.58.</b> ANSYS Fluent programıyla kanat NACA 2215 profillerinin 50 MW rüzgâr türbinin mukavemet analizi.....	72
<b>Şekil 4.59.</b> 50 MW'lık rüzgâr türbinin farklı kanat profillerin basınç analizi.....	74



## 1. GİRİŞ

Fosil yakıtların giderek artan kullanımı sonucu atmosferdeki karbondioksit emisyonlarının artmasıyla birlikte oluşan sera etkisi ile meydana gelen küresel ısınma dünyanın ekolojik dengesini tehdit eder duruma gelmiştir. Bütün bu durumlar yenilenebilir enerjiye, özellikle rüzgar ve güneş enerjisine olan talebi artmıştır.

Rüzgar enerjisi ile elektrik üretiminde kullanılan büyük rüzgar türbinlerindeki gelişmeler dünyada hızla devam ederken Türkiye’de henüz ticari olarak MW gücünde yerli bir türbin üretimi gerçekleştirilememiştir.

Dünyada farklı ülkelere gerçekleştirilen rüzgar türbini yapımında güç kapasitesi 10 MW’a ulaşmış olup 2019’da prototipi yapılan 193 m rotor çaplı 10 MW türbinin 2022’de piyasaya sürüleceği belirtilmektedir. Ayrıca proje aşamasında ise 205 m çaplı 13,2 MW güçte bir rüzgâr türbini tasarımı 2021’de gerçekleştirilmiş ve 16 MW türbin tasarım çalışmasının devam ettiği belirtilmektedir. Bu konuda son yıllardaki bilimsel çalışmalar 20, 25 ve 50 MW güç kapasiteli rüzgar türbini tasarımı ve üretilebilmesine yönelik yapılmaktadır. Tez çalışmasında günümüzde önemli bir tecrübe edinilen 10 MW rüzgar türbini tasarım verileri doğrulanarak çok büyük güç değerleri olan 25 ve 50 MW için tasarım çalışması yapılacaktır. Bilim ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte rüzgar türbini analizlerinde en düşük hata oranını elde etmek için Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılacaktır. Türbinlerin kanat tasarımında genel olarak kullanılan “kanat elemanı momentum” yöntemi ile en yaygın kullanılan farklı kanat profilleri (NACA 2215, 4415 ve LS(1) gibi) analiz edilerek, ağırlığı en hafif ve verimli olanlar belirlenerek kullanılacaktır. Dinamik analiz sonunda her bir farklı profildeki kanada etkiyen kuvvetler ve her bir farklı türbinden üretilen enerji miktarları hesaplanacaktır.

Hesaplama akışkanlar dinamiği kullanılarak, üç farklı güçteki (10, 25 ve 50 MW) türbinlerin yük, gerilim ve uzunluklarının mekanik tasarımı yapılacaktır. HAD kullanılarak 25 ve 50 MW’lık türbinlerin imalatının ve kurulumunun yapılabilmesi ihtimali araştırılarak, türbinlerden üretilebilecek yıllık elektrik enerjisi miktarı hesaplanarak 10 MW’lık türbin değerleri ile karşılaştırılacaktır. Öte yandan kanatlar, göbek, ana mil, kabin ve kule gibi ana türbin parçaları farklı büyüklükteki her türbin için mekanik olarak tasarlanacaktır (Tong, 2010). Bu çalışmada, her bir türbinin komple tasarım yapıldıktan sonra büyük türbinler yapılabileceğini göstermek, türbin parçalarına

etkiyen rüzgar ve parça ağırlığından gelen farklı yükleri belirlemek için bir model olacaktır.

Nominal güç değeri için en yaygın kullanılan (10-14 m/s) belirlenecek iki farklı rüzgar hızında, kanatlara ve diğer türbin parçalarına etkiyen kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri hesaplanacaktır. Bu kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri türbinin devre dışı kalacağı 25m/s ve maksimum dayanım rüzgar hızı olan 55m/s değerlerinde de hesaplanacaktır.

Bu çalışmanın amaçları aşağıdaki gibidir:

- 1) Kaynak araştırması yapılarak ve 10 MW tasarım ve imalatı yapılan rüzgar türbini tasarım ve HAD analizinin yapılması.
- 2) 25 ve 50 MW rüzgâr türbinleri tasarımı ve imalatı durumunun teknik olarak araştırılması.
- 3) 25 ve 50 MW güçte tasarlanan türbinlerden üretilebilecek yıllık, birim alan ve birim güç enerji miktarının hesaplanması ve karşılaştırılması.
- 4) 25 ve 50 MW gibi büyük türbinlerin parçalarını etkileyen rüzgâr yükleri ve kuvvetlerinin klasik ve HAD yöntemi ile hesaplanarak karşılaştırılması.
- 5) 25 ve 50 MW türbinlerde farklı kanat profillerinin türbinin gövdesi üzerindeki etkisi ve belirlenecek iki kanat profil tipi tarafından üretilecek yıllık enerji miktarlarının karşılaştırılması.

Bu çalışmanın önemi, gelecek yıllarda yapılması mümkün olabilecek 25 ve 50 MW güçler için belirlenecek en optimum iki farklı profile sahip türbin kanatları ile göbek, ana mil, gövde ve kule gibi ana parçaları tasarlamaktır. Ayrıca türbin parçalarının tasarımında ve türbin sisteminin uygun bir atmosferde HAD yöntemi ile simüle edilerek akış ve mukavemet (dayanım) analizlerinin yapılmasıdır. Bunun sonucu olarak günümüz şartlarında henüz üretimleri yapılmamış olan bu türbinlerin 25 ve 50 MW güç kapasitesindeki türbinlerin tasarım ve ana boyutlarının belirlenmesidir. Belirlenen bu boyutların çok büyük değerlere ulaşması durumunda boyutları küçültebilmek için daha iyi özellikli karbon elyaf gibi malzemelerin öncelikle kanatlarda ve diğer türbin parçalarında kullanımının araştırılması yapılacaktır.

HAD, birçok endüstriyel uygulamada sayısal olarak sıvı ve gaz akışlarının hız ve basınç gibi özelliklerini belirlemek için kullanılan yüksek doğruluğu olan bir yöntemdir. Rüzgar enerjisi uygulamasında atmosferik akış ortamındaki türbinler ile enerji üretimi

HAD'nin bir uygulamasıdır. Rüzgar enerjisi, türbin kanatlarının aerodinamiğinden ve mikro iklim ve atmosferik sınır tabakası hava şartlarına kadar oluşturulan izlerden oluşan akışın çok sayıda farklı değerini içerir. Ayrıca, atmosferik akışlar rüzgar çiftliği ölçeğinde ve daha da aşağı bir türbin ölçeğinde rüzgar şartlarını tanımladıkça farklı değerler etkileşime girer. HAD, optimal şekil tasarımı veya optimal kontrol arayışında optimizasyon algoritmalarıyla entegre edilebilir. Model tabanlı optimizasyon örnekleri arasında, örneğin, kanat geometrisinin optimal tasarımı ve karmaşık arazide mikro yerleşim yer alır (Lalit, 2015).

Rüzgâr Türbinleri için HAD simülasyonları türbin ölçeğinde sayısal simülasyonlara ve model tabanlı optimizasyonlara odaklanmaktadır. Bu çalışmada, verimlilik, yıllık güç üretim miktarı, kanat ve türbin üzerindeki rüzgar yükleri açısından büyük ve orta yüklere sahip rüzgar türbinleri için uygun kanatların seçilmesinin kolay olduğu bir araştırma temeli olarak kurulacaktır. Bu çalışmada farklı türbin güçleri (10, 25 ve 50 MW'lık) üzerine inşa edilecek ve iki farklı kanat profilleri (NACA 2225, 4415, LS(1) gibi) geometri tasarımı her türbin için yapılacaktır. Her bir türbin için, üzerindeki rüzgâr yükleri farklı iki tasarım rüzgar hızlarında (11-14 m/s) analiz edilecektir. Hareket halindeki türbinin dinamik analizi ile rüzgâr yükünü daha fazla taşıyan ve rüzgar enerjisi üretiminde daha verimli olan kanatlar incelenecektir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Rüzgar türbinlerinin tasarımına yönelik literatüre giren bilimsel çalışmalar yaklaşık 1,5 asırdır devam etmekte olup yenilenebilir enerji sistemlerine olan ilginin artmasıyla son yıllarda daha fazla artış olmuştur. Bu konudaki çalışmalar ilk yıllarda 1-2 kW'lık güç boyutlarında olurken günümüzde 10.000 kW (10 MW) güç değerleri aşılmış olup 13,2 MW rüzgâr türbini tasarımı ve imalatı 2021 de gerçekleşmiş, 16 MW deniz üstü rüzgar türbini imalat çalışması devam etmektedir. Aşağıda tez konusu ile direkt ilgili olan yayınların özetleri yayım tarihine göre verilmiştir.

Tong, (2010) kitabında, araştırmacılar ve mühendisler için bir kaynak olarak küçük, orta ve büyük rüzgar türbinlerinin kanat, göbek, mil, kabin ve kule gibi bütün ana parçalarının tasarımlarında çalışanlarına yararlı olacağını belirmişlerdir. Bölümlerin tamamının veya bir kısmının kullanımı ile lisans veya lisansüstü düzeyde bir ders kitabı olarak kullanılmaya da uygun olduğunu belirtmiştir.

Cox ve Andreas, (2012) rüzgara karşı, yatay eksenli bir rüzgar türbinindeki 70 (m) uzunluğundaki bir kanadın yapısal özellikleri, bu makalede yüksek rüzgar hızı bulunan bir yerde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Cam ve karbon fiber katmanları kullanan hibrit bir kompozit yapı, düşük uç sapmalı hafif bir tasarım elde edilerek oluşturuldu. Kanat, uluslararası açık deniz rüzgar standardında tanımlanan aşırı yüklenme koşullarına dayanma kabiliyetini göstermek için FEA çalışmalarına tabi tutulmuştur. Sonuçlarda tasarımın uç sapması, maksimum ve minimum gerinimler ve kritik burkulma yükü açısından kabul edilebilir bir performansa sahip olduğunu doğrulamışlardır.

Schubel and Crossley, (2012) yayınlarında; teorik maksimum verimlilik, pratik verimlilik, yatay eksenli rüzgar türbini kanat tasarımı ve kanat yükleri dahil olmak üzere, rüzgar türbini kanat tasarımı için mevcut en son teknolojinin ayrıntılı bir incelemesini sunmuşlardır. Modern bir rüzgar türbini kanadı için aerodinamik tasarım ilkeleri, kanat şekli/miktarı, profil seçimi ve optimal hücum açıları, kanatlar üzerindeki tasarım yüklerinin aerodinamik, yerçekimi, merkezkaç, jiroskopik ve çalışma şartlarını açıklayan ayrıntılı bir inceleme sunulmaktadır.

Lingling ve Fan, (2015) çalışmalarında, rüzgar enerjisi sistemlerinin; modelleme, analiz ve kontrol, uzay vektörleri, karmaşık vektör ve diğer frekans alanı değişkenlerine dayalı makine/dönüştürücü modelleme stratejileri hakkında önemli bilgiler vermişlerdir.



Rajakumar ve Ravindran, (2016) farklı NACA kanat profillerini düşük rüzgar türbini kanadı hızlarında ve çeşitli hücum açılarında incelemiştir. Çeşitli hücum açılarında profil NACA 6409'un genel aerodinamik performansını (özellikle kaldırma-sürüklenme oranı) incelemiştir. Aerodinamik parametrelerin Reynolds sayısı ve hücum açısından büyük ölçüde etkilendiği görülmüştür. Sonuçta gelecekte, düşük güç ihtiyacında kentsel ve kırsal yerlerde düşük rüzgar hızlı türbinlerinin büyük kapsamını tasarlamaya, geliştirmeye ve kurmaya çalışılacaktır.

Lalit, (2017) Rüzgar türbini kanadının HAD analizi için ANSYS Fluent yazılımı ve statik analiz için statik yapı modülünü kullanmıştır. Yatay eksenli rüzgar türbini kanadı profili olarak S809 ile rüzgar akışının farklı para(m) ve analizlerinde kanat tasarımlarını yapmıştır.

Ananda ve ark., (2018) çalışmalarında 13,2 MW güçte bir rüzgar türbini kanadının aerodinamik tasarımını yapmışlardır. Bu tür büyük ölçekli türbinleri geleneksel yöntemler kullanarak tasarlamak, önemli miktarda teknik engelle sonuçlanacaktır. Örneğin, bu ölçeklerde, büyük rotor ağırlığı ve büyük rotor ağırlığı nedeniyle birincil tasarım sınırlamaları uygulanır. Bu ölçeklerde kanat üzerindeki yerçekimi ve aerodinamik yüklerin kombinasyonundan kaynaklanan yükler ve tüm rüzgar şartlarında sağlam yapısal performans için aşırı boyutlarda kanat kök çapları gerekmiştir. Diğer zorluklardan bazıları; bu tür aşırı güçlerde (50 MW) yaklaşık 200 m kanat uzunluğu ve çok büyük rotor ağırlığı içereceğini, kanadın kuleye çarpmasını önlemek için gerekli yüksek kanat sertliği gerekeceğini ve büyük kanat boyutu nedeniyle rotor kanatlarının yapımında ve taşınmasında enerji maliyetinin artacağı tespit etmişlerdir.

Corke ve Robert (2018) çalışmalarında, temel rüzgar enerjisi kavramlarını, rüzgar karakteristikleri ve modelleme, rotor aerodinamiği, hafif esnek yapılar, rüzgar çiftlikleri, aerodinamik, rüzgar türbini kontrolü, akustik, enerji depolama ve ekonomi konularını kapsar. Bu konular, eksiksiz bir sistemde çeşitli tasarım yönlerinin etkileşimini gösteren yeni bir kavramsal rüzgar enerjisi tasarımı üretmek için uygulanacağını belirtmişlerdir.

Mauro ve ark., (2019) çalışmalarında türbülans modellemesi için bir mikro rüzgâr türbini Eddy Simulation yaklaşımının modellenmesi ile bu tür mikro rotorların güvenilir HAD 2D modelini elde etme ihtimalini göstermişlerdir. Modelleme metodolojisi, doğru bir ızgara ve zaman adımı duyarlılık çalışması aracılığıyla ve türbülans kapatma için farklı yaklaşımları karşılaştırarak geliştirilmiştir. Model, rüzgar

tünelinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen ve modelin oldukça tatmin edici bir tahmin kabiliyetini gösteren veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Bu nedenle, önerilen sayısal model, bu tür mikro rotorların akışkan dinamiği davranışının daha iyi anlaşılmasına izin verdiği görülmüştür.

Subham ve ark., (2019) makalelerinde, rüzgâr türbinlerindeki çeşitli gürültü üretme mekanizmalarını ve potansiyel gürültü azaltma tekniklerini tartışmaktadır. Aerodinamik gürültü kaynaklarının ve aerodinamik gürültünün azaltılmasındaki son gelişmelerin gözden geçirilmesine özel önem verilmiştir. Rüzgâr türbini gürültüsünün insan sağlığı üzerindeki etkisi üzerine yapılan birçok çalışma, rüzgâr türbini gürültüsünü rahatsızlık ve uyku bozukluğu ile ilişkilendirmiştir. Bu nedenle, belirli gürültü kaynaklarının hedeflenmesiyle elde edilebilecek bu gürültü emisyonlarının azaltılmasına ihtiyaç vardır. Arka kenar gürültüsünün, uç gürültüsünün ve ön uç giriş gürültüsünün azaltılmasına yönelik teknikler, son gelişmelerle birlikte tartışılmıştır.

Mansour ve ark., (2020) yayınlarında IceWind (buz rüzgar) türbininin performansını sayısal olarak incelemişler. Çalışmada 15.8 m/s rüzgar hızında SST K- $\omega$  modeli kullanılarak tam ölçekli model için üç boyutlu sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Sonuç olarak statik tork, hız dağılımları ve akış çizgileri ve basınç dağılımları önceki verilerle karşılaştırmışlar.

Sy ve ark., (2020) çalışmalarında, kanat ucundaki rüzgar girdaplarının neden olduğu sürtünmeyi azaltmak ve dolayısıyla performansı artırmak için özellikle bölünmüş bir kanatçık olan kanat ucu cihazlarının etkisine bakmışlardır. Bölünmüş kanatçık uygulaması, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) Faz VI dizisi H üzerinde HAD kullanılarak yapılmıştır. Toplamda, simüle edilen dört (4) kanat konfigürasyonu için önceki kanadın genişletilmiş bir versiyonu, kanatçıkla taban kanadı ve bölünmüş kanatçıklı taban kanadında 7 m/s ile 15 m/s arasındaki rüzgar hızlarındaki sonuçlar, kanatçık eklenmesinin güç üretimini ortalama %1,23 artırdığını, bölünmüş kanatçık eklenmesinin ise uzatılmış kanatçıkla karşılaştırıldığında %2,53 artırdığını göstermiştir. Çalışma ayrıca kanat ucundaki sürtünmeyi azaltarak ve kanatçık ve ayrı kanatçık üreten kanatçıkların kendilerini kaldırması nedeniyle artışın elde edildiğini

göstermişlerdir. Bununla birlikte, bunun maliyeti artırma etkisinin, kanatçıkla kanat ve bölünmüş kanatçıklı kanatlar, uzatılmış kanatçık ile karşılaştırıldığında sırasıyla %0,83 ve %2,05'lik bir artış olduğu bulunmuştur.

Yao ve ark., (2021) makalelerinde ayrıntılı bir mühendislik perspektifinden 50 MW'lık bir rüzgar türbini tasarımın gerçekten mümkün olduğunu göstermek için bir dizi aero(hava)-yapısal kanat tasarımı ve çok büyük ölçekli rotorlar için teknoloji yollarının ve zorluklarının kritik değerlendirmesini sunmuşlardır. 50 MW türbin rotor tasarımı, karbon spar kapağı ve kök tasarımını optimize etmeye odaklanan Monte Carlo simülasyonlarıyla başlamışlar ve temel hat tasarımı, 502 ton kütleli 250 m'lik bir kanat uzunluğu elde etmişlerdir. Ardından, en iyi aero-yapısal performans için optimum kanat kirişi ve kanat kalınlığı belirlenerek, kanat kütleli/maliyetini %25'ten fazla kütle azaltma ve %30'dan fazla maliyet azaltmak için bir aero-yapısal tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir.

Papi ve ark., (2021) makalelerinde, rüzgar türbininin bilimsel ve endüstriyel topluluğa tam bir ön tasarım süreci için açıklamalı bir prosedür sağlamayı amaçlamışlardır. İkinci olarak, genellikle gerçek bir tasarımın kritik noktalarından bazıları olan düzenleme yöntemlerine özel olarak odaklanılmıştır. Özellikle, stall düzenlemesinin uygun maliyetli ve basit bir çözüm olabileceği, ancak önemli aerodinamik kayıplar gerektirebileceği ve bundan faydalanan bir türbine göre daha düşük bir yıllık enerji çıkışı ile sonuçlanabileceği gösterilmiştir. Modern hatve (pitch) düzenleme stratejileri, seçilen vaka çalışmasının sonuçları, geleneksel bir yaklaşıma göre adım adım düzenleme ile birlikte uygun bir aerodinamik optimizasyon ile yıllık enerji üretiminde %12'nin üzerinde bir artışın nasıl elde edilebileceğini göstermişlerdir.

China Three Gorges Corporation ve Goldwind Technology tarafından ortaklaşa geliştirilen 16 MW'lık bir açık deniz rüzgar türbini için ilk motor bölümü, Çin'deki Fujian Three Gorges Offshore Wind Power uluslararası endüstri parkı'ndaki üretim hattından çıktı. Bu ünite dünyadaki en büyük tek kapasiteye, en büyük rotor çapına ve megavat başına en hafif ağırlığa sahiptir. Model, 252 metrelik bir rotor çapına ve yaklaşık yedi standart futbol sahasına eşdeğer olan yaklaşık 50.000 m<sup>2</sup>'lik bir süpürme alanına sahiptir. Göbek yüksekliği 146 metredir. Nominal çalışma şartları altında, tek bir ünite devir başına 34,2 kWh elektrik üretir. Yıllık ortalama enerji üretimi tasarım değerine göre, tek bir ünite ile yılda 66 milyon kWh'den fazla temiz elektrik üretebilecek ve bu üretim ile üç kişilik 36.000 hanenin yıllık elektrik tüketimini karşılayabilecektir (Richard, 2022).

Carrero ve ark., (2022) çalışmalarında, aşınmış ön kenar düzenlemelerinin indirgenmiş sıralı modellerini tanımlamak için rüzgar türbini kanatlarının 2D ve 3D CFD modellemesini karşılaştırmaktadır. Özellikle, benimsenen sayısal modellerin kapsamlı bir doğrulama kampanyasının ardından, türbülanslı kinetik enerji renk haritalarına bakılarak

2D ve 3D akış alanları üzerinde ilk kalitatif karşılaştırma gerçekleştirilir. Umut verici benzerlikler analizi sonuç olarak nicel karşılaştırmalara iter. Böylece, 3D kanadın basınç, sürtünme katsayıları ve kutup diyagramları ile basitleştirilmiş aşınmış 2D kurulum arasındaki farklar ve ortak noktalar vurgulanır. Analiz, sistemin viskoz özelliklerinin (yani, basınç alanı ve kaldırma katsayıları) azaltılmış sıralı 2D kurulum tarafından tam olarak tanımlandığını ortaya çıkarmıştır. Öte yandan, duvar sürtünmesindeki ve sürüklenme katsayılarındaki tutarsızlıklar sistematik olarak gözlemlenir. 2D model sürekli olarak sürüklenme katkısını yaklaşık %17 oranında hafife alır ve farklı akış yönünde konumlar üzerinde akış ayrımını tetiklemektedir. Bununla birlikte, önerilen 2D model, kanadın daha önemli aerodinamik performansıya başa çıkmada çok doğrudur ve aynı bilgileri sağlamada 3D değerlendirmeden 30 kat daha hızlıdır. Bu nedenle, önerilen 2D CFD kurulumu, herhangi bir fiziksel rüzgâr türbininin dijital ikizinde kullanım için temel öneme sahiptir. Bakımı dikkatli ve doğru bir şekilde planlamanın amacı, aynı zamanda öncü erozyonu da hesaba katmaktadır (Carrero ve ark., 2022).

Tarhan ve Çil (2022) araştırmasında, rüzgar türbinlerinde kullanılan farklı kanat profillerinin aerodinamik performansları Qblade yazılımı kullanarak simüle edilerek sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler  $0^{\circ}$ - $20^{\circ}$  arası hücum açılarında,  $5 \times 10^4$ ,  $2 \times 10^5$  ve  $1 \times 10^6$  Reynolds sayılarında yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, NACA 6412, NACA 6415 ve NACA 4415 kanat profillerinin en yüksek aerodinamik verimliliğe sahip olduğu belirlenmiş ve bu kanat profilleri kullanılarak üç kanatlı rüzgar türbini oluşturulmuştur. Bu kanat profilleri için uç-hız oranı 6.5 ila 7.8 aralığında maksimum verim alınmıştır. Sonuç olarak, rüzgar türbinlerinde NACA 6412, NACA 6415 ve NACA 4415 kanat profillerinin kullanılması türbinden alınacak verimin maksimum seviyede olacağı görülmüştür. Bu araştırmanın sonuçlarına göre, NACA 4415 kanat profili uygun bir seçim olarak görülmektedir ve tez çalışmasında da bu profil kullanılmıştır.

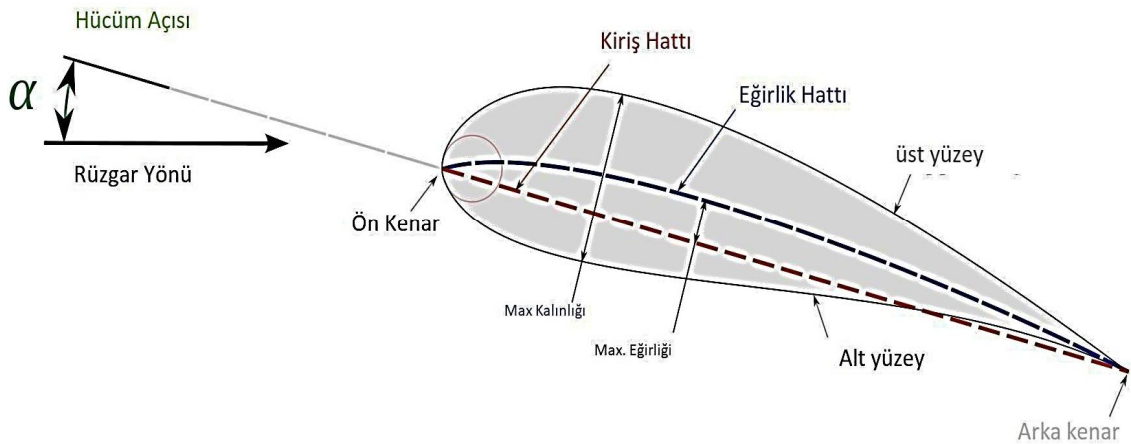
Bu çalışmada, Büyük türbinler üzerindeki farklı etkileri hesaplamak için Q-blade ve ANSYS Fluent programları kullanılmıştır. Her türbin, NACA 4415 ve NACA 2215 ilk profil tipleri için farklı açılarda incelenmiştir. Bu iki profil tipi, mevcut piyasa kullanımlarını kırmak için seçilmiştir. Bu çalışma sayesinde, farklı profil tiplerinin büyük türbinlerde kullanımı için uygun olduğu belirlenmiştir. Örneğin, NACA 4415 profil tipi, insanların yaşamadığı yerlerde kullanılması tercih edilirken, NACA 2215 profil tipi, gürültü seviyesinin düşüklüğü nedeniyle insanların yakınındaki yerlerde kullanılması tercih edilmektedir. Bununla birlikte, NACA 4415 profil tipinden elde edilen enerji miktarı, NACA 2215 profil tipine kıyasla daha yüksektir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Rüzgâr Türbini Kanadı Tasarımı

Türbin kanadının mekanik olarak tasarımı genel olarak kullanılan “Kanat Elemanı Momentum” yöntemine göre yapılacaktır (Martin ve ark., 2020; Schubel ve Crossley, 2012). Kanadın aerodinamik profilinin şekline en yüksek kanat performansı için karar verilir. Profil şeklindeki küçük değişiklikler bile güç eğrisini ve gürültü seviyesini önemli ölçüde etkileyebilir. Rüzgârdan maksimum kinetik enerji elde etmek için araştırmacılar, etkili kanat geometrisi tasarımına daha fazla önem vermektedirler. Bir rotor kanadının verimliliğini artırmak için kanadın farklı bölümlerinde farklı profiller kullanılabilir. Bu nedenle modern kanatlar, eski rüzgar türbini kanatlarına kıyasla daha karmaşık ve verimlidir. Bir rüzgar türbini, bir rotor (kanatlar, göbek ve ana mil), yerine göre kullanılacak ise bir dişli kutusu, jeneratör, kabin, kule ve diğer elektromekanik alt sistemler dahil olmak üzere çeşitli bileşenlerden oluşan karmaşık bir sistemdir (Yao et al., 2021).

Kanatlar en önemli bileşenlerdir, bu nedenle rüzgâr enerjisini milde mekanik güce aktarır, kanat doğrusal olmayan kiriş ve bükülme açısı dağılımları ile aerodinamik bir geometri olarak tasarlanmıştır. Bir rüzgâr türbini kanadının kesit görünümü, yüksek kaldırma ve düşük sürüklenme kuvvetleri oluşturması beklenen bir kanat profili şeklindedir (bir veya daha fazla kanat profili). Kanat şekli, yakalanan enerjiyi ve oluşan yükleri belirlediği için hayati önem taşır. Rüzgâr akışları ve rüzgâr türbinleri arasındaki etkileşimin incelenmesi, rüzgar türbini tasarımı ve analizinde önemli bir rol oynayan rüzgar türbini aerodinamiğidir. Profillerde kullanılan terimler Şekil 3.1’deki gibidir.



Şekil 3.1. Türbin kanadı profili kesiti kısımları (Corke, 2018)

- **Kiriş çizgisi:** kanat profilinin ön ve arka kenarlarını birleştiren düz bir çizgidir.
- **Kiriş uzunluğu:** Ön kenardan arka kenara kadar olan giriş hattının uzunluğudur ve kanat profilinin karakteristik boyutudur.
- **Hücum Açısı:** giriş hattı ile bağıl rüzgar hızının yönü arasındaki açıdır.
- **Ortalama eğriliği:** Üst ve alt yüzeyler arasında yarıya kadar çizilen bir çizgidir.
- **Kiriş çizgisi:** ortalama eğrilik çizgisinin uçlarını birbirine bağlar.
- **Maksimum eğriliği:** ortalama eğriliğin çizgisinin giriş çizgisinden yer değiştirmesi ve maksimum eğriliğin konumu, ortalama eğrilik çizgisinin şeklini tanımlamaya yardımcı olur. Bu miktarlar, temel giriş boyutunun kesirleri veya yüzdeleri olarak ifade edilir.
- **Maksimum kalınlık ve konumu:** kanat profili şeklini tanımlamaya yardımcı olur ve girişin yüzdesi olarak ifade edilir.
- **Ön kenar yarıçapı:** Kanat profilinin ön kenar şekli verilen eğrilik yarıçapıdır (Corke ve Nelson, 2018).

### 3.1.1. Rüzgâr türbinleri kanadın malzemesinin seçimi

Rüzgâr türbini kanadının malzeme seçimi de türbin kanadı tasarımının verimliliğindeki ana özellik fonksiyonudur. Piyasada malzemeyi seçmek için kullanılacak pek çok malzeme var, ancak bunlardan kanat malzemesi olarak ucuzluğu nedeni ile cam fiber(elyaf) kullanılırken, bu çalışmada büyük güçlü türbinler için kanatların hafif olması açısından karbon elyaf 395 gibi malzemeler de kanat tasarımında kullanılacaktır. Karbon elyaf 395 aşağıda verilen bazı avantajlara sahiptir:

- 1) Düşük malzeme yoğunluğu
- 2) Mükemmel Sertlik
- 3) Daha yüksek grafitizasyon (grafitleştirme, karbon miktarı artımı) seviyesi
- 4) Yüksek sıcaklık performansı
- 5) Karbon elyafın Çekme mukavemetinin daha yüksek olmasının yanı sıra, fiyatı cam elyaftan daha yüksektir. Karbon elyafı üretme süreci, cam elyafından çok daha yoğundur ve bu yüzden maliyeti yüksektir ( Corke ve Nelson, 2018).



Şekil 3.2. Kanadın malzemesi ve kompozisyonu (Anonymous, 2022)

### 3.2. Rüzgâr Türbinin Materyal Seçimi

Rüzgâr türbini kanadının malzeme seçimi de türbin kanadı tasarımının verimliliğindeki ana özellik fonksiyonudur. Piyasada malzemeyi seçmek için kullanılabilir pek çok malzeme var, ancak bunlardan kanat malzemesi olarak ucuzluğu nedeni ile cam fiber(elyaf) kullanılırken, bu çalışmada büyük güçlü türbinler için kanatların hafif olması açısından karbon elyaf 395 gibi malzemeler de kanat tasarımında kullanılacaktır. Karbon elyaf 395 aşağıda verilen bazı avantajlara sahiptir:

- 1) Düşük malzeme yoğunluğu
- 2) Mükemmel Sertlik
- 3) Daha yüksek grafitizasyon (grafitleştirme, karbon miktarı artımı) seviyesi
- 4) Yüksek sıcaklık performansı

Karbon elyafın Çekme mukavemetinin daha yüksek olmasının yanı sıra, fiyatı cam elyaftan daha yüksektir. Karbon elyafı üretme süreci, cam elyafından çok daha yoğundur ve bu yüzden maliyeti yüksektir (Corke and Nelson, 2018).

Rüzgar yapılarında kanatlar sistemin verimi için kesin etkili bileşenlerdir. Çapları ve sayıları türbin dayanımına bağlı olarak değişmektedir. Rüzgar türbin kanatlarının tasarımında kompozit malzemelerin kullanılması fiziksel, kimyasal veya mekanik özelliklerin bir veya birkaçının karmaşıklığının giderilmesini sağlamaktadır. Bu amaç için, farklı metodlar kullanılmaktadır. Daha verimli türbin kanatlarının üretilmesi için kullanılan metodların temel prensibi dayanım direncini geliştirmeye odaklanmakta ve bu metodlarda kompozitlerin kullanılmasıyla da malzeme yorulması mümkün olan en az seviyeye çekilmektedir (Eker ve ark., 2006).

Rüzgar türbinlerinin kanatlarının yapımında kullanılan malzemeler arasında cam takviyeli plastik (GRP), karbon fiber takviyeli plastik (CFRP), ahşap, alüminyum veya çelik bulunmaktadır. Küçük türbinlerde, kanat çapı 5 metreden az olduğunda, üretim verimliliği ağırlık, sertlik veya kanat karakteristiklerinin önüne geçmektedir. Ancak büyük türbinler için kanat profiline uygun malzeme seçimi önemlidir. Büyük türbinlerde genellikle GRP kullanılır çünkü hafif, dayanıklı, iyi korozyon direnci ve yüksek sıcaklık toleransı sağlar. CFRP daha yüksek dayanım ve hafiflik sağlasa da pahalıdır. Vestas Wind System şirketi kanat yapılarında cam/epoksiyi önerirken, NEC Micon firması tahta kompozitleri savunuyor. Aerodinamik açıdan optimum dizayn için hücum açısı ve L/D oranları dikkatle seçilmelidir. Kanat profili seçiminde rüzgar türbinlerinin kurulacağı bölgenin rüzgar durumu ve esme yönü de dikkate alınmalıdır. (UYSAL, 2019)

### **3.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi**

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi akışkan akışı ve ısı transferini analiz etmek için bilgisayar tabanlı bir simülasyon yöntemidir. HAD 'de akışkan akışını içeren sorunu çözmek ve analiz etmek için sayısal yöntem ve algoritmayı birleştirilir. Bilgisayar, sıvıların ve gazların gövdeyle etkileşimini simüle etmek için gereken hesaplamayı gerçekleştirmek için kullanılır. Devam eden araştırmalar, transonik veya türbülanslı akışlar gibi karmaşık simülasyon senaryolarının doğruluğunu ve hızını artıran yazılımlar verir (Papi ve ark., 2021). Akışkan akışı içeren mühendislik sistemlerini tasarlamak ve analiz etmek için temelde deneysel ve sayısal olarak iki yaklaşım vardır.

Deneysel yaklaşım, prototip makinesinin ölçeklenmiş bir modeli üzerinde deneyler yapmak için eksiksiz bir test teçhizatı kurulumunu içerirken, ikincisi ise, sistemdeki akışı yöneten diferansiyel denklemlerin analitik veya hesaplamalı çözümüne dayanmaktadır. Bu bölümde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) hakkında kısa bir giriş verilmiştir. Akışkan akışı sorunlarının çözümü için hesaplamalı yaklaşım, bir bilgisayar kullanımı yoluyla akışkan akışının yönetim denklemlerinin çözümüne ayrılmıştır.

Bugün hem deneysel hem de HAD analizi uygulanmaktadır ve ikisi birbirini tamamlamaktadır. Örneğin, kaldırma, sürüklenme, basınç düşüşü veya güç gibi genel özellikler deneysel olarak elde edilebilir. Ancak hız, kesme gerilmeleri, akış düzenleri ve basınç profilleri HAD'i gibi akış alanı hakkında ayrıntılı bilgi edinmek için kullanılır. Buna ek olarak, HAD çözümlerini doğrulamak için deneysel veriler eşleştirilerek



kullanılır. Daha sonra HAD, dikkatlice kontrol edilen parametrik çalışmalarla tasarım döngüsünü kısaltmak için kullanılır, böylece gerekli deneysel test miktarını azaltır. Hesaplama akışkan dinamiklerinin mevcut durumu, laminer akışları kolaylıkla kaldırabilmesidir. Ancak pratik mühendislik ilgisinin çalkantılı akışlarının türbülans modelleri dikkate alınmadan çözülmesi imkansızdır.

Ne yazık ki, genel bir türbülans modeli yoktur ve türbülanslı bir HAD çözümü türbülans modelinin uygunluğuna bağlıdır. Bu sınırlamaya rağmen, standart türbülans modelleri birçok pratik mühendislik akış sorunu için makul sonuçlar verir.

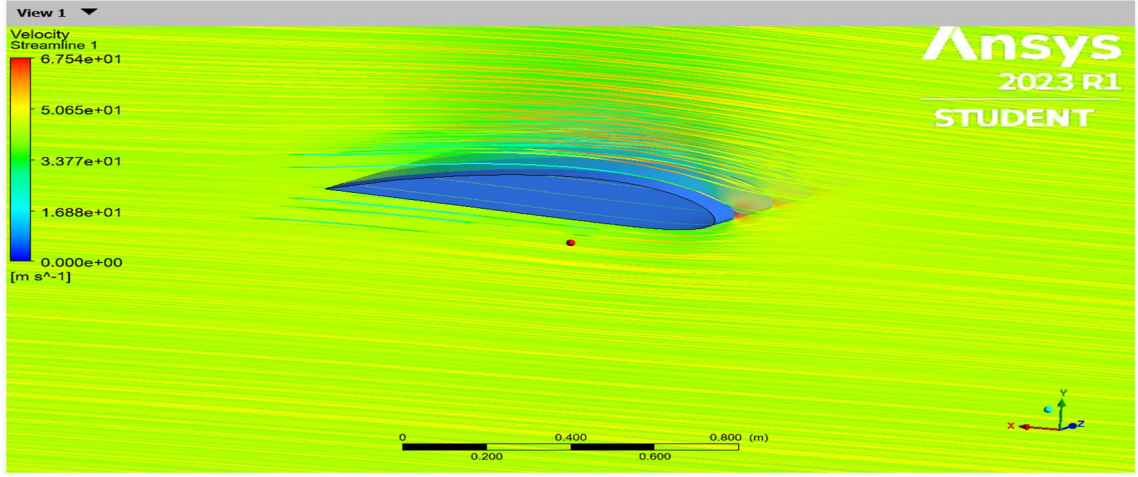
Akış problemlerinin herhangi bir sayısal simülasyonu çeşitli ayırt edici süreçlerden oluşur. Bunlar aşağıda belirtilmiştir (Mauro ve ark., 2019):

- 1) Sorunlu etki alanı.
- 2) Geometrisini modelle. Fiziksel sorunun uygun matematiksel modelini seçin.
- 3) Uygun bir ayrıklaştırma yöntemi seçin.
- 4) Sorunlu geometriye ve ayrıklaştırma yöntemine dayalı bir ağ yapısı oluşturun.
- 5) Ayrık denklemler sistemini çözmek için uygun bir çözüm tekniği kullanın.
- 6) Yinelemeli çözüm yöntemleri için uygun yakınsama ölçütlerini ayarlayın.
- 7) Daha fazla analiz için sayısal çözümü hazırlayın (Mauro et al., 2019).

Akışkan akışını yöneten denklemler HAD'nin temel taşı akışkan dinamiği temel yönetim denklemleridir. Bunlar aşağıdaki gibidir.

- 1) Süreklilik denklemi
- 2) Momentum denklemi
- 3) Enerji tasarrufu denklemi
- 4) Navier-stokes denklemi

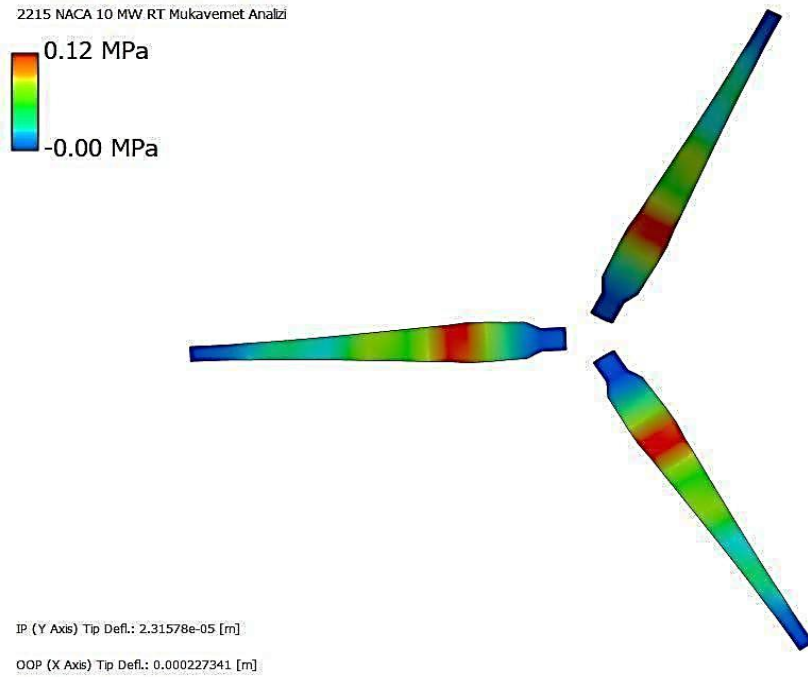
ANSYS programında rüzgar türbinlerin farklı kanat parçalarının mühendislik tasarımları ve türbinlerin mekanik aksamalarının birlikte montajı yapılacaktır. Ayrıca, kanadın kısımlarındaki farklı yüklerin statik analizi çalışması da yapılmıştır. QBlade programı kullanarak, türbin sisteminin çalışmasını bir bütün olarak simüle etmek ve her bir türbinin bir bütün olarak ürettiği enerji miktarını ayrı ayrı hesaplamak için kullanılacaktır (Mansour and Afify, 2020). Analiz yapmak istediğimiz kısmın geometrisini oluşturmak için ANSYS fluent ve Qblade modelleme araçları kullanılarak model oluşturulmuştur. Daha sonra Qblade yazılımının web sitesinden NACA 2215, 4415, LS(1) gibi profillerin koordinat noktalarını seçilip, üst ve alt kısımda iki farklı eğriyi birleştirilerek kanat kesiti profil geometrileri elde edilmiştir Şekil 3.3.



Şekil 3.3. ANSYS programı ile NACA profilin tasarımı (ANSYS, 2023)

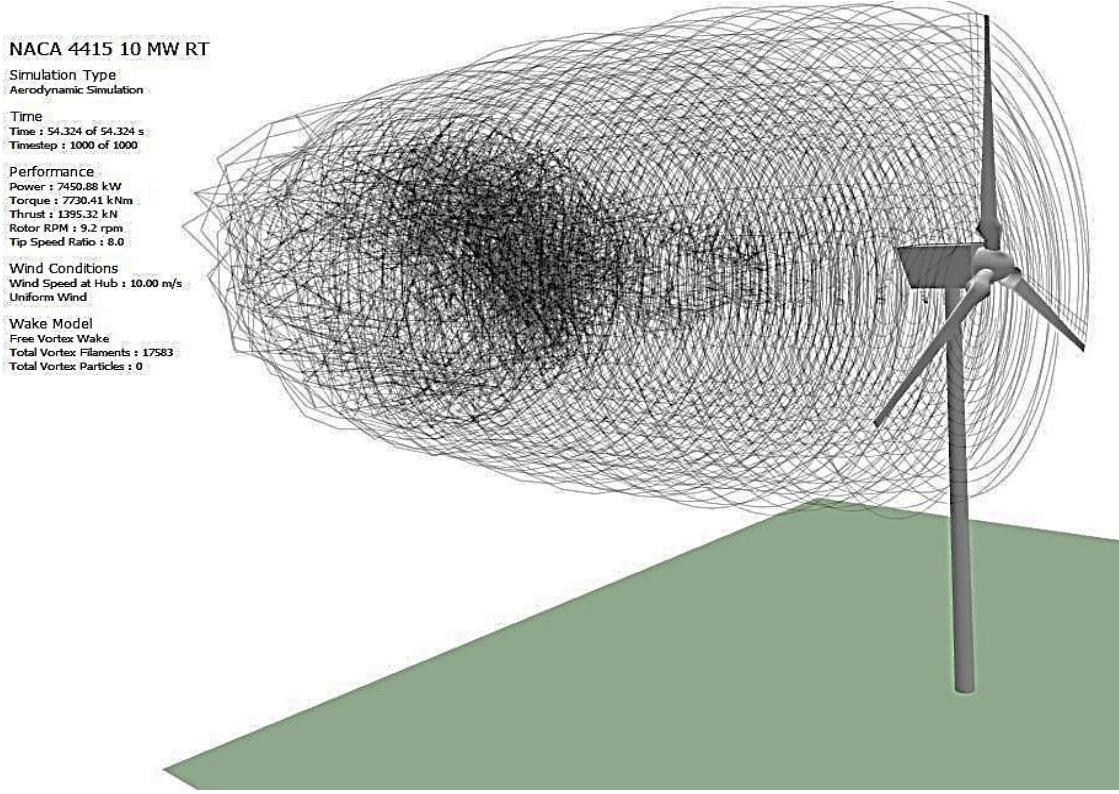
Fiziksel model seçilmesi: Laminer akış, türbülanslı akış ve enerji gibi çok fazlı akış için gerekli fiziksel model seçilmiştir. Basınç tabanlı veya hız tabanlı sorun çözücü de seçilmiştir (Cox and Echtermeyer, 2012).

Akışkan Seçilmesi: Akışkanın malzeme özelliği olarak standart atmosferik hava özellikleri seçilmiştir. Kanat Profilin Analizi: Burada kanadın sektörünü (parçasını) etkileyen güçler ve sektördeki güçlü ve zayıf yönleri analiz edilecektir Şekil 3.4. Kanat elemanı momentum yöntemine göre 20 parçaya bölünen toplam kanat uzunluğunun her bir parça (sektörü) ayrı ayrı analiz edilmiştir (Martin ve ark., 2020)



Şekil 3.4. 2215 NACA profilin kanadı etkileyen mukavemetin analizi (Qblade, 2022)

Türbin Ana Parçalarının Tasarımı ve Üzerine Gelen Yüklerin (Gerilmelerin) Analiz Edilmesi: Türbinlerin kanat, göbek, ana mil ve kule gibi ana parçaları türbin tasarımıyla ilgili kaynaklar kullanılarak tasarlanacaktır (Tong, 2010; Hansen ve ark., 2020). Türbin parçalarının üzerindeki farklı yük ve kuvvetlerin ANSYS Fluent ve Qblade program ile analizi Şekil 3.5'te gibi gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Rüzgâr Türbinin Akışkan analizi (Qblade, 2022)

### 3.3.1. Süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri

Bu denklemler; akışkan içerisindeki birim kütleye etki eden momentum (ivmelenme) değişimlerinin, basınç değişimleri ve sürtünme kayıplarına neden olan viskoz kuvvetlerin (sürtünmeye benzer) toplamına eşit olduğunun doğruluğunu ortaya koymaktadır. Bu viskoz kuvvetler moleküller arası etkileşimlerden meydana gelmekte ve akışkanın akmaya ne kadar dirençli (viskoz) olduğunu göstermektedir. Böylece, Navier-Stokes denklemlerinin, verilen akışkanın herhangi bir bölgesindeki kuvvetler dengesinin dinamik ifadesi olduğu söylenebilir. Sıkıştırılmaz laminar bir akış için Navier Stokes denklemleri kartezyen koordinatlarda Denklem 3.1, 3.2, 3.3 arasında verildiği şekilde de yazılabilir (Kaya, 2019).

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (3.1)$$

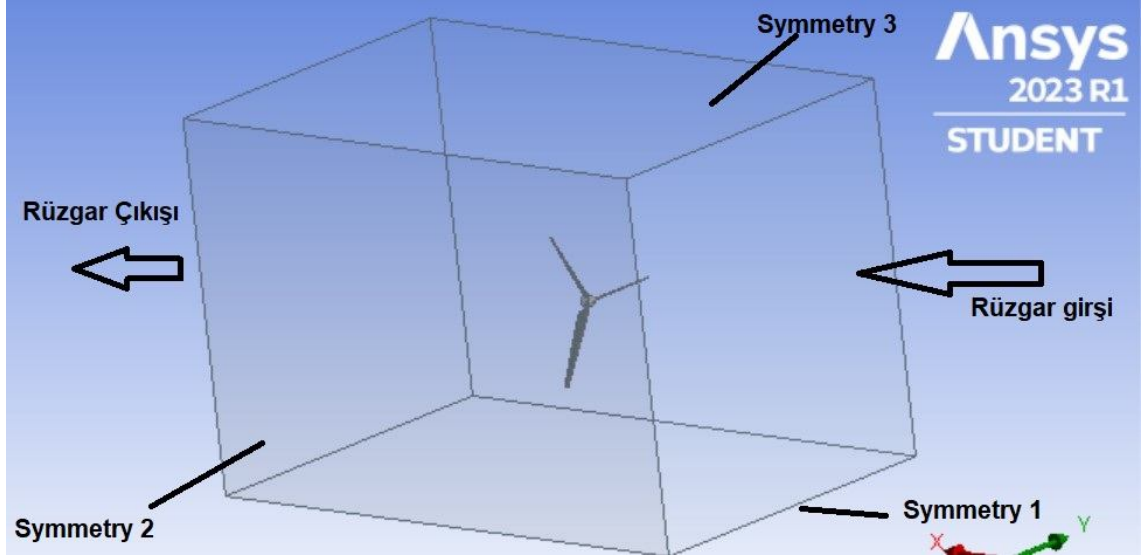
$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (3.2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (3.3)$$

### 3.3.2. Sınır şartları

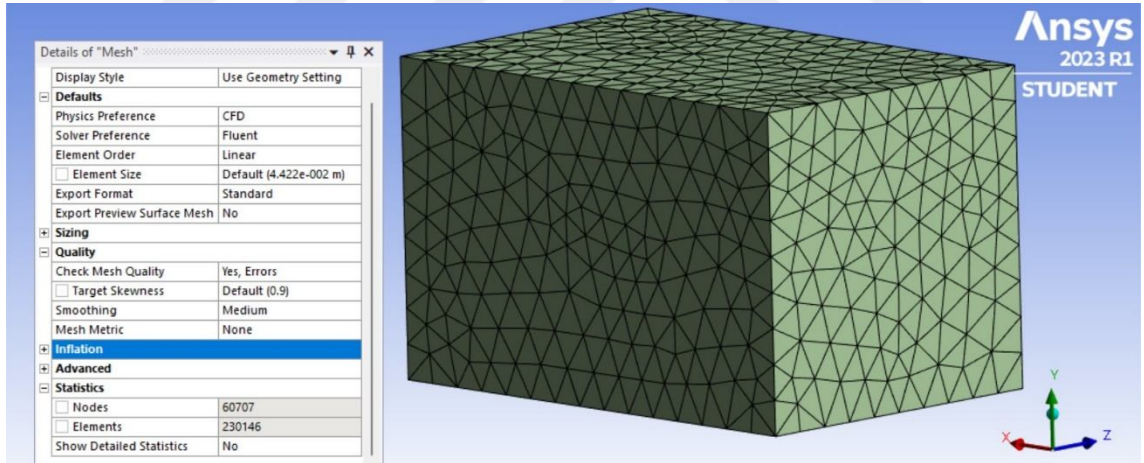
HAD problemlerinde hesaplamaların yapılabilmesi için sınır şartlarının tanımlanması gerektiği bilinmektedir. Simülasyonlar için bazı sınır şartları ve tanımları örneklendirilebilir (KAYA, 2019):

- Hız-girişi: Bu şartta akışın hızı, türbülans özellikleri gibi parametreler belirlenir. Ayrıca, hız dalgalanmalarının kare ortalamalarının kökü hıza oran olarak tanımlanan türbülans yoğunluğu da burada belirtilebilir. Hız sabit veya değişken olarak tanımlanabilir.
- Basınç-çıkışı: Bu durumda çıkışta sabit bir statik basınç tanımlanır. Ayrıca, ters akış durumlarının ayarlanması ve yakınsamanın kolaylaştırılması için de kullanılır. Simülasyonlarda çıkış şartı olarak sabit basınç kullanılmaktadır.
- Periyodik sınır şartı: Rüzgar türbini modellemelerinde akış döngüsel olarak periyodik kabul edilir. Bu şartı sağlamak için akış alanı dönme olarak çizilir ve dönmeyen parçalar çizime dahil edilmez. Bu yöntem, genellikle rüzgar türbini analizlerinde hesaplama süresinin azaltılması amacıyla kullanılır.
- Duvar sınır şartı: Tüm viskoz akışlar, duvarın olması nedeniyle önemli ölçüde etkilenir. Duvarlar, fiziksel olarak kaymama sınır şartlarını sağlarlar. Kaymama sınır şartı akışın hızını ve türbülans özelliklerini belirleyici niteliktedir.



Şekil 3.6. ANSYS Fluent rüzgar türbin kanadın sınır şartları

ANSYS Fluent'teki ağ yapısı işlemi önemlidir ve büyük hesaplama işlemleri gerektirmektedir. Bu çalışmada, varsayılan ayarlar kullanılmıştır. Ve burada ağ yapısı ayarları şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. ANSYS Fluentte ağ yapısı (meshing)

### 3.4. Gerekli Güç Tasarımı

Rüzgâr türbininden elde edilebilecek elektrik güü ( $P_{RT}$ ) (1) ifadesinde verilmiş olup, ifadedeki diğer çarpanlar; hava yoğunluğu ( $\rho$ ) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], rüzgâr hızı ( $V$ ) [ $\text{m}/\text{s}$ ], türbin süpürme alanı ( $A_{RT}$ ) [ $\text{m}^2$ ], güç katsayısı ( $C_p$ ) ve mekanik gücün elektrik enerjisine dönüşürken oluşan kayıplar ( $\eta_d$ )'dir. Hava akımındaki kinetik enerjiden kaynaklanan güç denklem 3.4' de verilmiştir. (Corke, 2018).

$$P_{RT} = 0,5 (\rho \times A_{RT} \times C_p \times V^3 \times \eta_d) [W] \quad (3.4)$$

### 3.5. Rotor Mili Çapı hesaplaması

Bir rüzgâr türbini tasarımında en önemli noktalardan biriside rotorda oluşan gücün jeneratöre aktarımında kullanılan güç aktarma milidir. Bu mil kendisini etkileyen farklı kuvvetlere karşı dayanabilecek özelliklerde seçilmeli ve çapı bu özelliklere uygun olmalıdır. Rotor mili çapı hesabı denklem 3.5'te verilmiştir (Corke and Nelson, 2018)

$$D_R = \sqrt[3]{\frac{W_d \cdot 32}{\pi}} \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'te  $W_d$  direnç momentini [N.m] ve  $D_R$  ise rotor mili çapını [m] ifade etmektedir.

### 3.6. Konum Seçimi, Arazi ve Denizin Potansiyeli

10, 25, 50 MW'lık Rüzgar türbinleri tasarımı için Karadeniz verileri seçilmiştir. Ancak, büyük rüzgar türbinleri (Off-Shore) büyük denizlerde veya okyanus içinde kurulmalıdırlar (Anonyms, 2022).

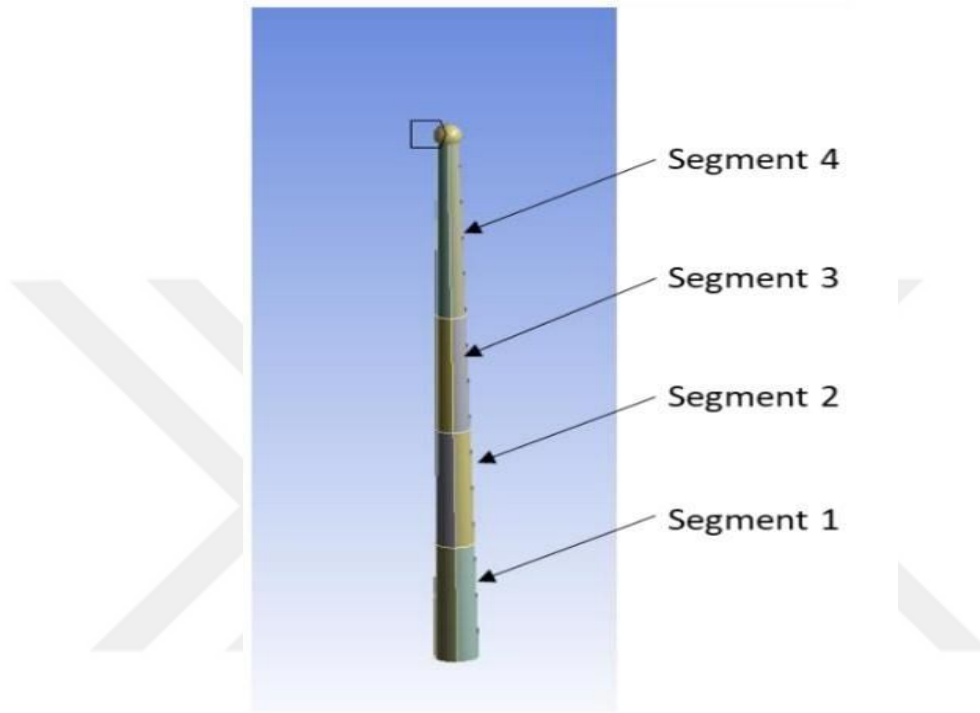
**Çizelge 3.1.** Karadeniz'in rüzgâr enerjisi potansiyeli

Veriler	Değerler
Konum	Karadeniz-Samsun
Boylam (°)	30.62
Enlem (°)	44.68
Maksimum rüzgâr hızı (m/s)	28.14
Ortalama rüzgâr hızı (m/s)	8
Yıllık Enerji Üretimi (MWh)	11,712

### 3.7. Rüzgâr Türbini Kulesi Tasarımı

Rüzgâr türbini kuleleri tasarlanmanın en yaygın yöntemi, her iki uçta flanşlarla birleştirilmiş 20 ila 30 m arasındaki bölümlerin üretilmesi ve ardından bunların yerine civatalanmasıdır.

Bu yazıda, bağlantılar simüle edilmeden sadece kulenin bölümleri ele alınmıştır. Kuleler, üçü 20-70 m uzunluğunda ve biri 24-74 m uzunluğunda olmak üzere dört bölüme ayrılmıştır. Her bölümün belirli bir kalınlığı vardı altta 50-200 mm'den başlayarak üstte 19-87 mm'ye kadar tahsis edilmiştir. Rüzgar türbinin kulesi, ANSYS'te kabuk yapılar olarak modellenmiştir. Rüzgar türbin kulesi 3D modeli Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.8. Rüzgâr türbin kulesinin segmentleri (parçaları, kısımları)

Yükler tarafından oluşturulan von Mises gerilimi, ( $\sigma$ ) izin verilen gerilimi aşamaz. Bu, aşağıdaki eşitsizlik (3.8 ve 3.9) formlarında ifade edilmektedir.

$$\sigma \leq \sigma_{\text{Sınır}} \quad (3.6)$$

$$\sigma_{\text{Sınır}} = \frac{\sigma}{\gamma} \quad (3.7)$$

Burada ( $\sigma_y$ ) akma dayanımı ve ( $\gamma$ ) malzeme güvenlik faktörüdür. S355 Çelik için malzeme akma dayanımı,  $40 \leq t \leq 63$  mm kalınlıklar için 335 MPa'dır, ve  $16 \leq t \leq 400$  (mm) kalınlıklar için akma dayanımı 1500 MPa'dır. Seçilen kuleler söz konusu olduğunda, üst kalınlıktaki akma dayanımını göz önünde bulundurduk. istenen tüm koşulları karşılamaktadır.

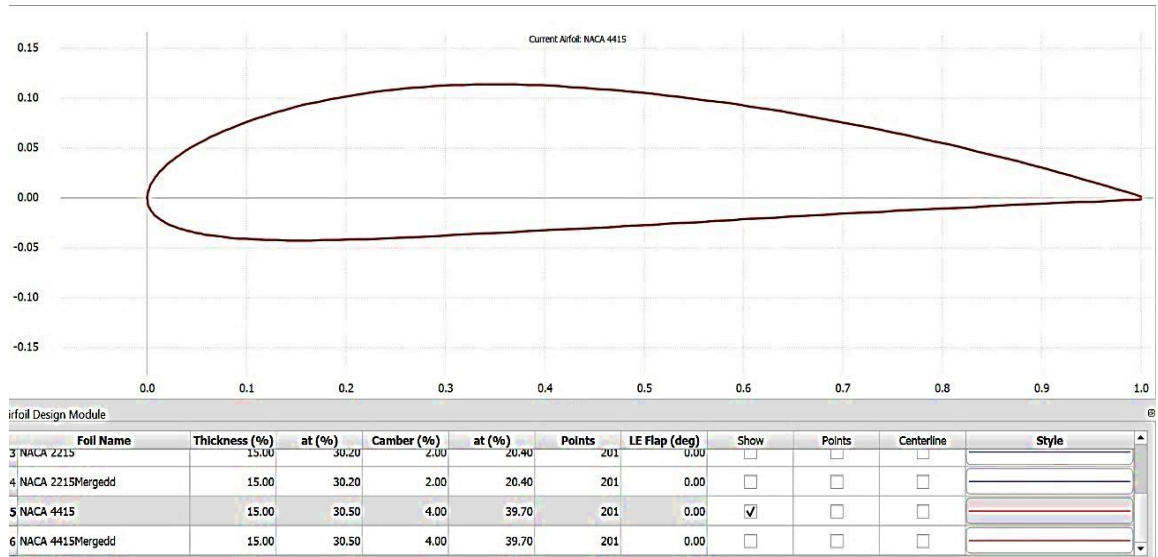
## 4. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN TASARIM VE ANALİZİ

### 4.1. Rüzgâr Türbinleri Kanat Profilinin Seçimi

Kanat aerodinamiği, kanat profilinin seçimi için ana kriterlerdir. Böylece verimli kanat için kaldırma/sürüklenme oranının yüksek olması önemli olacaktır. NACA 4 haneli seriler düşük rüzgâr hızında iyi performans vermektedir. Bu nedenle kanat analizi için NACA 2215, NACA 4415 ve LS(1) gibi profiller seçilecektir. Bu profiller düşük sürüklenme oranına ve yüksek kaldırma özelliğine sahip düşük rüzgâr hızında daha iyi performansa sahiptirler. NACA Dört Basamaklı Seri: İlk tasarlanan profiller NACA 4 – basamak serisidir ve sayı olarak belirtilir. İlk basamak eğrilik yüzdesini (airfoil uzunluğu) olarak maksimum eğrilik belirtir, ikincisi, maksimum eğrilik konumunu gösterir ve son iki sayı profilin maksimum kalınlığını (t) belirtir. Örneğin, NACA 2415 profil, kanadın ön kenarından (veya 0,4c) %40 geri yerleştirilmiş, %2'lik bir eğrilik ile maksimum %15 kalınlığa sahiptir (Lalit, 2015).

#### 4.1.1 NACA 4415 profilinin tasarımı

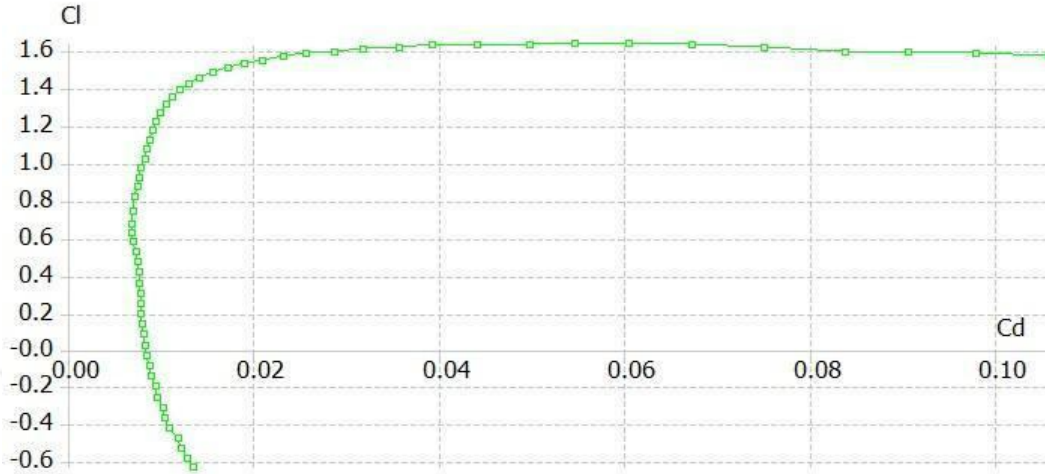
NACA 4415 profili, kanadın ön kenarından 40% geri yerleştirilmiş, %4'lik bir eğrilik ile maksimum %15 kalınlığa sahiptir.



Şekil 4.1. NACA 4415 kanat profilinin görünümü ve karakteristik değerleri (QBlade, 2022)

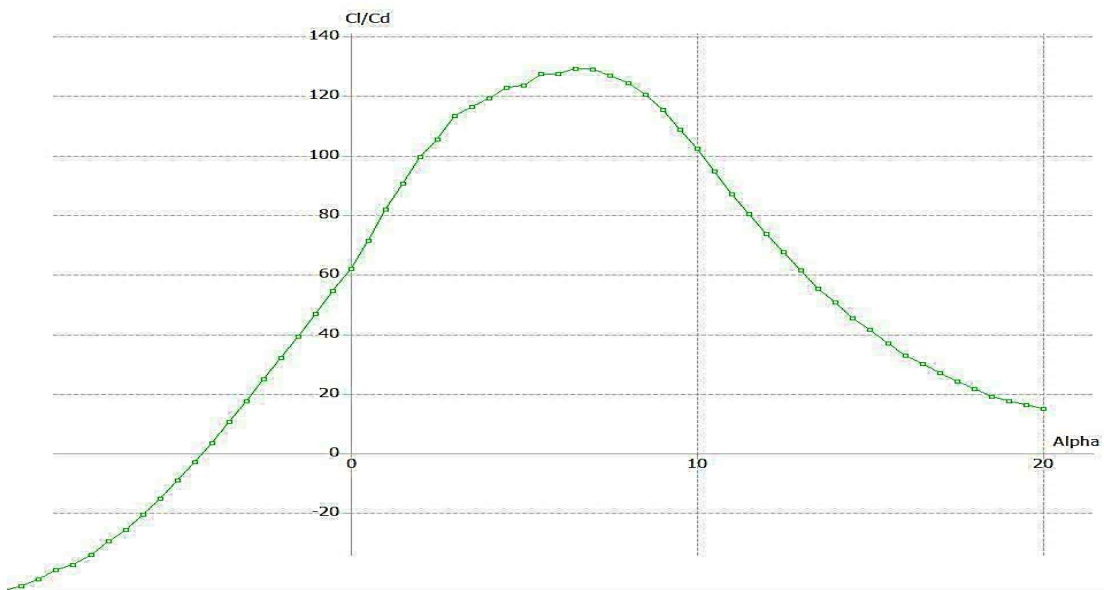


Dinamik akışkanları analiz ederken kanadın profili analiz ederek, kaldırma katsayısının ( $C_l$ ) maksimum oranının yaklaşık 1.6 oranında olduğunu bulunmaktadır. Aynı zamanda, sürüklenme katsayısı ( $C_d$ ) yaklaşık 0.01 olduğunda ulaşılan maksimum oran olduğu gösterilmektedir.



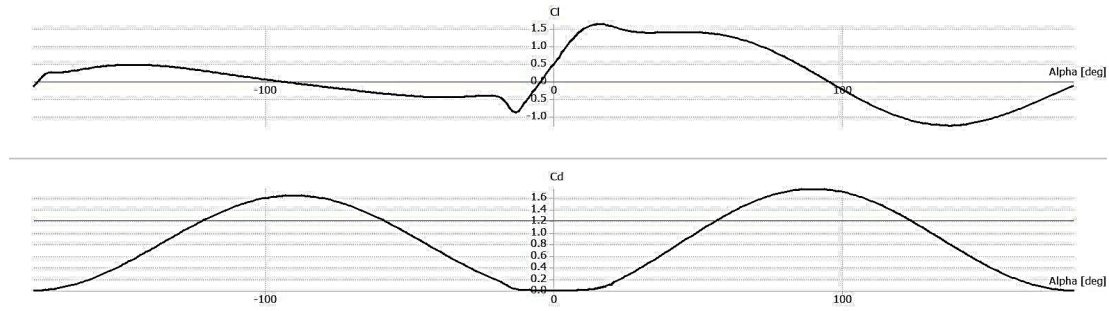
Şekil 4.2. NACA 4415 kanadın profilin sürüklenme ile kaldırma katsayıları (QBlade, 2022)

Tasarım sırasında, kaldırma katsayısı ile sürüklenme katsayısı arasındaki oranın en yüksek değeri  $C_l / C_d$  seçilmelidir ve bu profile NACA 4415, alfa profilin eğrilik açısı olduğu 6.5 olunca maksimum  $C_l / C_d$  oranı 130 olarak bulunmuştur. Bu nedenle, kanat tasarımı sırasında mümkün olan en yüksek verimlilik için, bu profile 6.5 sapma açısında  $C_l / C_d$  130 oranını seçilmektedir.



Şekil 4.3. NACA 4415 kanadın profili Sürüklenme ve Kaldırma katsayıları (QBlade, 2022)

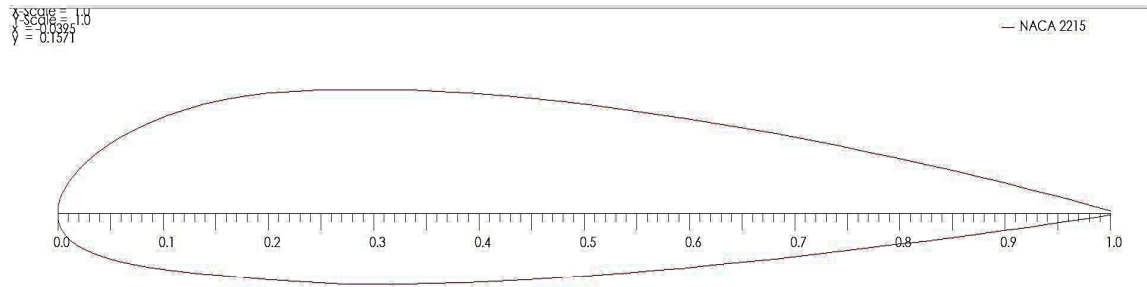
Kaldırma katsayısı ( $C_l$ ) alfa profilinin eğim açısına göre analiz ederken, kaldırma katsayısının en yüksek değerinin 1.5 olarak alfa 6.5'in eğim açısında bulunmaktadır. Kaldırma katsayısının en düşük değeri -1 olarak, alfa 150 derecelik eğim açısı olduğunda bulunmaktadır. Sürüklenme katsayısının ( $C_d$ ) analizinin aksine, en düşük değerinin eğim alfa sıfır derece açısında sıfır olduğunu bulunmaktadır. Sürüklenme katsayısının ( $C_d$ ) en yüksek değeri 1.6 olarak, alfa eğim açısı 90 derece olduğunda bulunmaktadır.



Şekil 4.4. NACA 4415 eğim açısı (Alfa), Kaldırma ( $C_l$ ) ve Sürüklenme ( $C_d$ ) Katsayıları (QBlade, 2022)

#### 4.1.2. NACA 2215 kanat profilin tasarımı

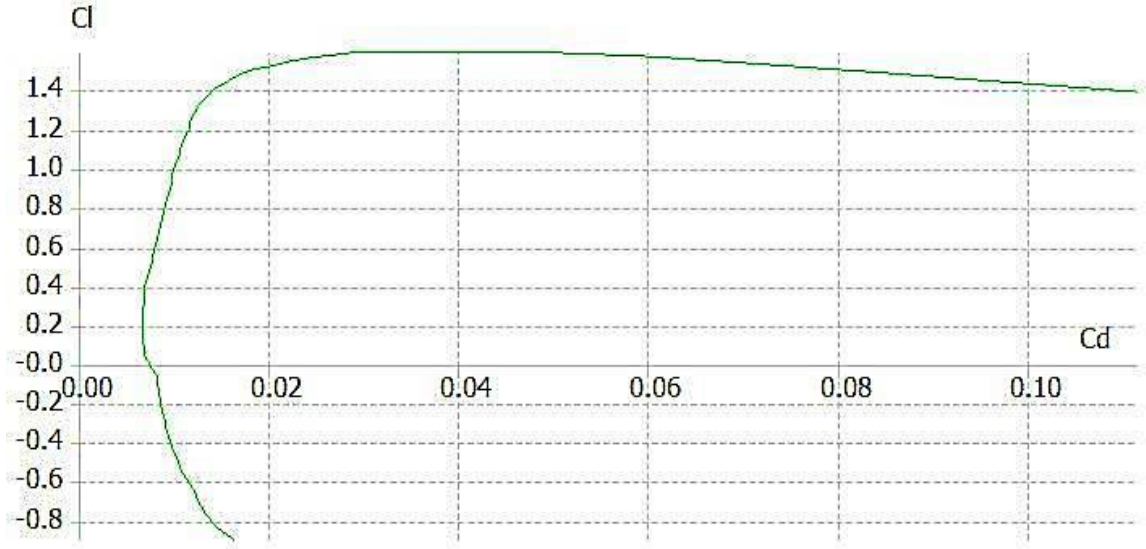
NACA 2215 profil, kanadın ön kenarından (veya 0,2c) %20 geri yerleştirilmiş, %2'lik bir eğrilik ile maksimum %15 kalınlığa sahiptir.



Name	Thickness (%)	at (%)	Camber (%)	at (%)	Points	TE Flap (deg)	TE XHinge	TE YHinge	Show	Points	Centerline	Style
1 Spline foil	9.03	31.20	0.00	0.00	60	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2 NACA 2215	15.00	29.10	2.00	19.80	99	0.00	0.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Şekil 4.5. NACA 2215 profilin tasarımı (QBlade, 2022)

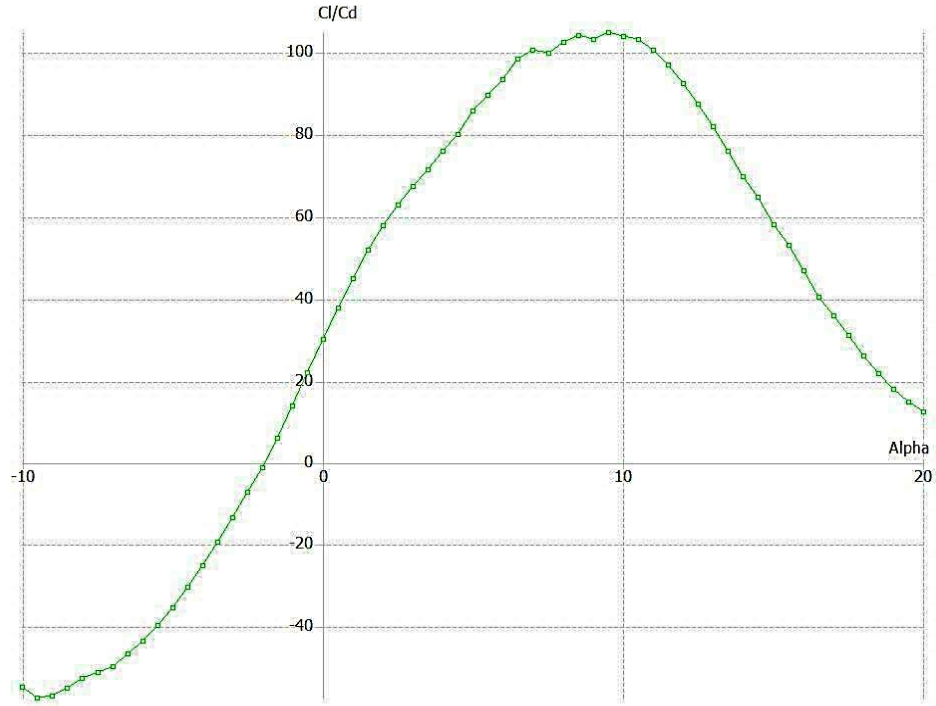
Dinamik akışkanları analiz ederken kanadın profili analiz ederek, kaldırma katsayısının maksimum oranının yaklaşık 1,4 oranında olduğunu bulunmaktadı. Aynı zamanda, şekil 4.5'te sürüklenme katsayısı yaklaşık 0.07 olduğunda ulaşılan maksimum oran olduğunu gösterilmektedir.



Şekil 4.6. NACA 2215 kanadın profilin Sürüklenme ve Kaldırma katsayıları (QBlade, 2022)

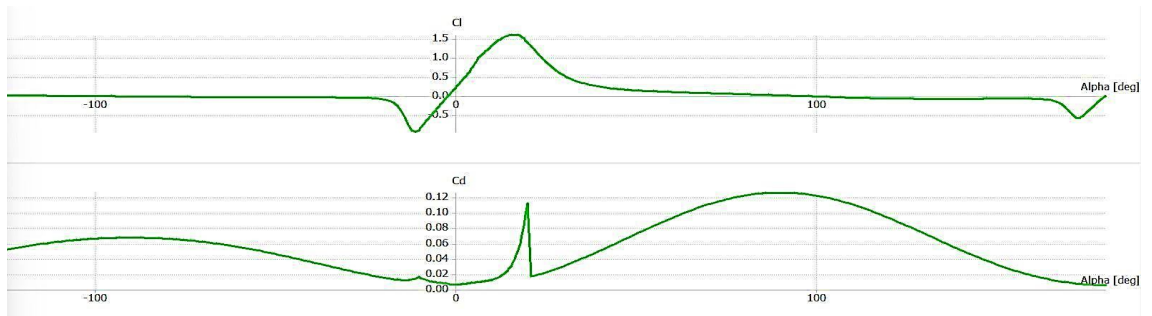
Tasarım sırasında, kaldırma katsayısı ile sürüklenme katsayısı arasındaki oranın en yüksek değeri  $C_l/C_d$  seçilmelidir ve bu profilde NACA 2215, alfa profilin eğrilik açısı olduğu 9.5 olunca maksimum  $C_l/C_d$  oranı 105 olarak bulunmuştur.

Bu nedenle, kanat tasarımı sırasında mümkün olan en yüksek verimlilik için, bu profilde 9.5 derece hücum (duruş, eğim) açısında kaldırma ile sürüklenme katsayısının oranıyla  $C_l/C_d$  105 olarak seçilmiştir.



Şekil 4.7. NACA 2215 kanadın profili sürüklenme ile kaldırma katsayıları (QBlade, 2022 )

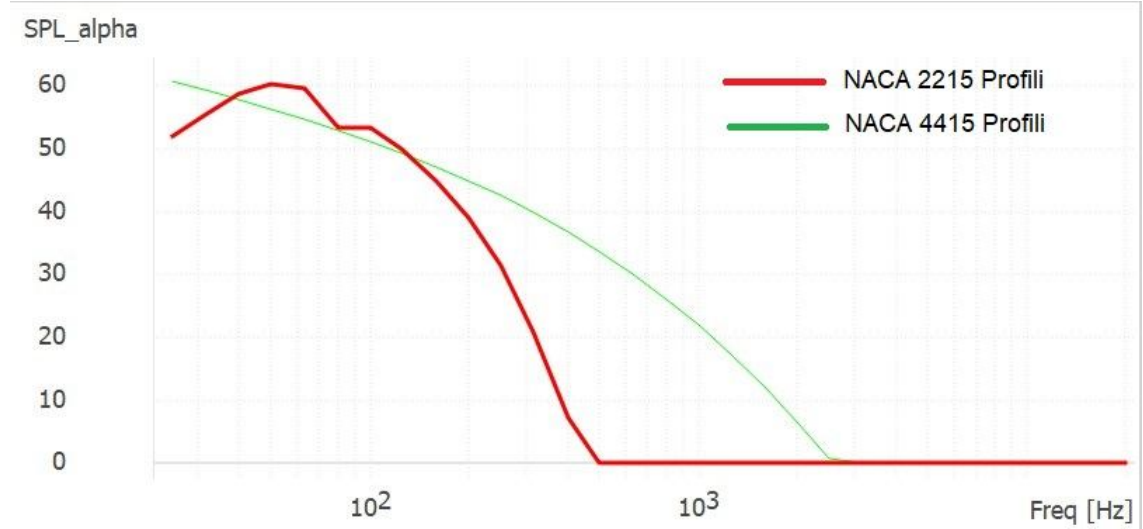
Kaldırma katsayısının ( $C_l$ ) alfa profilinin eğim açısına göre analiz ederken, kaldırma katsayısının en yüksek değerinin 1,5 olarak alfa 9.5'in eğim açısında bulunmaktadır. Kaldırma katsayısının en düşük değeri -1 olarak, alfa 150 derecelik eğim açısı olduğunda bulunmaktadır. Sürüklenme katsayısının analizinin aksine, en düşük değerinin eğim alfa sıfır derece açısında sıfır olduğunu bulunmaktadır. Sürüklenme katsayısının ( $C_d$ ) en yüksek değeri 0,12 olarak, alfa 90 derece eğim açısı olduğunda bulunmaktadır.



Şekil 4.8. NACA 2215 eğim açısı [Alfa], kaldırma ve sürüklenme katsayıları (QBlade, 2022)

Ayrıca, NACA 2215-4415 profillerinde üretilen gürültü frekansı analiz edildi ve profil, mümkün olan en etkili sonuçları vermek için yüz noktasına bölünüp incelenmektedir.

Eğim açısı 9-15 olduğunda, NACA 2215 profilinin gürültü frekansı 600 Hz ve NACA 4415 profilinin gürültü frekansı 1250 Hz bulunmuştur. Bu şekilde NACA 2215 profili daha az gürültü frekansı göstermektedir.



Şekil 4.9. NACA 2215-4415 profilin gürültü frekansı (QBlade, 2022)

#### 4.1.3. Dişli kutusu tasarımı

Dişli kutusu tasarımı, kullanılan jeneratör sistemi tasarıma yön vermektedir. Jeneratörün hangi devir aralıklarında istenen voltaj ve akım değerlerini ürettiği tespit edilmeli ve sistem bu yönde tasarlanmalıdır. Dişli kutusu kullanılması, sistemin verimini düşürmekle beraber alternatif akım (AC) çıkışlı jeneratörlerin kullanıldığı rüzgâr türbinlerinde kaçınılmaz bir sistem elemanı olarak karşımıza çıkmaktadır (Corke and Nelson, 2018).

#### 4.1.4. Hız değerlendirme

Nominal türbin gücü için 0- 26 m/s arası rüzgâr hızlarından ikisi seçilecek, daha sonra bütün türbin tasarımı ile kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri ve üretilebilecek elektrik enerjisi hesaplanacaktır.

#### 4.2. 10 MW Güçteki Rüzgâr Türbininin Analizleri

Bu çalışmadaki Rüzgâr Türbinleri nominal güç denkleme göre tasarlanacaktır. Böylece mekanik ve elektriksel kayıpları ihmal edip ve Betz kanuna göre rüzgâr

enerjisinden mümkün olan en büyük faydanın yüzde 59 kullanılmaktadır. Ama gerçek bir değer alabilmek için en yüksek güç katsayısı % 48 alınmaktadır.

Hava yoğunluğunun  $1,225 \text{ kg/m}^3$  olduğu göz önüne alındığında. Ve denklem (4.1) uygulanmasıyla Rüzgâr Türbinin Rotorun toplam çapı 140 (m) tasarlanmaktadır. Daha önce de belirttiğimiz gibi kayıpların ihmal edilmesiyle, aslında kayıp oranının %35'e kadar çıktığını ve 10 MW'lık türbinin rotorunun toplam çapının 130-140 (m) ye ulaşabileceğini görülmektedir. Bu çalışmada, NACA 4415-2215 rotor çapı profillerin üzerindeki yüklerin mukavemeti inceleyip ve her iki durumda da yıllık üretilen enerji miktarının hesaplanması ve karşılaştırılması da incelenmektedir.

#### 4.2.1. Kanatları 4415 NACA profile sahip 10 MW'lık rüzgar türbininin analizi

10 MW'lık bir rüzgâr türbin kulesinin uzunluğu 162 (m) referans olarak alınmıştır. Kanadın yarıçapı uzunluğu 60 (m) ve göbeğin çapı 3.5 (m) olarak tasarlanmaktadır. Buna karşılık, Kanadın tasarım ederken sırada 19 birime bölünmektedir, her biri yaklaşık 4 (m) uzunluğunda parçalanmaktadır. Betz yasasını kullanarak, türbin kanatlarının boyutları aşağıdaki Çizelge 4.1 gibi olacaktır.

$$PRT = 0,5 (\rho \times ART \times C_p \times V^3 \times \eta_d) \quad (4.2)$$

Bu nedenle, 4.2 denkleminin kullanılması, toplam mekanik kayıp ve elektrik iletiminin hesaplanması ile toplam verim ( $\eta_d$ ) %80 kullanarak. Ve maksimum ulaşabilen rüzgar hızı (V) 26 m/s olarak, güç katsayısının ortalaması ( $C_p$ ) %48 olarak hesaplanmasıyla, süpürülen toplam alan  $21563 \text{ m}^2$  bulunmaktadır. Ancak, 10 MW'lık türbinin rotor yarıçapı yani kanadın uzunluğu 64 m bulunmaktadır.

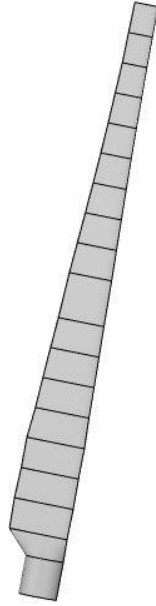
Çizelge 4.1. 10 MW'lık rüzgar türbininin NACA 4415 profilli kanat boyut değerleri

Eğim derecesi [derece]	Kabuk kalınlığı [mm]	Kiriş uzunluğu [m]	Konum uzunluğu [m]
20	100	4	4
20	100	4	8
29.17	165	8.241	12
29.17	170	8.517	16
30.17	179	8.925	20
34.89	181	9.055	24

37.66	163	8.139	28
36.93	153	7.641	32
36.20	142	7.110	36
35.47	131	6.572	40
44.74	121	6.046	44
44.01	111	5.539	48
43.28	101	5.064	52
42.55	92.4	4.618	56
41.82	84.3	4.217	60
35.22	78.0	3.899	64

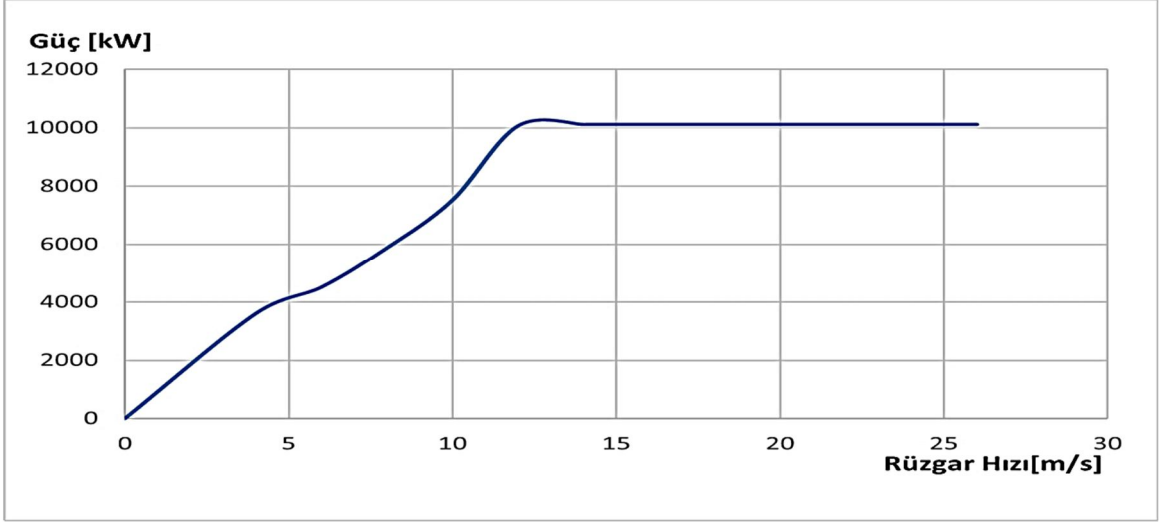
Şekil 4.10'da bir 10 MW'lık rüzgar türbininin NACA 4415 profili gösterilmektedir. Toplam süpürülen alanı 21.563 m<sup>2</sup> hesaplanmaktadır.

**NACA 4415 profilin 10 MW RT**  
**Süpürülen alanı : 21563.89 [m<sup>2</sup>]**



**Şekil 4.10.** 10 MW'lık rüzgar türbininin NACA 4415 profilli kanadı

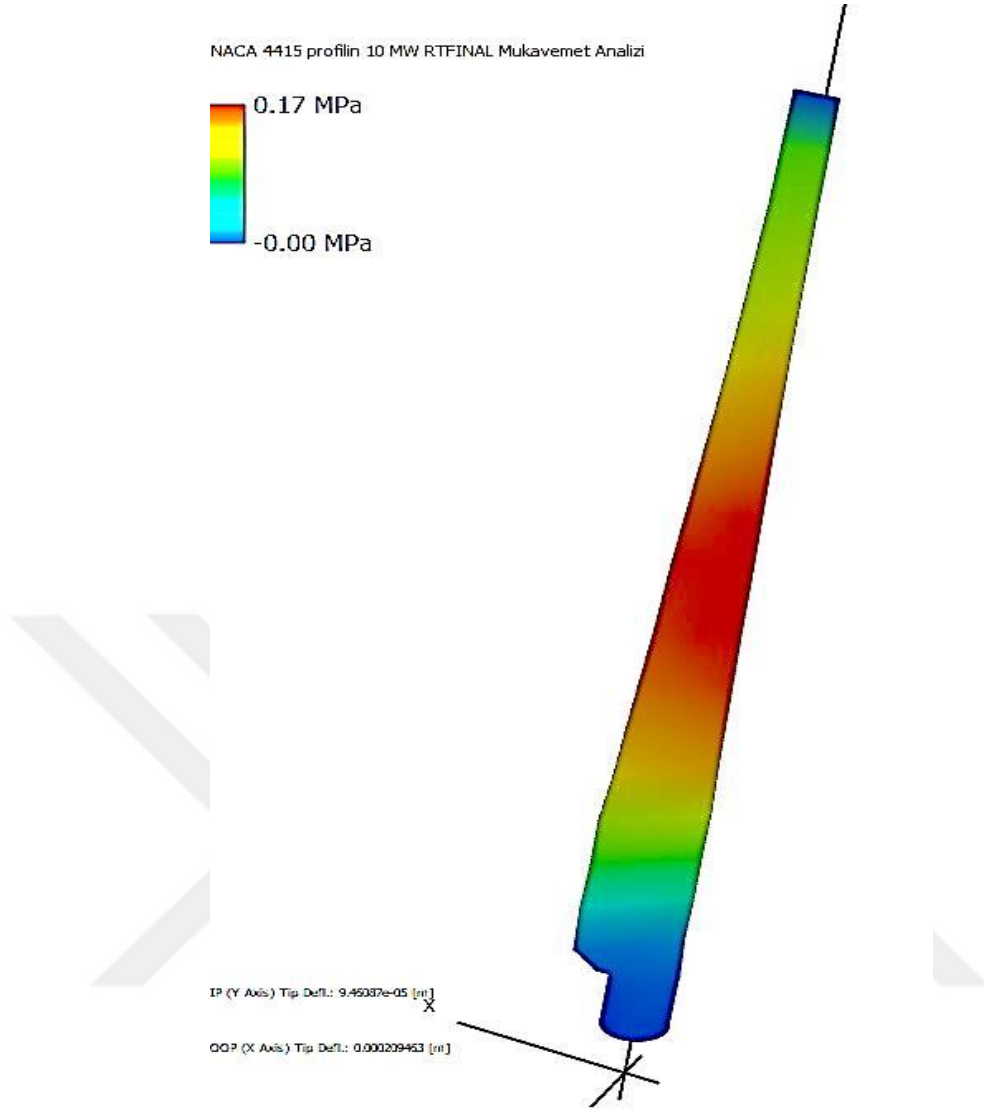
Bu çalışmada, Şekil 4.11'de. Rotor dönme hızı 1.5 d/d'da tespit ederek rüzgâr türbininin davranışı farklı rüzgâr hızlarında analiz edilmektedir.



Şekil 4.11. Elde edilebilen güç ve rüzgar hızı ilişkisi

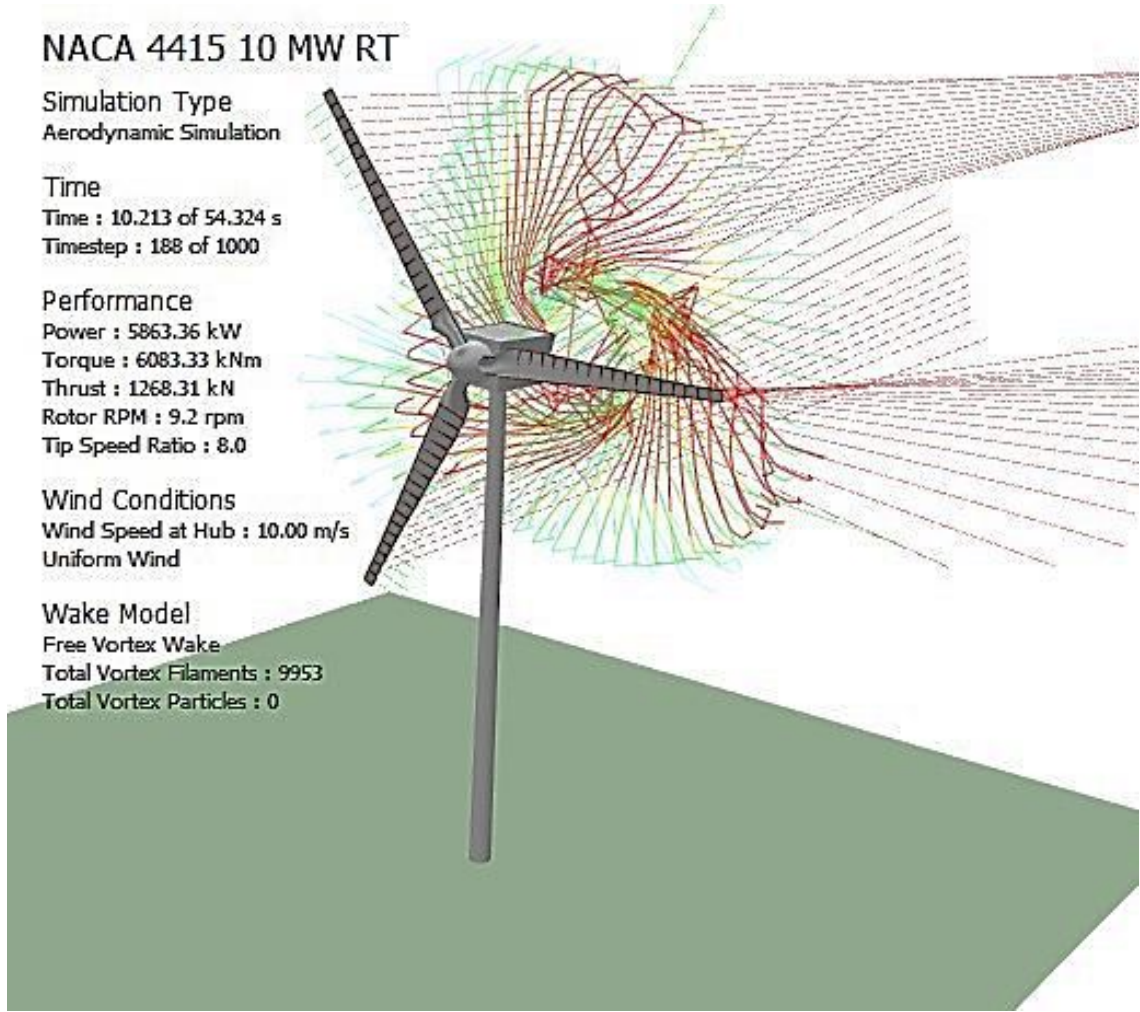
Şekil 4.11'da rotorun hızı 2 d/d olduğunda NACA 4415 profili 10 MW'lık rüzgâr türbini 0 m/s rüzgâr hızından 26 m/s rüzgar hızına kadar kanatların elde edilebilen güç analiz edilmiştir. Rüzgâr hızı artıkça elde edilebilen güç artmaktadır, ancak, jeneratörün maksimum kapasitesi ulaşıldıkçe rüzgâr türbini daha fazla elektrik gücü üretmemektedir.





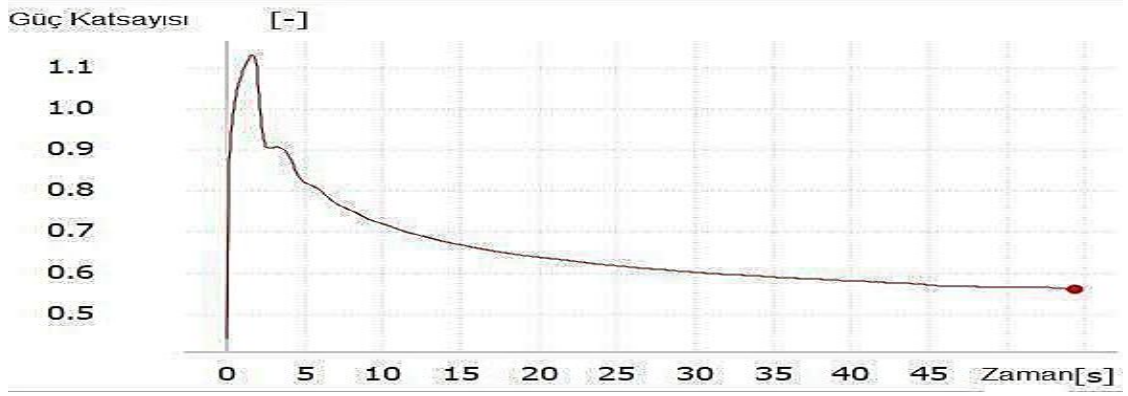
Şekil 4.12. 10 MW'lık rüzgâr türbininin NACA 4415 profilli kanadın mukavemet analizi

Şekil 4.12'de Kanadın kenarının başlangıcı en düşük basınca sahiptir, çünkü bu kısımda desteklenecek malzeme çoktur, ayrıca profil segmenti henüz başlamamıştır. Yavaş yavaş, kanadın profili ölçeklenmeye başlar ve bu bölgeden başlayarak kanadın parçaları üzerindeki baskı artmaktadır. Kanadın farklı kısımlarına etki eden kuvvetlerin analizi sırasında, en şiddetli etkinin 12-25 (m) arasındaki kısımda olduğunu analiz edilmektedir. Çünkü profilin kıvrımlarının oluşmaya başladığı nokta bu noktadır ve bu başlangıç ağırlık ve malzeme bileşimi açısından en zayıf noktadır. Bu parçalar çatlakları ve çökmeleri önlemek için gerekli malzemelerle güçlendirilmelidir. Kanadın en az etkili kısımları taraflarındadır ve en yüksek kuvvet etkisinden etkilendiği 12-25 (m) kısımdan uzaklaştıkça etki giderek artar.



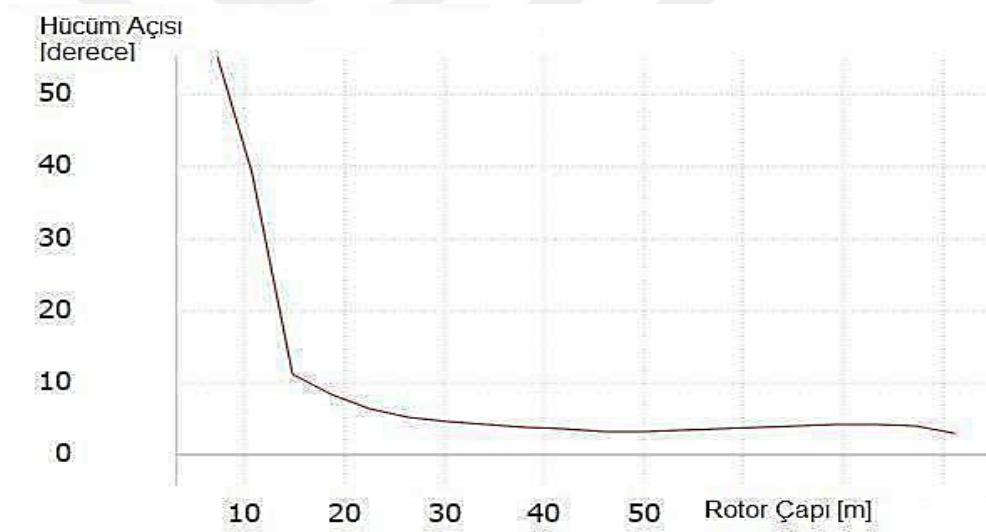
Şekil 4.13. NACA 4415 profili 10 MW rüzgar türbininin akış analizi

Şekil 4.13'te Türbin simülasyonu gösterilmektedir, hava yoğunluğu  $1.225 \text{ kg/m}^3$  olduğu göz önüne alarak, Bu simülasyonda, rüzgar hızı  $10 \text{ m/s}$  olarak alındı. Dikkate alınarak, atmosferik basınç  $100 \text{ kPa}$ 'dır. Atmosfer basıncı, deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı olarak bir yerden diğerine değişebilir. Ama sonuç olarak, açıklandığı gibi alındı. Rüzgar türbinin kulesinin uzunluğu  $162 \text{ (m)}$  olarak tasarlanmakta alınmaktadır. Yerçekimi ivmesi de saniyede  $9.81 \text{ m/s}^2$  alınmaktadır. Şekil 4.14'te türbin ilk çalışmaya başlangıçta maksimum ulaşabilen güç katsayısı  $1.1$  olmaktadır. Türbinin stabilize etmek için çalışmaya başladıktan  $57$  saniye sonra stabilitesi görülmektedir. Stabilize ettikten sonra maksimum ulaşabilen güç katsayısı  $59\%$  olmaktadır.



Şekil 4.14. 10 MW'lık rüzgâr türbini NACA 4415 profilinin güç katsayısı

Şekil 4.15'te, hücum açısının son şeklini göstermektedir. Hücum açısı kanadın başında 0 (m) ve 56 derece aralarında mümkün olduğunca büyüktür ve kanadın uzunluğundaki artışla birlikte hücum açısı değişmektedir. Kanadın 15 (m) uzunluğunda oldukça hücum derecesi en düşük değere 4 olarak ulaşmaktadır.



Şekil 4.15. 10 MW'lık rüzgar türbini NACA 4415 profilin hücum açısı

#### 4.2.1.1. NACA 4415 10 MW rüzgar türbininin yıllık enerji üretimi

Türbinin yıllık çalışma saatlerinin 8760 saat olduğu ve minimum rüzgâr hızı minimum 7,5 ve maksimum 14 m/s olduğu alınmaktadır. Bu şekilde Yıllık ortalama rüzgâr hızı 11 m/s olmaktadır. Türbinin toplam verimliliğinin % 48 olduğu göz önüne alındığında ve mekanik enerji kaybı 0.95 olarak alınmaktadır. Simülasyon sistemine göre türbin tarafından üretilen enerji miktarının ortalaması 8.6 MW'tır. Yıllık enerji miktarı denkleminde göre aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$YEÜ = 8,6 \text{ MW} \times 8760 = 75,336,000 \text{ kWh}$$

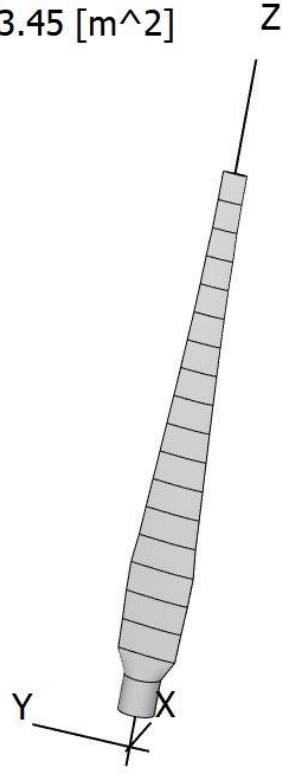
#### 4.2.2. NACA 2215 profilli 10 MW'lık rüzgâr türbininin analizi

10 MW'lık bir rüzgar türbin kulesinin uzunluğu 162 (m) referans olarak alınmıştır. Kanadın uzunluğu 70 (m) ve göbeğin çapı 5 (m) olarak tasarlanmaktadır. Buna karşılık, kanadın tasarımı yapılırken 19 parçaya bölünmektedir. Parçaların her biri yaklaşık 4 (m) uzunluğundadır. Betz yasasını kullanarak, türbin kanatlarının boyutları aşağıdaki Çizelge 4.2'de ki gibi bulunmaktadır.

Çizelge 4.2. 10 MW'lık rüzgar türbinin NACA 2215 profilli kanat boyut değerleri

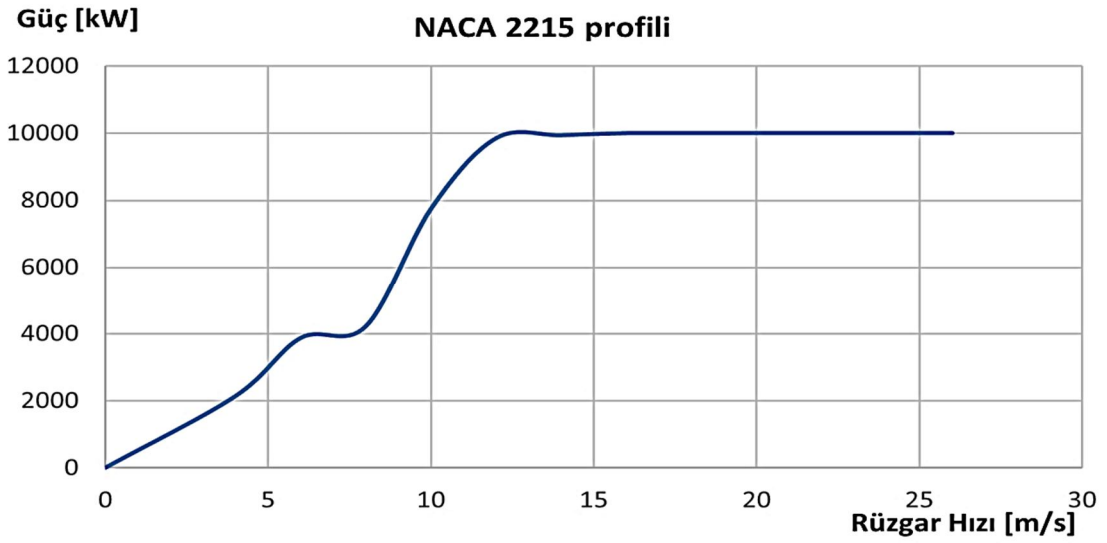
Eğim derecesi [derece]	Kabuk kalınlığı [mm]	Kiriş uzunluğu [m]	Konum uzunluğu [m]
0	100	4	4
0	100	4	8
29.17	165	8.241	12
29.17	170	8.517	16
29.17	179	8.925	20
38.89	181	9.055	24
37.66	163	8.139	28
36.93	153	7.641	32
40.20	142	7.110	36
41.47	131	6.572	40
44.74	121	6.046	44
44.01	111	5.539	48
43.28	101	5.064	52
42.55	92.4	4.618	56
41.82	84.3	4.217	60
41.22	78.0	3.899	64

2215 NACA 10 MW RT  
Süpürülen alanı : 20533.45 [m<sup>2</sup>]



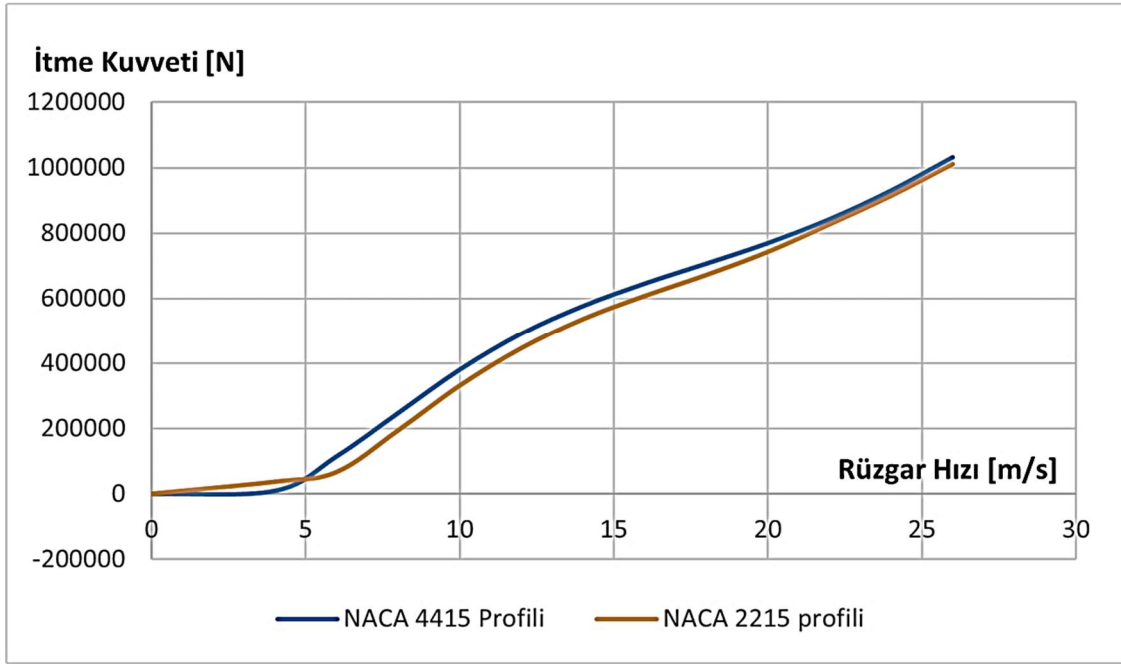
Şekil 4.16. 10 MW'lık rüzgâr türbinin 2215 NACA profilin kanatları

Şekil 4.16'da bir 10 MW'lık rüzgâr türbinin NACA 2215 profili kanadı verilmiştir. Bu kanat uzunluğu için toplam süpürülen alanı 20533.45 m<sup>2</sup>'dir.



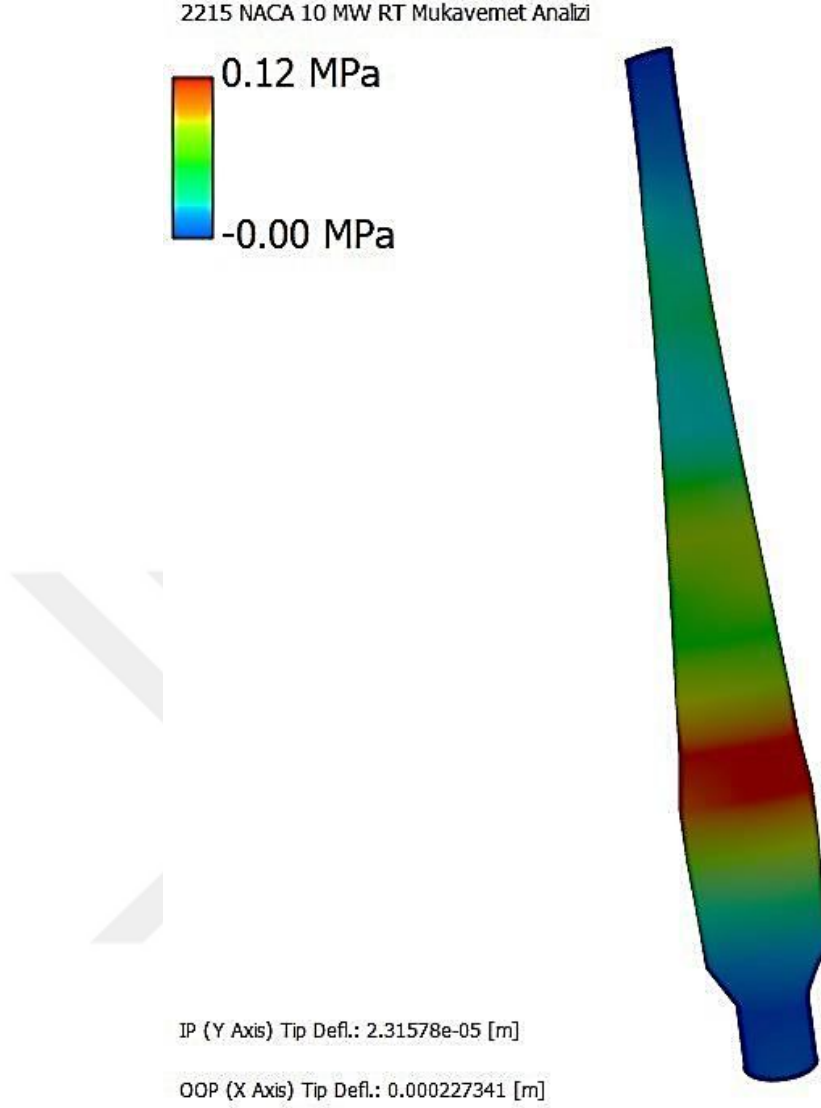
Şekil 4.17.-Elde edilebilen güç ve rüzgâr hızı ilişkisi

Şekil 4.17'da rotorun hızı 1.5 d/d olduğunda NACA 2215 profili 10 MW'lık rüzgâr türbini 0 m/s rüzgâr hızından 26 m/s rüzgâr hızına kadar kanatların elde edilebilen güç analiz edilmiştir. Rüzgâr hızı artıkça elde edilebilen güç artmaktadır, ancak, jeneratörün maksimum kapasitesi ulaşıldıkçe rüzgâr türbini daha fazla elektrik gücü üretmemektedir.



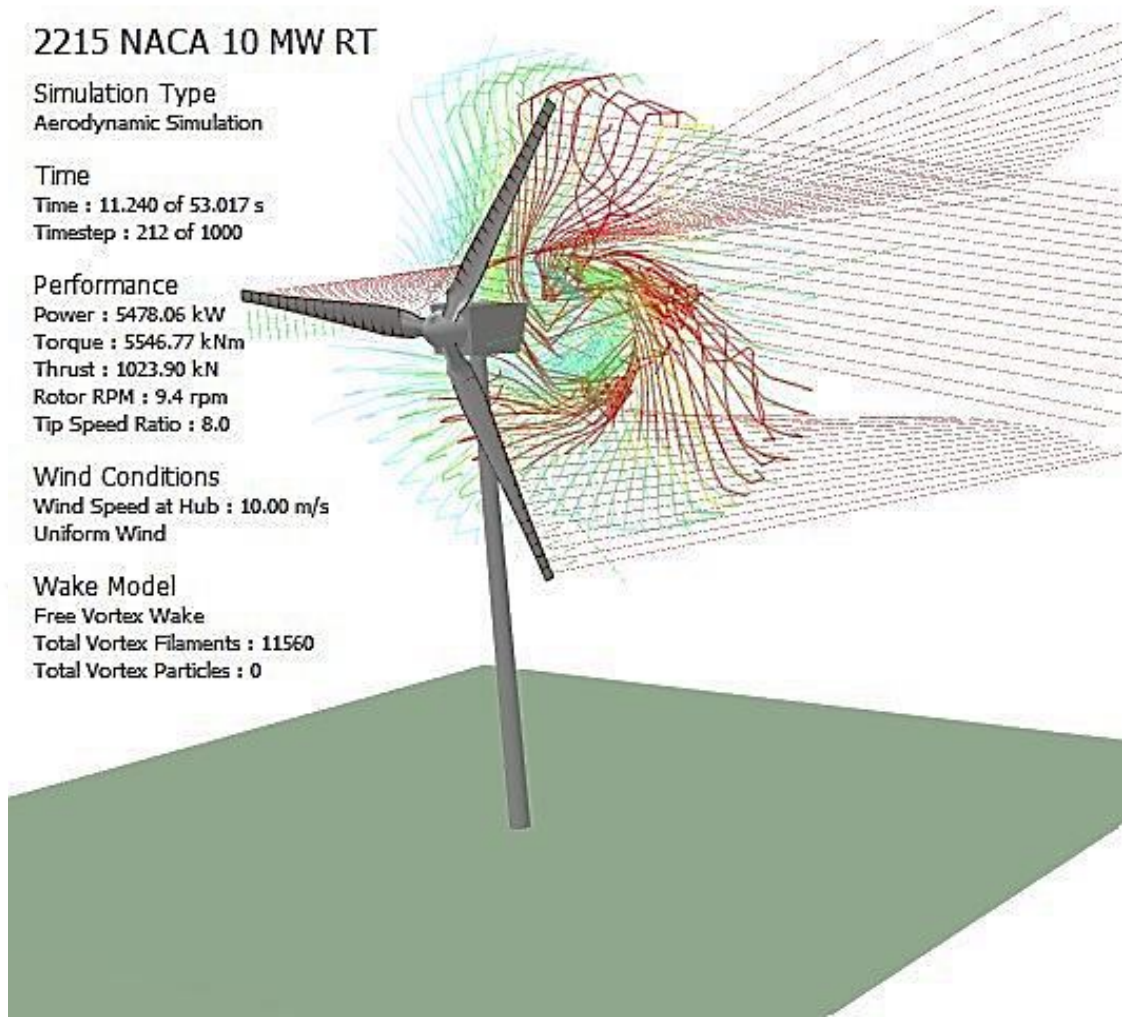
Şekil 4.18. 10 MW'lık rüzgâr türbinin 2215-4415 NACA profilin üzerindeki itme kuvveti

Şekil 4.18'da rotorun hızı 1.5 d/d olduğunda NACA 2215-4415 profilleri 10 MW'lık rüzgâr türbini 0 m/s rüzgâr hızından 26 m/s rüzgâr hızına kadar kanatların itme kuvvetleri analiz edilmiştir. NACA 2215 profilin kanadı daha az itme kuvveti sahibi olduğunu göstermektedir. Rüzgâr hızı artarak rüzgâr türbinin elde edilebildiği güç artmaktadır ve itme kuvveti artmaktadır.



Şekil 4.19. 10 MW'lık rüzgâr türbini 2215 NACA profilin kanatların mukavemet analizi

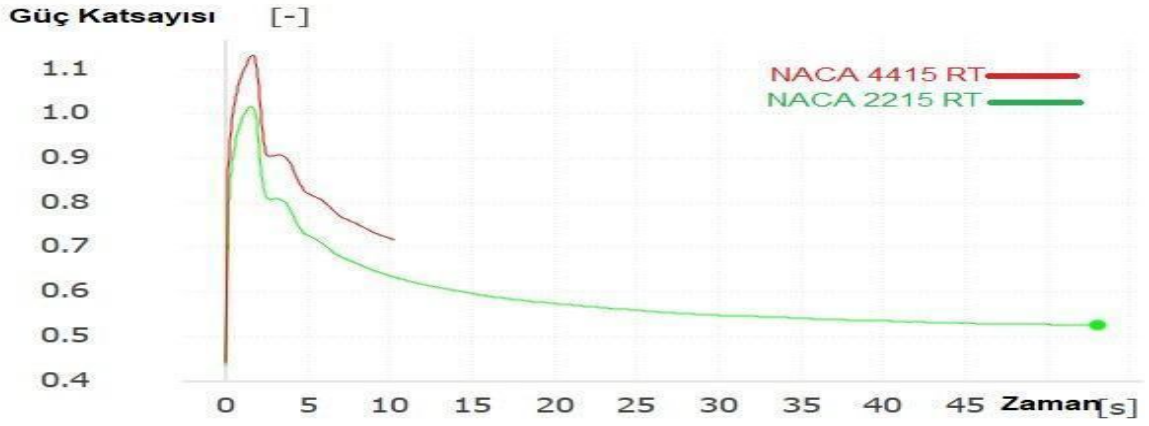
Şekil 4.19'de Kanadın kenarının başlangıcı en düşük basınca sahiptir, çünkü bu kısımda desteklenecek malzeme çoktur, ayrıca profil segmenti henüz başlamamıştır. Yavaş yavaş, kanadın profili ölçeklenmeye başlar ve bu bölgeden başlayarak kanadın parçaları üzerindeki baskı artmaktadır. Kanadın farklı kısımlarına etki eden kuvvetlerin analizi sırasında, en şiddetli etkinin 12-25 (m) arasındaki kısımda olduğunu analiz edilmektedir. Çünkü profilin kıvrımlarının oluşmaya başladığı nokta bu noktadır ve bu başlangıç ağırlık ve malzeme bileşimi açısından en zayıf noktadır. Bu parçalar çatlakları ve çökmeleri önlemek için gerekli malzemelerle güçlendirilmelidir. Kanadın en az etkili kısımları taraflarındadır ve en yüksek kuvvet etkisinden etkilendiği 12-25 (m) kısmından uzaklaştıkça etki giderek artmaktadır.



Şekil 4.20. NACA 2215 profili 10 MW'lık rüzgâr türbinin akış analizi

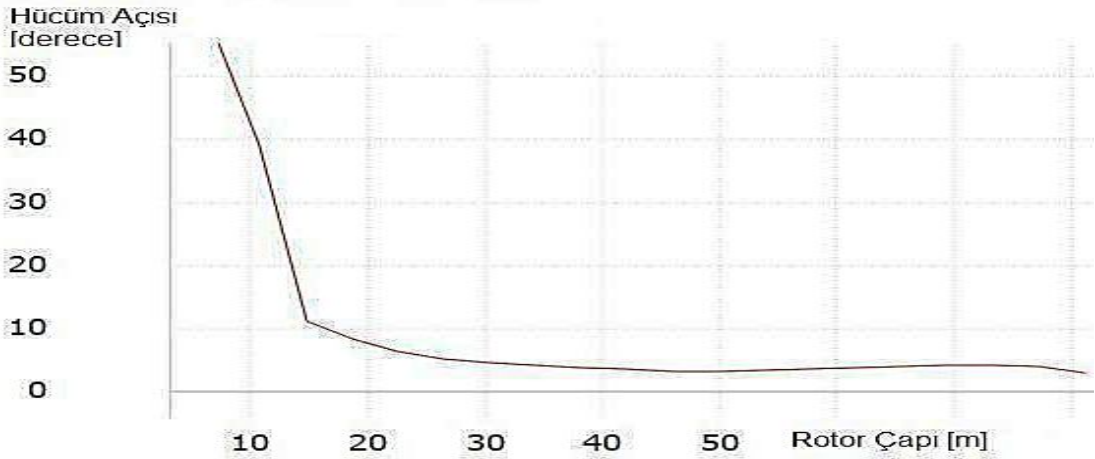
Şekil 4.20'de. Türbin simülasyonu gösterilmektedir, hava yoğunluğu  $1.225 \text{ kg/m}^3$  olduğu göz önüne alarak, Bu simülasyonda, rüzgar hızı  $10 \text{ m/s}$  olarak alındı. Dikkate alınarak, atmosferik basınç  $100 \text{ kPa}$ 'dır. Atmosfer basıncı, deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı olarak bir yerden diğerine değişebilir. Ama sonuç olarak, açıklandığı gibi alındı rüzgar türbinin kulesinin uzunluğu  $162 \text{ (m)}$  olarak tasarlanmaktadır. Yerçekimi ivmesi de saniyede  $9.81 \text{ m/s}^2$  alınmaktadır. Türbin ilk çalışmaya başlangıçta maksimum ulaşabilen güç katsayısı  $1.1$  olmaktadır. Türbinin stabilize etmek için çalışmaya başladıktan  $57$  saniye sonra stabilitesi görülmektedir. Stabilize ettikten sonra maksimum ulaşabilen güç katsayısı  $59\%$  olmaktadır.





Şekil 4.21. 10 MW'lık rüzgar türbini güç katsayısı farklı NACA profillerinde

Şekil 4.21'de, her iki profilin mukavemet katsayısının karşılaştırmasını göstermektedir. NACA 2215 profilinin güç katsayısının NACA 4415 profilin karşılığına %15 daha düşük olduğunu bulunmaktadır. Şekil 4.21'de 10 MW'lık rüzgar türbininde NACA 2215 profili ulaştığı maksimum güç katsayısı 1 olduğunda, NACA 4415 profilinin ulaştığı maksimum güç katsayısı 1.15 bulunmaktadır.



Şekil 4.22. Hücum açısı ve rotor çapı ilişkisi

Şekil 4.22'de, NACA 2215 hücum açısının son şeklini göstermektedir. Hücum açısı kanadın başında 0 (m) ve 56 derece aralarında mümkün olduğunca büyüktür ve kanadın uzunluğundaki artışla birlikte hücum açısı değişmektedir, kanadın 15 (m) uzunluğunda oldukça hücum derecesi en düşük değere 4 olarak ulaşmaktadır.

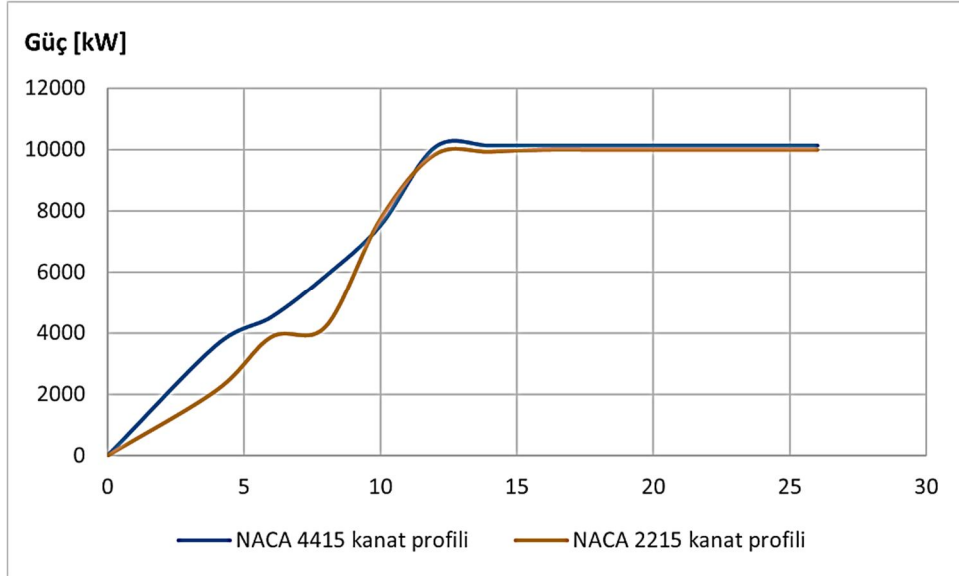
#### 4.2.2.1. NACA 2215 10 MW'lık rüzgar türbinin yıllık enerji üretimi

Türbinin yıllık çalışma saatlerinin 8760 saat olduğu ve minimum rüzgar hızı minimum 4 ve maksimum 26 m/s olduğu alınmaktadır. Bu şekilde, ortalama yıllık rüzgar hızı 11 m/s olarak alınmaktadır. Türbinin toplam verimliliğinin % 48 olduğu göz önüne alındığında, dahili mekanik kayıpları ve elektrik jeneratöründeki kayıplara 95 % ek olarak ısı ve basınçtan kaynaklanan toplam kayıpları hesaba katarak. Toplam enerji çıkışı ortalaması simülasyon sistemine göre türbin tarafından 11 m/s ortalama rüzgar hızında elde edilen enerji miktarı 8.5 MW'tir. Yıllık enerji miktarı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$YEÜ = 8.5 \text{ MW} \times 8760 = 74,805,000 \text{ kWh}$$

16 m/s rüzgar hızında, NACA 4415 profilinin NACA 2215 profilinden daha yüksek bir verime sahip olmaktadır. NACA 2215 profilinin verimliliğini artırmak için rotor dönme hızının 1.5 d/d' ya düşürüldüğü ortaya çıkmaktadır.

#### 4.2.3. 10 MW'lık rüzgar türbini farklı rüzgar hızlarında üretilen güç



Şekil 4.23. NACA 2215-4415 profillerinde elde edilebilen güç

Şekil 4.23'te, 10MW'lık rüzgâr türbinin kanatların dönme hızı 1.5 d/d olarak kanatların üretebildiği gücü göstermektedir. NACA 4415 profil 'in, 8 m/s rüzgâr hızında NACA

2215 profil'e göre yaklaşık % 28 daha çok fazla enerji üretme ve absorbe etme kabiliyetine sahip olduğu gösterilmiştir. Ve rüzgâr hızı arttıkça kanatlar arasındaki bu yüzde farkı azalmaktadır. Rüzgâr hızı 14 m/s iken bu fark yüzdesi %16'e ulaşmaktadır.

**Çizelge 4.3.** 10 MW'lık rüzgar türbini farklı rüzgar hızlarında üretilen güç

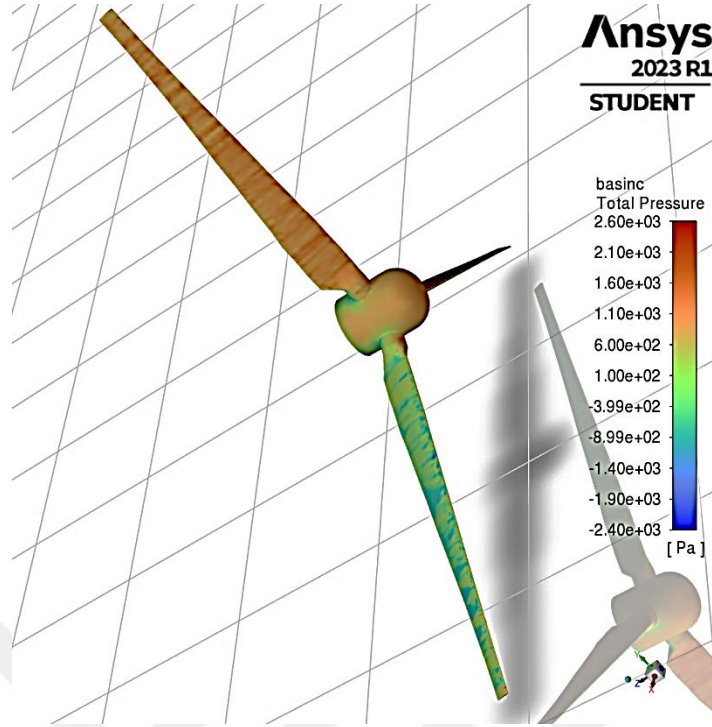
Rüzgar Hızı [m/s]	NACA 4415 profili 10 MW'lık RT Üretilen Güç [kW]	NACA 2215 profili 10 MW'lık RT Üretilen Güç [kW]
4	3610	2139
6	4516	3870
8	5880	4223
10	7525	7751
12	10073	9852
14	10121	9937

Çizelge 4.3'te, rotorun hızı 1.5 d/d olduğunda NACA 2215-4415 profili 10 MW'lık rüzgâr türbini 0 m/s rüzgar hızından 26 m/s rüzgar hızına kadar kanatların elde edilebilen güç analiz edilmiştir. Rüzgar hızı artıkça elde edilebilen güç artmaktadır, ancak, jeneratörün maksimum kapasitesi ulaşabildikçe rüzgar türbini daha fazla elektrik gücü üretmemektedir. NACA 4415 profili kanadı daha fazla güç üretebilme kabiliyeti göstermektedir.

#### 4.2.4. 10 MW'lık rüzgâr türbininin mukavemet analizi.

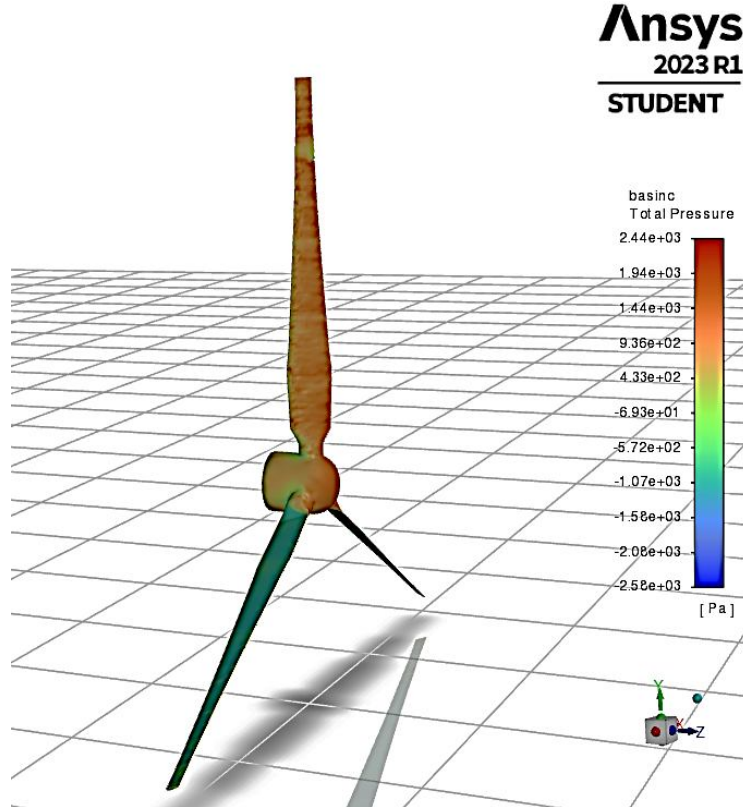
Büyük türbinler tasarlanırken rüzgâr kuvvetlerini etkisine karşı direnci dikkate alınmalıdır. Analizi tam olarak yapmak için birden fazla program kullanılmıştır. Hem Ansys Fluent hem de Qblade programları kullanılmıştır. Şekil 4.24'te Ansys Fluent program kullanarak NACA 2215-4415 profiller tasarımlarını gösterilmektedir.

Sınır koşulları kullanılırken 50 m/s rüzgâr hızı kullanılmıştır. Reynold katsayısının ortalaması 2400 ve hava yoğunluğu ise 1.225 kg/m<sup>3</sup> olarak kullanılmıştır. Simülasyonun maksimum doğruluğunu elde etmek için meshing boyutu 0.05 olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4.24. ANSYS Fluent programıyla NACA 4415 profilin kanadın üzerindeki akış analizi

Şekil 4.24'te 50 m/s rüzgar hızında NACA 4415 kanadın etkileyen üzerindeki akış basıncın analize edilmiştir. Şekil 4.25'da gösterildiği gibi, basınca en çok maruz kalan kısımlarına özellikle kanatlar olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.25. ANSYS fluent programıyla NACA 2215 profilin kanadın üzerindeki akış analizi

Şekil 4.25’da 50 m/s rüzgar hızında NACA 2215 kanadın etkileyen üzerindeki akış basıncın analize edilmiştir.

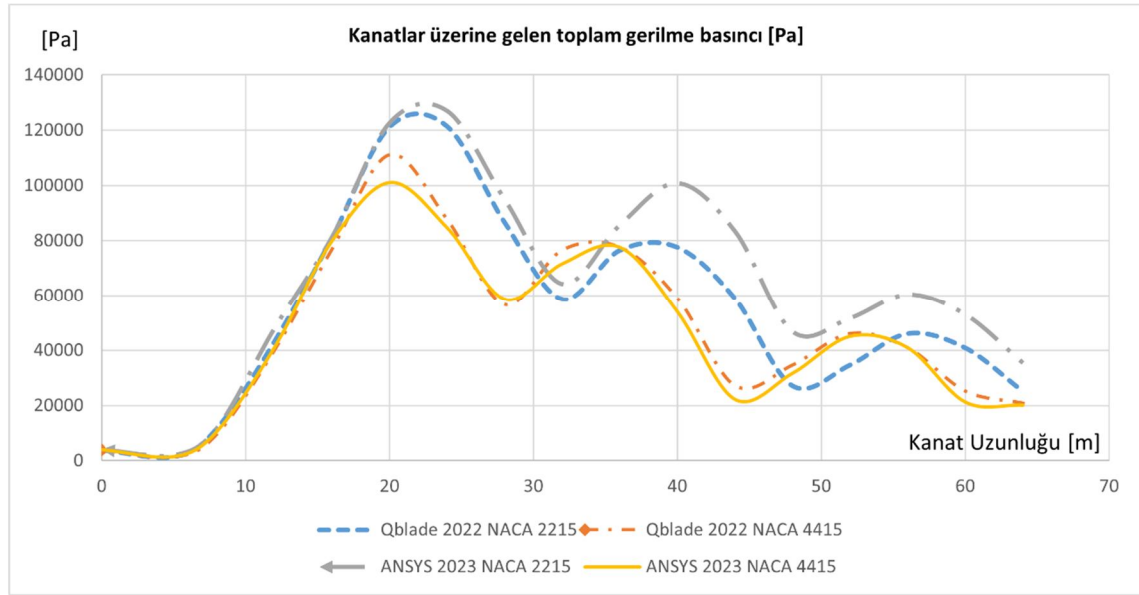
Profilin kendisi üzerindeki en etkili baskı ise profilin uçlarıdır. Bu nedenle, profilin gövdesi boyunca kuvvetlerde çok az fark vardır. Böylece kanat profil gövdesi boyunca baskı rengi hemen hemen aynıdır. 10 MW’lık her iki kanat profillerine gerilme basıncı maruz kalmaktadır. Çizelge 4.4’te, kanatlar üzerindeki basıncı konuma göre analiz edilmektedir.

**Çizelge 4.4.** 10 MW’lık rüzgar türbinin farklı NACA profillerin üzerindeki basınç

Kanat yarıçapı (m)	NACA 2215 profili 10 MW’lık gerilme basıncı (Pa)	NACA 4415 profili 10 MW’lık gerilme basıncı (Pa)
0	4005,14	4103,68
5	1496,11	1614,19
8	11648,81	11796,05
12	43076,8	44025,28
16	80974,08	81418,4
20	121120,6	122746,82
24	86693,43	127040,54
28	58749,43	94965,02
32	76510,211	64258,6
36	77642,9	85731,9
40	59050,30	100893,54
44	27206,09	83426,04
48	34706,3	46807,89
52	46107,9	51769,7
56	40952,7	60428,7
60	25238,9	53084,8
64	8917,611	35428,8

Çizelge 4.4’te NACA 2215-4415 kanatlarının her biri arasındaki basınç farkını göstermektedir. NACA 4415’in profilindeki basıncın etkisinin 2215 profilinden daha yüksek olduğu gösterilmiştir. 8 m uzunluğundan başlayarak kanatlara olan basınç artar. Bu profilin uzunluğundan itibaren formasyona dahil olur. Bu nedenle donatı o noktadan

itibaren takviye artırılarak yapılmalıdır. Basınç, kanat boyunun sonuna ulaşana kadar hemen hemen sabit kalmaktadır.



Şekil 4.26. 10 MW'lık rüzgar türbinin farklı kanat profillerin gerilme basınç analizi.

Şekil 4.26'de, NACA 2215-4415 kanatlarının her biri arasındaki basınç farkını göstermektedir. NACA 4415'in profilindeki basıncın etkisinin 2215 profilinden daha büyük olduğu gösterilmiştir. Çizelge 4.4'te, NACA 4415 kanat profili üzerindeki basıncın NACA 2215'ten daha az olduğu gösterilmiştir. Kanat cismin üzerindeki maksimum basınç ise her iki profile 12 (m) ile 26 (m) arasında bulunmaktadır. Ayrıca, Q-Blade ve Ansys programları NACA profilleri analiz edildiğinde arasındaki fark yaklaşık olarak 4% bulunmuştur. Bu fark hata doğrulamasından veya meshing boyutlamadan neden olabilmektedir.

#### 4.2.4. 10 MW'lık rüzgar türbininin mil tasarımı ve mukavemet analizi

Rotor her zaman güçlü çelikten yapılmıştır. 10 MW'lık türbinin göbek çapı ise 2.134 metre olarak hesaplandı. Kanatların dönüş hızlarına göre eğimdeki farklı dirençlerin analizi yapılmıştır.

Çizelge 4.5. 10 MW'lık rüzgar türbininin rotor milin özellikleri

Rotor kütlesi (3 kanatlı)	126.29 ton
Rotor göbeği atalet momenti	$5.7833 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2$

**Çizelge 4.6** 10 MW'lık rüzgar türbin'nin rotor milin mukavemet analizi

Milin dönme hızı d/d	Tork [kNm]
0.2	477464.8298
0.25	381971.8639
0.3	318309.8865
0.5	190985.9319
0.75	127323.9546
1	95492.96596
2	47746.48298

Çizelge 4.6'da tabloda görüldüğü gibi, milin dönme hızı 0.2 d/d'den 2 d/d'ye çıkarıldığında, dönme momenti 477464 kNm'dan 47746 kNm'ye düşülmektedir. Ancak maksimum 10 MW'lık rüzgâr türbinin dönme hızı 2 d/d düşmektedir.

#### 4.3. 25 MW'lık Rüzgâr Türbininin Analizi

Bu çalışmadaki rüzgar türbinleri nominal güç denkleme göre tasarlanacaktır. Böylece mekanik ve elektriksel kayıpları ihmal edip ve Betz kanuna göre rüzgar enerjisinden mümkün olan en büyük faydanın %59 kullanılmaktadır. Hava yoğunluğunun  $1.225 \text{ kg/m}^3$  olduğu göz önüne alındığında. Rüzgar türbinin rotorun toplam çapı 120 (m) tasarlanmaktadır. Daha önce de belirttiğimiz gibi kayıpların ihmal edilmesiyle, aslında kayıp oranının %35'e kadar çıktığını ve 25 MW'lık türbinin rotorunun toplam çapının 203.7 m'ye ulaşabileceğini görülmektedir. Bu çalışmada, NACA 4415-2215 rotor çapı profillerin üzerindeki yüklerin mukavemeti inceleyip ve her iki durumda da yıllık üretilen enerji miktarının hesaplanması ve karşılaştırılması da incelenmektedir. Bu durumda dönme hızının büyük türbin nedeniyle rotorun devresel hızı 1 d/d alınmaktadır.

$$P_{RT} = 0,5 (\rho \times A_{RT} \times C_p \times V^3 \times \eta_d) \quad (4.3)$$

Bu nedenle, 4.3 denkleminin kullanılması, toplam mekanik kayıp ve elektrik iletiminin hesaplanması ile verim ( $\eta_d$ ) %80 kullanarak. Ve maksimum ulaşılabilir rüzgar hızı (V) 14 m/s olarak, güç katsayısı ( $C_p$ ) %45 olarak hesaplanmasıyla, süpürülen toplam alan  $31576 \text{ m}^2$  bulunmaktadır. Ancak, 25 MW'lık kanatın uzunluğu 93 m bulunmaktadır.

### 4.3.1. NACA 4415 profili ile 25 MW'lık Rüzgar Türbininin Analizi

25 MW'lık bir rüzgar türbin kulesinin uzunluğu 203.7 (m) referans olarak alınmıştır. Kanadın uzunluğu 93 m ve göbeğin çapı 7 m olarak tasarlanmaktadır. Kanadın tasarımı yapılırken kanat 20 birime (parçaya) bölünmektedir, her biri yaklaşık 5 (m) uzunluğunda parçalardan oluşmaktadır. Betz yasasını kullanarak, türbin kanatlarının boyutları aşağıdaki çizelge 4.7'de bulunmaktadır.

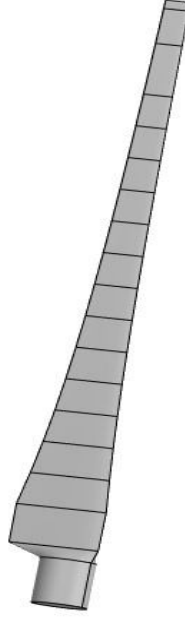
Çizelge 4.7. 25 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilli kanat boyut değerleri

Konum uzunluğu (m)	Kiriş uzunluğu (m)	Kabuk kalınlığı [mm]	Eğim derecesi (derece)
0	10	200	30
5	10	236	30
7	13	207	39.17
15	11.207	191	39.17
20	10.158	187	39.17
25	10.925	173	38.89
30	9.836	147	37.66
35	8.212	137	36.93
40	7.482	128	36.20
45	7.676	119	45.47
50	6.981	109	44.74
55	5.155	101	44.01
65	5.072	93.3	43.28
70	4.642	91.22	43.55
75	4.559	90.653	42.92
80	4.385	88.123	32.72
85	4.069	87.633	32.45
90	3.98	86.156	32.11
93	3.788	85.125	31.89

Şekil 4.27'de bir 25 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profili gösterilmektedir. 93 m kanat uzunluğu için toplam süpürülen alan 31576.93 m<sup>2</sup> hesaplanmaktadır.

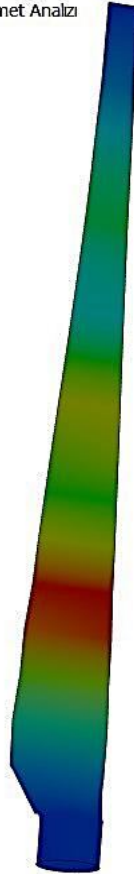
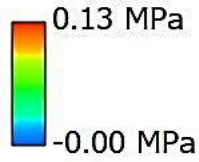


NACA 4415 profilin 25 MW RT Düzenli  
Swept Area: 32435.13 [m<sup>2</sup>]



Şekil 4.27 25 MW'lık rüzgar türbininin NACA 4415 profilli kanadı

NACA 4415 profilin 25 MW RT Mukavemet Analizi

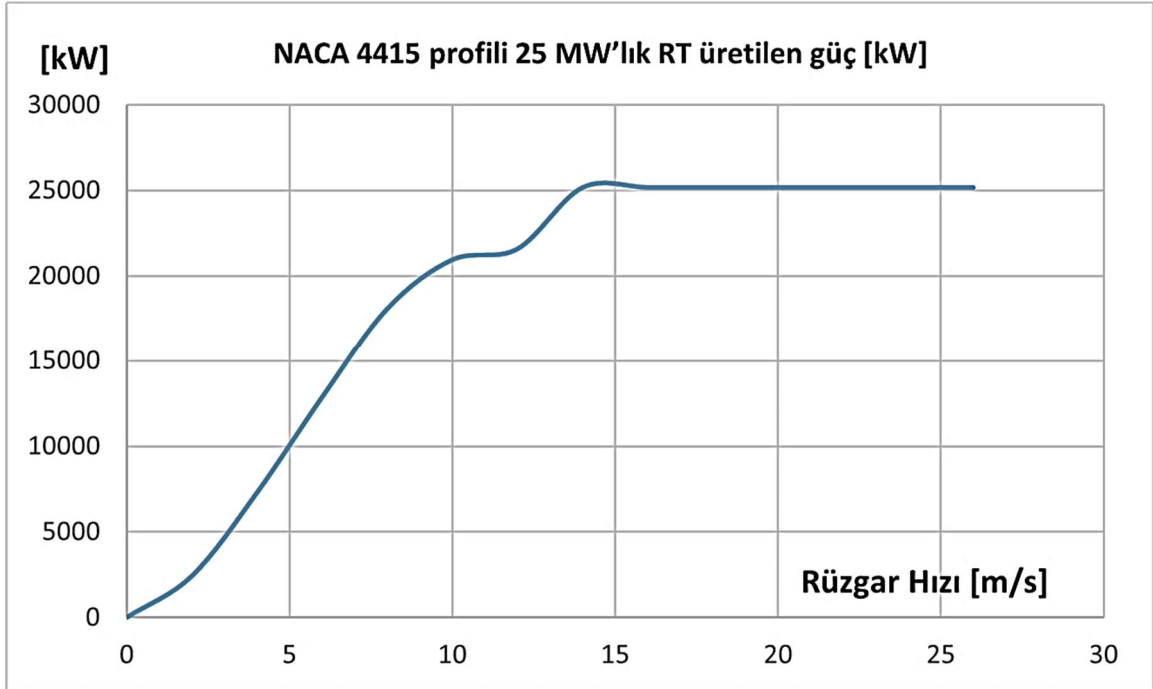


IP (Y Axis) Tip Defl.: 1.71074e-05 [m]

OOP (X Axis) Tip Defl.: 0.000161434 [m]

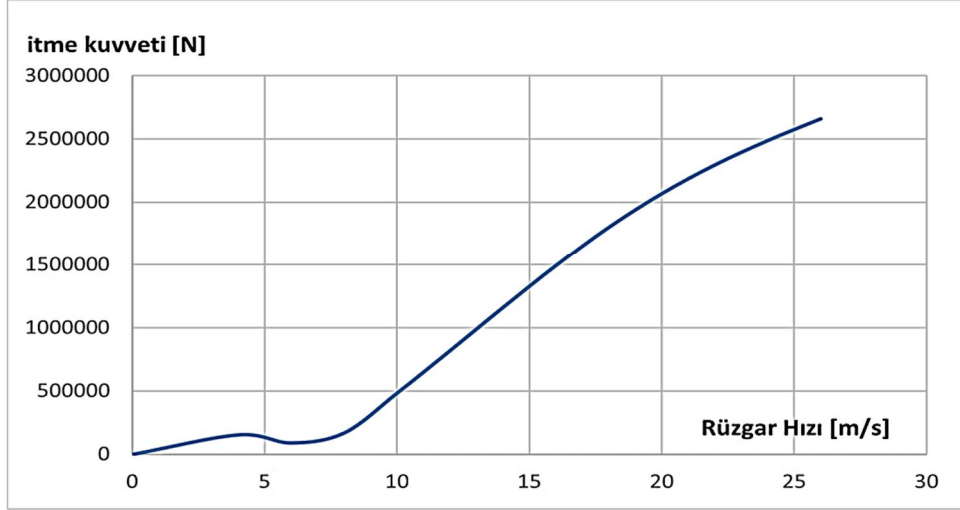
Şekil 6.28. 25 MW'lık rüzgar türbini 4415 NACA profilli kanadın mukavemet analizi

Şekil 4.28'da Kanadın kenarının başlangıcı en düşük basınca sahiptir, çünkü bu kısımda desteklenecek malzeme çoktur, ayrıca profil segmenti henüz başlamamıştır. Yavaş yavaş, kanadın profili ölçeklenmeye başlar ve bu bölgeden başlayarak kanadın parçaları üzerindeki baskı artmaktadır. Kanadın farklı kısımlarına etki eden kuvvetlerin analizi sırasında, en şiddetli etkinin 20-25 (m) arasındaki kısımda olduğunu analiz edilmektedir. Çünkü profilin kıvrımlarının oluşmaya başladığı nokta bu noktadandır ve bu başlangıç ağırlık ve malzeme bileşimi açısından en zayıf noktadır. Bu parçalar çatlakları ve çökmeleri önlemek için gerekli malzemelerle güçlendirilmelidir. Kanadın en az etkili kısımları taraflarındadır ve en yüksek kuvvet etkisinden etkilendiği 32-48 (m) kısımdan uzaklaştıkça etki giderek artırmaktadır.



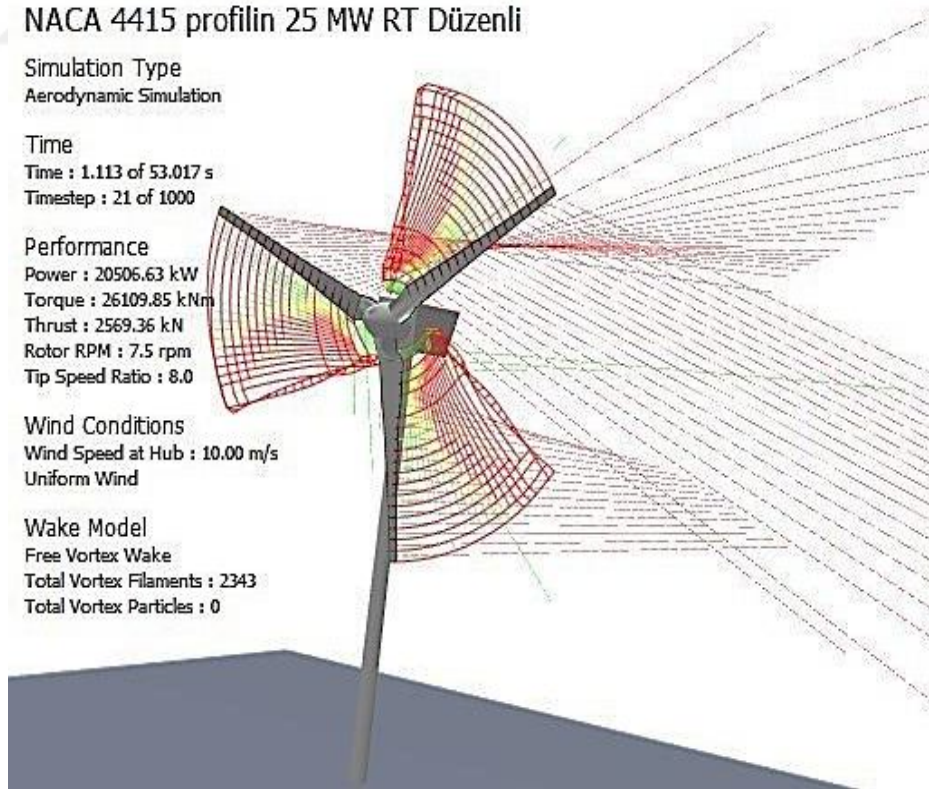
Şekil 4.29. 25 MW'lık rüzgar türbininin NACA 4415 profili elde edilebilen güç [kW]

Şekil 4.29'da. Rotor dönme hızı 1 d/d tespit ederek rüzgâr türbininin davranışı farklı rüzgâr hızlarında analiz edilmektedir. 5 m/s rüzgâr hızında türbinin en düşük elde edilebilecek güç miktarı (10,000 kW) olarak gösterilmektedir. Rüzgâr hızı artıkça elde edilebilecek güç miktarı artar. Bu rüzgâr türbinin maksimum elde edilebilecek güç miktarı 25 MW'lık olarak 14 m/s rüzgâr hızında görülmektedir. Rüzgâr hızı artıkça elde edilebilen güç artmaktadır, ancak, jeneratörün maksimum kapasitesi 25 MW'a ulaşabildikçe rüzgâr türbini daha fazla elektrik gücü bu kapasiteye geçmeyecektir.



Şekil 4.30. 25 MW'lık rüzgar türbini 4415 NACA profilin üzerindeki itme kuvveti

Şekil 4.30'de NACA 4415 profilde, türbinin hareket etmesi için çok fazla itme kuvvetine gerek yoktur. Türbin büyüklüğü için çok sorunsuz çalışır ve ortaya çıkan itme, rüzgâr hızı ile birlikte artmaktadır. 10 m/s rüzgâr hızında itme kuvveti 500 bin Newton'a kadar artmaktadır. Rüzgâr hızı 25 m/s ulaşana kadar kademeli olarak 26 milyon Newton'a kadar artmaktadır.



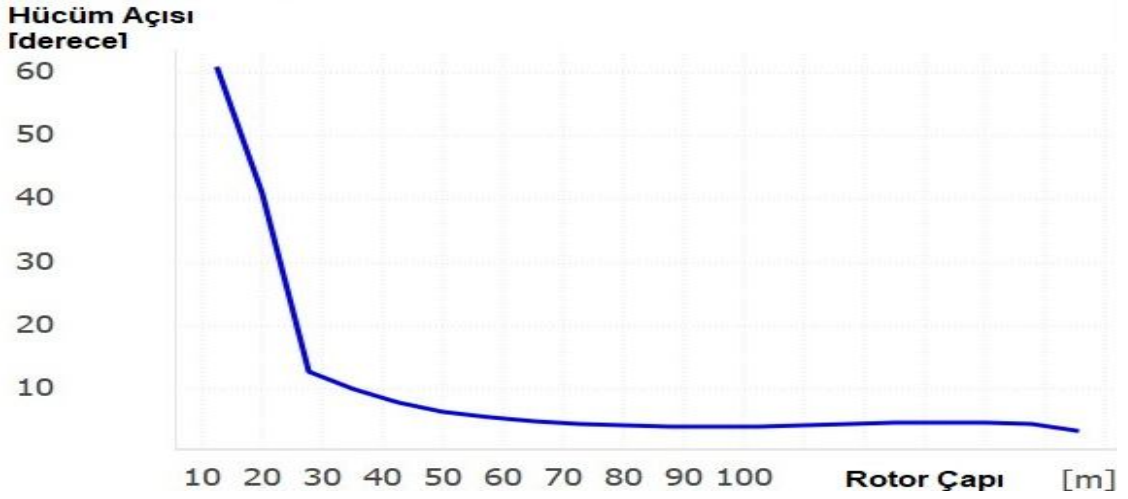
Şekil 4.31. NACA 4415 profili 25 MW'lık rüzgar türbini aerodinamik simülasyon analizi

Şekiller 4.31 ve 4.32'te türbinin aerodinamik simülasyonu ve güç katsayısı değişiklikleri görülmektedir. Hava yoğunluğunun  $1.225 \text{ kg/m}^3$  olduğu göz önüne alarak, bu simülasyonda, rüzgar hızı  $10 \text{ m/s}$  ve atmosferik basınç  $100 \text{ kPa}$  olarak alınmıştır. Atmosfer basıncı, deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı olarak bir yerden diğerine değişebilir. Ama sonuç olarak, açıklandığı gibi alınmıştır. Rüzgar türbinin kulesinin uzunluğu ve yüksekliği  $203.7 \text{ m}$  olarak tasarlanmaktadır. Yerçekimi ivmesi de saniyede  $9.81 \text{ m/s}^2$  alınmaktadır. Türbin ilk çalışmaya başlangıçta maksimum ulaşabilen güç katsayısı  $1.1$  olmaktadır. Türbinin stabilize etmek için çalışmaya başladıktan 30 saniye sonra stabilitesini görülmektedir. Stabilize ettikten sonra maksimum ulaşabilen güç katsayısı  $59\%$  olmaktadır



Şekil 4.32. 25 MW'lık rüzgar türbini NACA 4415 profili için güç katsayısı

Şekil 4.33'te hücum açısının son şeklini göstermektedir. Hücum açısı kanadın başında  $0$  (m) ve  $56$  derece aralarında mümkün olduğunca büyüktür, ve kanadın uzunluğundaki artışla birlikte hücum açısı değişmektedir, Kanadın  $30$  (m) uzunluğunda oldukça hücum derecesi en düşük değere  $4$  olarak ulaşmaktadır.



Şekil 4.33. 25 MW'lık rüzgar türbini NACA 4415 profilin hücum açısı

#### 4.3.1.1. NACA 4415 25 MW'lık rüzgar türbinin yıllık enerji üretimi

Türbinin yıllık çalışma saatlerinin 8760 saat olduğu ve minimum rüzgar hızı 7.5 m/s ve maksimum 14 m/s olduğu alınmaktadır. Bu şekilde Yıllık ortalama rüzgar hızı 11 m/s olmaktadır. Türbinin toplam verimliliğinin (güç katsayısı) % 48 olduğu göz önüne alındığında ayrıca, dahili mekanik kayıpları ve elektrik jeneratöründeki kayıplara ek olarak ısı ve basınçtan kaynaklanan toplam kayıpları 95% hesaba katarak, simülasyon sistemine göre türbin tarafından 11 m/s ortalama rüzgar hızında elde edilen enerji çıkış gücü 21.5 MW'tır. Yıllık enerji miktarı da bir yılın toplam saat olarak süresi 8760 saat için aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$YEÜ = 21.5 \text{ MW} \times 8760 = 188,340,000 \text{ kWh}$$

#### 4.3.2 NACA 2215 profili ile 25 MW'lık Rüzgar Türbinin Analizi

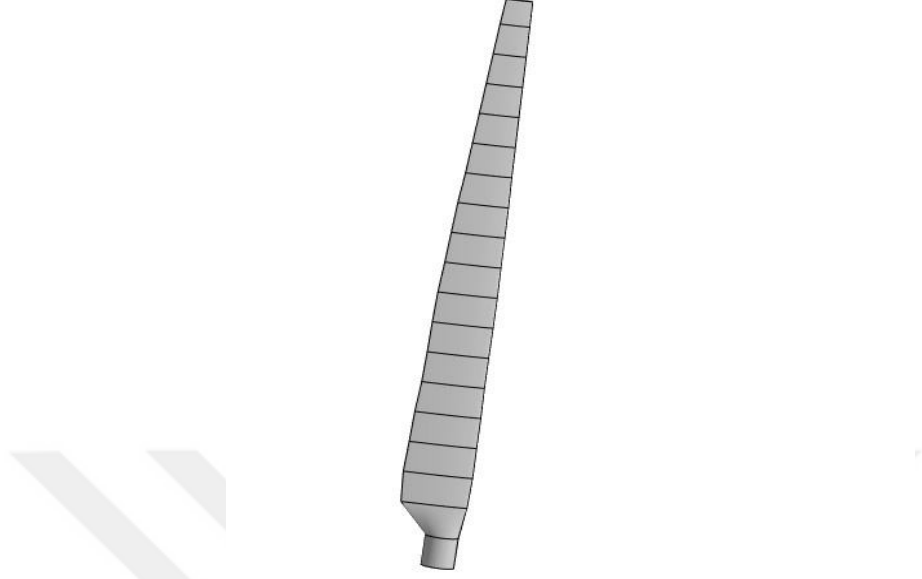
25 MW'lık bir rüzgar türbin kulesinin uzunluğu 207.3 m referans olarak alınmıştır. Kanadın çapı uzunluğu 120-140 (m) ve göbeğin çapı 5 (m) olarak tasarlanmaktadır. Buna karşılık, Kanadın tasarım ederken sırada 20 birime bölünmektedir, her biri yaklaşık 5 (m) uzunluğunda parçalanmaktadır. Betz yasasını kullanarak, türbin kanatlarının boyutları aşağıdaki Çizelge 4.8'de bulunmaktadır.

**Çizelge 4.8.** NACA 2215 kanat profilin 25 MW'lık rüzgar türbinin değerleri

<b>Konum uzunluğu (m)</b>	<b>Kiriş uzunluğu (m)</b>	<b>Kabuk kalınlığı [mm]</b>	<b>Eğim derecesi (derece)</b>
0	10	200	30
5	10	236	30
7	13	207	39.17
15	11.207	191	39.17
20	10.158	187	39.17
25	10.925	173	38.89
30	9.836	147	37.66
35	8.212	137	36.93
40	7.482	128	36.20
45	7.676	119	35.47
50	6.981	109	34.74
55	5.155	101	34.01
65	5.072	93.3	33.28
70	4.642	91.22	32.55
75	4.559	90.653	31.82
80	4.385	88.123	31.22
85	4.069	87.633	30.73
90	3.98	86.156	30.11
93	3.788	85.125	30.911

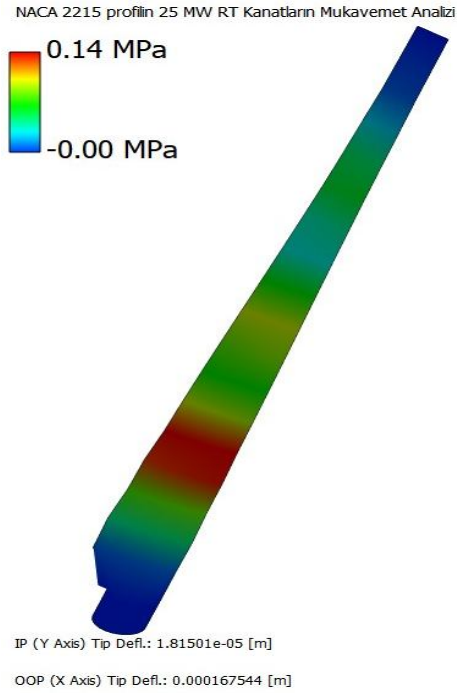
Şekil 4.34'de 25 MW'lık rüzgâr türbininin NACA 2215 profilli kanadı görülmektedir. Toplam süpürülen alanı 33204.25 m<sup>2</sup> hesaplanmaktadır.

NACA 2215 profilin 25 MW RT FINAL  
Swept Area: 33204.25 [m<sup>2</sup>]



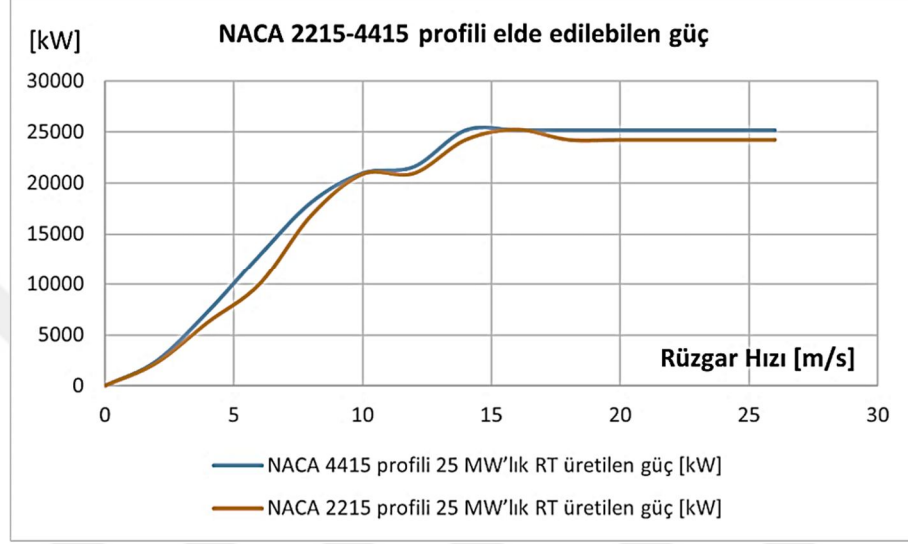
Şekil 4.34. 25 MW'lık rüzgar türbinin NACA 2215 profilin kanatları

Şekil 4.35'de Kanadın kenarının başlangıcı en düşük basınca sahiptir, çünkü bu kısımda desteklenecek malzeme çoktur, ayrıca profil segmenti henüz başlamamıştır. Yavaş yavaş, kanadın profili ölçeklenmeye başlar ve bu bölgeden başlayarak kanadın parçaları üzerindeki baskı artmaktadır.



Şekil 4.35. 25 MW'lık rüzgar türbinini 2215 NACA profilin kanatların mukavemet analizi

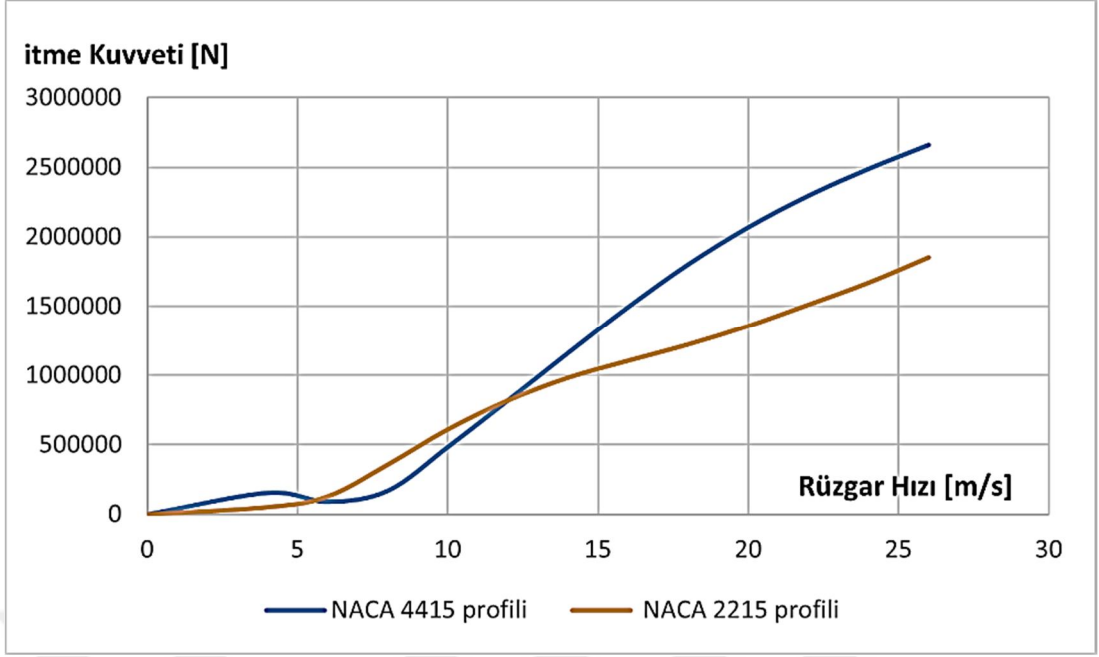
Kanadın farklı kısımlarına etki eden kuvvetlerin analizi sırasında, en şiddetli etkinin 20-25 (m) arasındaki kısımda olduğunu analiz edilmektedir. Bu parçalar çatlakları ve çökmeleri önlemek için gerekli malzemelerle güçlendirilmelidir. Kanadın en az etkili kısımları taraflarındadır ve en yüksek kuvvet etkisinden etkilendiği 20-25 (m) kısımdan uzaklaştıkça etki giderek artmaktadır.



Şekil 4.36 25 MW'lık rüzgar türbinin NACA 2215-4415 profili elde edilebilen güç [kW]

Şekil 4.36'da. Rotor dönme hızı 1 d/d'da tespit ederek rüzgâr türbininin davranışı farklı rüzgâr hızlarında analiz edilmektedir. 3 m/s rüzgâr hızında türbinin en düşük elde edilebilecek güç miktarı (1000 kW) olarak gösterilmektedir. Rüzgâr hızı arttıkça elde edilebilecek güç miktarı artar. Bu rüzgâr türbinin maksimum elde edilebilecek güç miktarı 25 MW'lık olarak 14.5 m/s rüzgar hızında görülmektedir. Rüzgâr hızı arttıkça elde edilebilen güç artmaktadır, ancak, jeneratörün maksimum kapasitesi 25 MW'lığa ulaşıldıkça rüzgâr türbini daha fazla elektrik gücü bu kapasiteye geçmeyecektir.





Şekil 4.37. 25 MW'lık rüzgâr türbininin 2215-4415 NACA profili üzerindeki itme kuvveti

Şekil 4.37'te NACA 2215 profilde, türbinin hareket etmesi için çok fazla itme kuvvetine gerek yoktur. Türbin büyüklüğü için çok sorunsuz çalışır ve ortaya çıkan itme, rüzgâr hızı birlikte artmaktadır. 8 m/s rüzgâr hızında itme kuvveti 850 Kilo Newton'a kadar artmaktadır. Sırada, rüzgâr hızı 14 m/s ulaşana kadar kademeli olarak 2 milyon Newton'a kadar artmaktadır. Analizden, çok büyük bir itme kuvveti bulunmaktadır. NACA 4415 kanadın profilin itme kuvveti daha fazla olduğunu göstermektedir. 14 m/s rüzgâr hızından sonra iki profilindeki arasındaki fark artmaktadır.

## NACA 2215 profilin 25 MW RT Düzenli

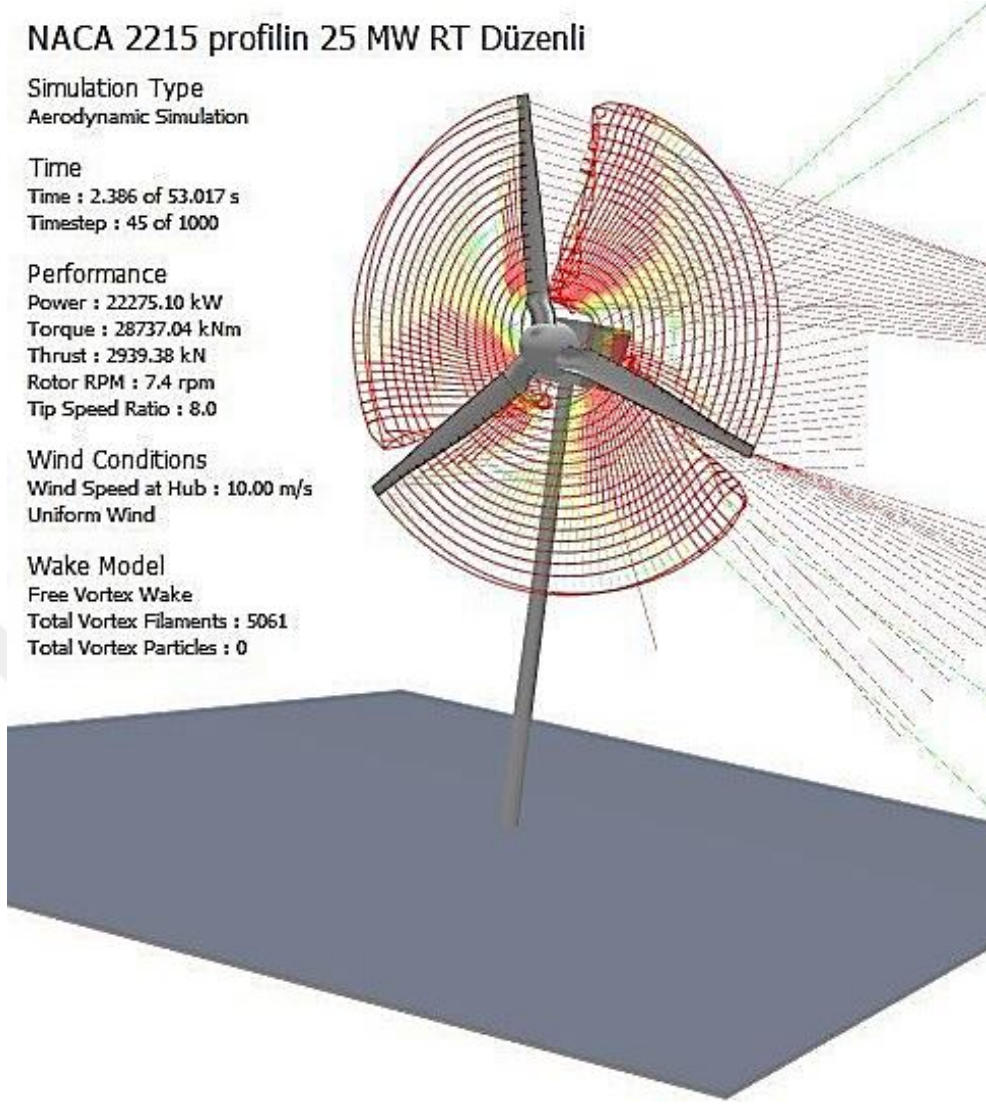
Simulation Type  
Aerodynamic Simulation

Time  
Time : 2.386 of 53.017 s  
Timestep : 45 of 1000

Performance  
Power : 22275.10 kW  
Torque : 28737.04 kNm  
Thrust : 2939.38 kN  
Rotor RPM : 7.4 rpm  
Tip Speed Ratio : 8.0

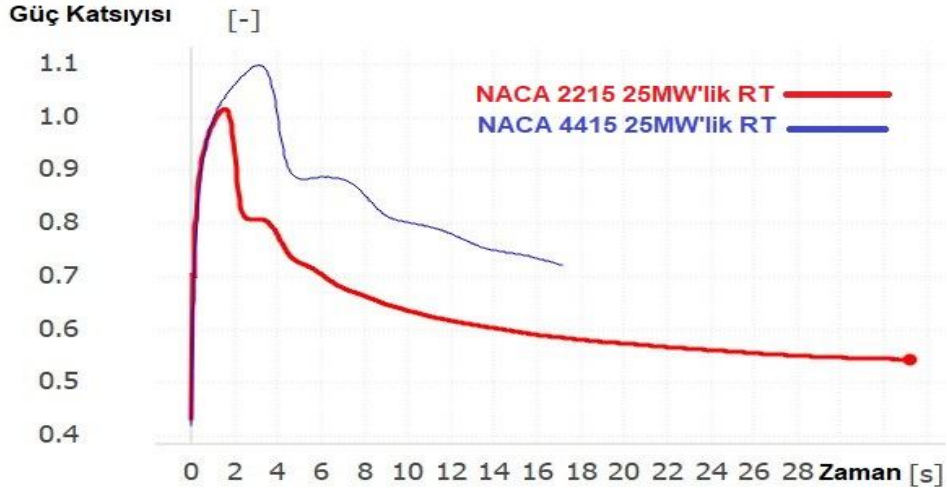
Wind Conditions  
Wind Speed at Hub : 10.00 m/s  
Uniform Wind

Wake Model  
Free Vortex Wake  
Total Vortex Filaments : 5061  
Total Vortex Particles : 0



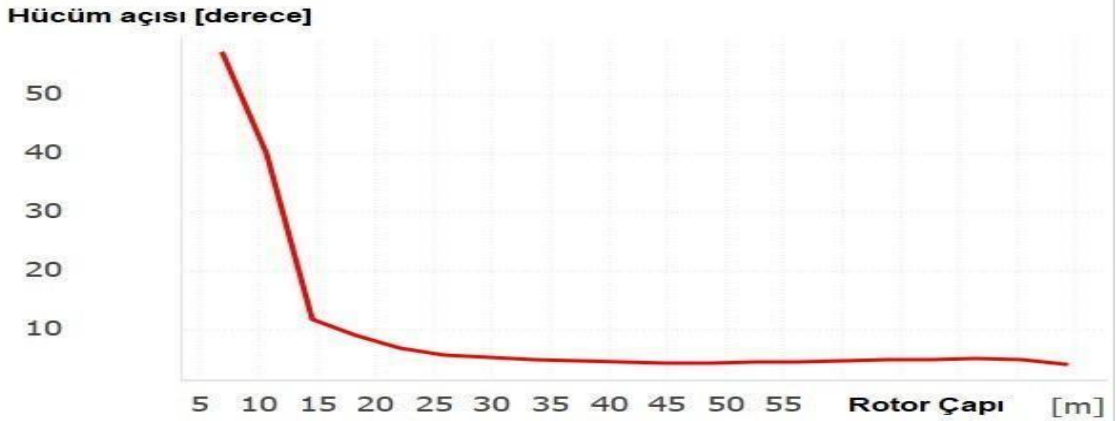
Şekil 4.38. NACA 2215 profili 25 MW'lık rüzgar türbininin analizi

Şekil 4.38'de. Türbin simülasyonu gösterilmektedir, hava yoğunluğu  $1.225 \text{ kg/m}^3$  olduğu göz önüne alarak. Bu simülasyonda, rüzgâr hızı  $10 \text{ m/s}$  olarak alındı. Dikkate alınarak, atmosferik basınç  $100 \text{ kPa}$ 'dır. Atmosfer basıncı, deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı olarak bir yerden diğerine değişebilir. Ama sonuç olarak, açıklandığı gibi alınmıştır Rüzgar türbinin kulesinin uzunluğu  $203.7 \text{ (m)}$  olarak tasarlanmaktadır. Yerçekimi ivmesi de saniyede  $9.81 \text{ m/s}^2$  alınmaktadır. Türbin ilk çalışmaya başlangıçta maksimum ulaşabilen güç katsayısı  $1.1$  olmaktadır. Türbinin stabilize etmek için çalışmaya başladıktan  $30$  saniye sonra stabilitesi görülmektedir. Stabilize ettikten sonra maksimum ulaşabilen güç katsayısının  $59\%$  olması Şekil 4.42'de gösterilmektedir.



Şekil 4.39. 25 MW'lık rüzgar türbini NACA 2215 profilin güç katsayısı.

Şekil 4.39'de, her iki profilin mukavemet katsayısının karşılaştırmasını göstermektedir. NACA 2215 profilinin güç katsayısının NACA 4415 profilin karşılığına % 15 daha düşük olduğunu bulunmaktadır. 25 MW'lık Rüzgâr türbininde NACA 2215 profili ulaştığı maksimum güç katsayısı 1 olduğunda, NACA 4415 profilinin ulaştığı maksimum güç katsayısı 1.15 bulunmaktadır.



Şekil 4.40. 25 MW'lık rüzgar türbini NACA 2215 profilin hücum açısı.

Şekil 4.40'te NACA 2215 profili hücum açısının son şeklini göstermektedir. Hücum açısı kanadın başında 0 m ve 56 derece aralarında mümkün olduğunca büyüktür ve kanadın uzunluğundaki artışla birlikte hücum açısı değişmektedir, Kanadın 15 m'lik uzunluğunda oldukça hücum derecesi en düşük değere 4 olarak seçilmektedir.

#### 4.3.2.1. NACA 2215 25 MW'lık rüzgar türbininin yıllık enerji üretimi

Türbinin yıllık çalışma saatlerinin 8760 saat olduğu ve minimum rüzgâr hızı 4 m/s ve maksimum 14 m/s olduğu alınmaktadır. Bu şekilde yıllık ortalama rüzgâr hızı saniyede 11 olmaktadır. Türbinin güç katsayısı % 48 olduğu göz önüne alındığında, dahili mekanik kayıpları ve elektrik jeneratöründeki kayıplara ek olarak ısı ve basınçtan kaynaklanan toplam kayıpları %95 hesaba katarak. Toplam enerji çıkışı simülasyon sistemine 11 m/s ortalama rüzgar hızında göre türbinden elde edilen güç 20.85 MW'tır.

Yıllık enerji miktarı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$YEÜ = 20.85 \text{ MW} \times 8760 = 182,681,083 \text{ kWh}$$

#### 4.3.3. 25 MW'lık rüzgar türbini ile farklı rüzgar hızlarında elde edilen güçler

Çizelge 4.9'da, NACA 4415 profilin, 8 m/s rüzgâr hızında NACA 2215 profile göre yaklaşık %18 oranında rüzgârdan daha fazla enerji üretme ve absorbe etme kabiliyetine sahip olduğu gösterilmiştir. Ve rüzgâr hızı arttıkça kanatlar arasındaki bu yüzde farkı azalmaktadır. Rüzgâr hızı 14 m/s iken bu fark yüzdesi %1'e düşmektedir.

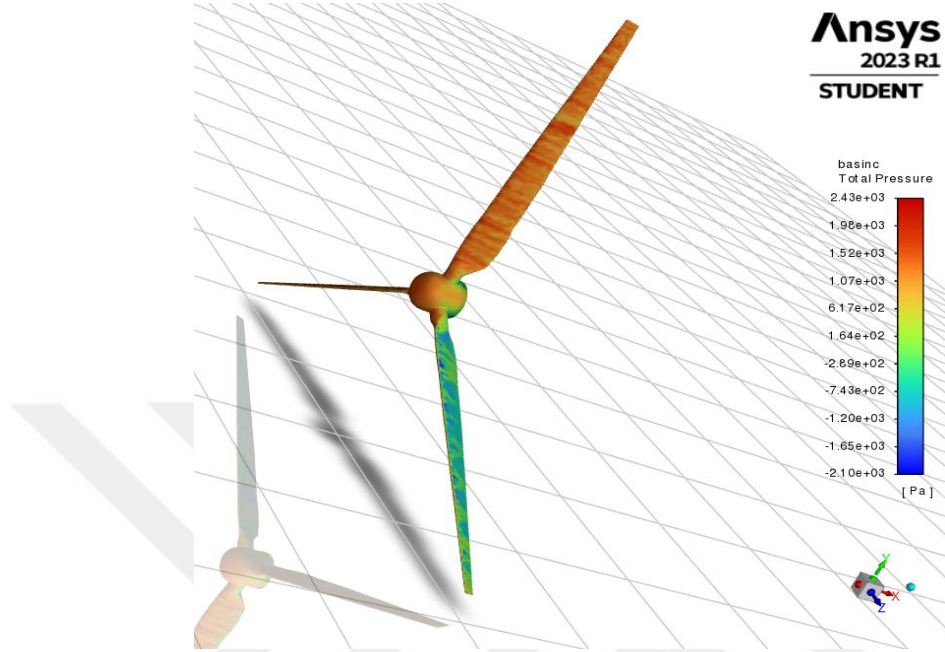
Çizelge 4.9. 25 MW'lık rüzgar türbini ile 4-14 m/s farklı rüzgar hızlarında elde edilen güçler

Rüzgar Hızı [m/s]	NACA 4415 profili 25 MW'lık RT üretilen güç [kW]	NACA 2215 profili 25 MW'lık RT üretilen güç [kW]
4	7378.79	6122.45
6	12881.73	11929.7
8	18095.64	17097.51
10	20966.97	20872.78
12	21605.72	20957.568
14	25194.42	24239.7

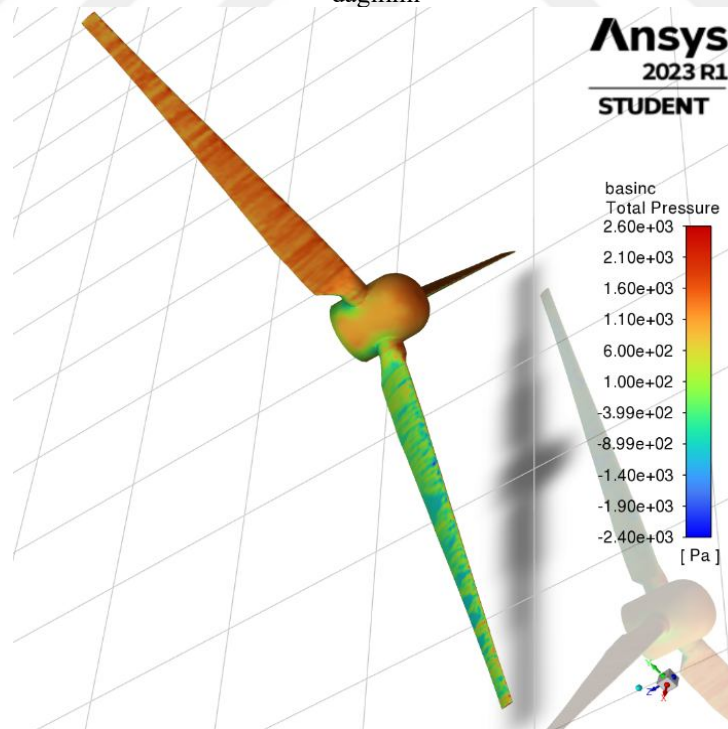
#### 4.3.4. 25 MW'lık rüzgar türbininin mukavemet analizi

Türbinin kütlesi tüm ağırlıkları tutabilmek için hem de ekonomik olabilmek için onun kalınlığı 12 mm'lik çelikten tasarlanmaktadır. Sınır şartları kullanılırken 50 m/s rüzgar hızı kullanılmıştır. Reynold katsayısı ortalama 2400, hava yoğunluğu ise 1.225 kg/m<sup>3</sup> olarak kullanılmıştır. Simülasyonun maksimum doğruluğunu elde etmek için meshing boyutu 0.05 olarak ayarlanmıştır.

Şekil 4.41. ve 4.42.'de, tüm rüzgâr türbinin gövdesini etkileyen çeşitli kuvvetler analiz edilmektedir. Etki eden kuvvetler analiz edildiğinde, basınca en çok maruz kalan kısımların özellikle kanatlar olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.41 ANSYS Fluent programıyla NACA 2215 profili 25 MW'lık rüzgâr türbini kanatlarında basınç dağılımı



Şekil 4.42 ANSYS Fluent programıyla NACA 4415 profili 25 MW'lık rüzgâr türbini kanatlarında basınç dağılımı

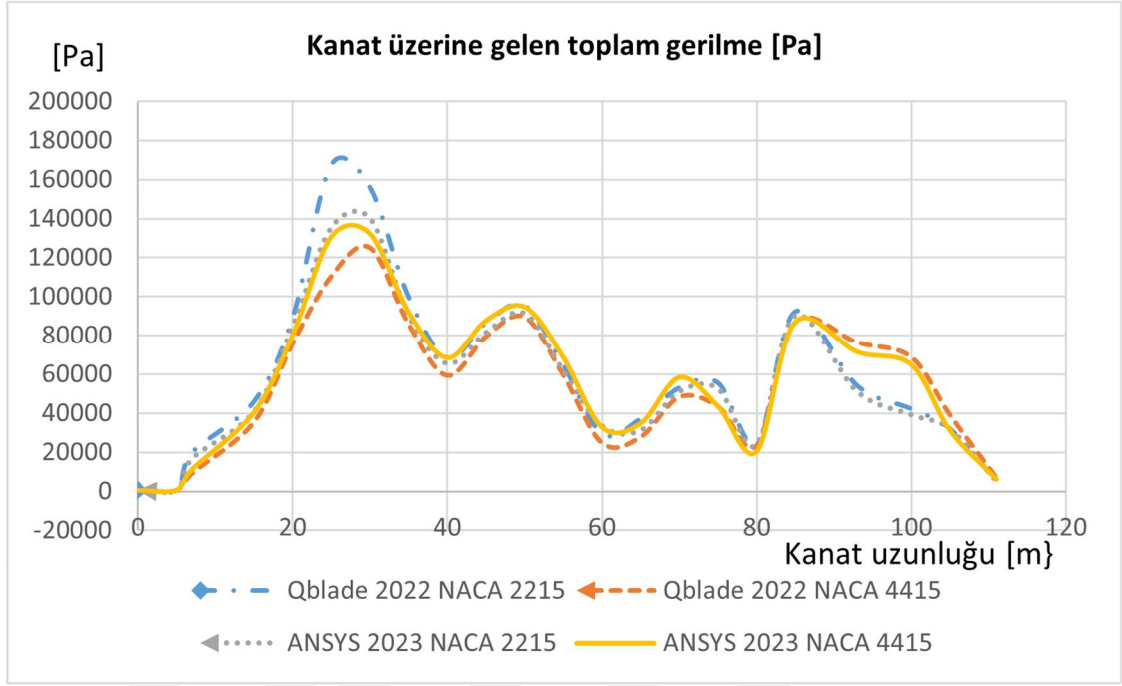
Profilin kendisi üzerindeki en etkili basınç ise profilin uçlarındadır. Bu nedenle, profilin gövdesi boyunca kuvvetlerde çok az fark vardır. Böylece kanat profil gövdesi boyunca

Basınç rengi hemen hemen aynıdır. 25 MW'lık her iki kanat profillerinde de basınç değişimleri olmaktadır. Çizelge 4.10'da, kanatlar üzerindeki basınç değerlerinin iki farklı profil için konuma göre değişimleri verilmiştir.

**Çizelge 4.10.** 25 MW'lık rüzgar türbini farklı NACA profillerin üzerindeki gerilme basıncı

Kanat (m)	Yarıçapı	NACA 2215 profili üzerindeki gerilme basıncı (Pa)	NACA 4415 profili üzerindeki gerilme basıncı (Pa)
0		655	672
5		722.24	705
7		16944.64	10323.3
15		42013.62	39486
20		82764.40	77782
25		127493.05	120430
30		136269.03	129254
35		94866.8	89937
40		65545.9	61451
45		86566.7	81503.2
50		95449.6	90592
55		64928.6	61786
60		29663	27923
65		37288	34920
70		53210	50444
75		45676	43577
80		246789	23629.3
85		92344.9	86895.3
93		54222.6	76511

Çizelge 4.10'de, NACA 2215-4415 kanatlarının her biri arasındaki basınç farkını göstermektedir. NACA 4415'in profilindeki basıncın etkisinin NACA 2215 profilininkinden daha büyük olduğu görülmektedir. 16. m uzunluğundan başlayarak kanatlara olan basınç kademeli olarak artar ve bu durum kanadın profilli kısmının başlamasının bir sonucudur ve profil bu uzunluktan itibaren değişime uğrar. Bu nedenle donatı o noktadan itibaren takviye artırılarak yapılmalıdır.



Şekil 4.43 25 MW'lık rüzgar türbinin farklı kanat profillerinin basınç analizi

Şekil 4.43'de, NACA 2215-4415 profilli kanatların her biri arasındaki basınç farkını göstermektedir. NACA 4415'in profilindeki basıncın etkisinin kanadın büyük kısmında 2215 profilinden daha büyük olduğu görülmektedir. Çizelge 6.4'te, NACA 4415 kanat profili üzerindeki basıncın NACA 2215'ten daha az olduğu gösterilmiştir. Kanat cismin üzerindeki maksimum basınç ise her iki profilde de 25 m ile 35 m arasında bulunmaktadır. Ayrıca, Q-Blade ve Ansys programları analiz edildiğinde arasındaki fark yaklaşık olarak 2% bulunmuştur. Bu fark hata doğrulamasından veya meshing boyutlanmasından olabilmektedir.

#### 4.3.5. 25 MW'lık rüzgar türbininin mil tasarımı ve mukavemet analizi

Rotor her zaman güçlü çelikten yapılmıştır. 25 MW'lık türbinin göbek çapı ise 3.201 metre olarak hesaplandı. Kanatların dönüş hızlarına göre eğimdeki farklı dirençlerin analizi yapılmıştır.

**Çizelge 4.11** 25 MW'lık rüzgar türbininin rotor milin özellikleri

Rotor göbeğin kütlesi (3 kanatlı)	315.65 ton
Rotor göbeği atalet momenti	$8.74 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2$

**Çizelge 4.12** 25 MW'lık rüzgar türbini rotor milinin torku [kNm]

Milin dönme hızı d/d	Tork [kNm]
0.2	1,193,662.07
0.25	954,929.65
0.3	795,774.71
0.5	477,464.82
0.75	318,309.88
1	238,732.41
2	119,366.21

Çizelge 4.12'de görüldüğü gibi, dönme hızı 0.2 d/d'dan maksimum 2 d/d'ya çıkarıldığında, dönme momenti 1,193,662'den 119,366 kNm'ye azalmaktadır.

#### 4.4. 50 MW'lık Rüzgâr Türbininin Analizi

Bu çalışmadaki rüzgâr türbinleri nominal güç değerine göre tasarlanacaktır. Böylece mekanik ve elektriksel kayıpları ihmal edip ve Betz kanuna göre rüzgar enerjisinden mümkün olan en büyük güç katsayısı olarak 48% alınacaktır. Hava yoğunluğunun  $1.225 \text{ kg/m}^3$  olarak alınarak güç ifadesinden rüzgâr türbinin rotorun çapı 260 m bulunmaktadır. Daha önce de belirttiğimiz gibi kayıpların ihmal edilmesiyle, aslında kayıp oranının %35'e kadar çıktığını ve 50 MW'lık türbinin rotorunun toplam çapının 260 m ye ulaşabileceğini görülmektedir. Bu güç için de NACA 4415 ve 2215 kanat profilleri için kanatlar üzerindeki yükler hesaplanıp, mukavemet analizi ve her iki durumda da yıllık üretilebilecek enerji miktarının hesaplanması yapılacaktır. Bu durumda türbin mili dönme hızının büyük kanat ağırlıklarının oluşturacağı çok yüksek merkezkaç kuvvetler nedeniyle 0.2-0.8 d/d alınması gerekmektedir.

$$P_{RT} = 0,5 (\rho \times ART \times C_p \times V^3 \times \eta_d) \quad (4.4)$$

Bu nedenle, (4.4) denkleminde, toplam mekanik ve elektriki kayıplar ( $\eta_d$ ) %80 nominal güç rüzgar hızı 14 m/s ve güç katsayısı ( $C_p$ ) %45 olarak hesaplanmasıyla, süpürülen



toplam alan 70,000 m<sup>2</sup> hesaplanmıştır. 50 MW nominal güç için türbin kanadı uzunluğu (yaklaşık rotor yarıçapı) 157 m bulunmaktadır.

#### 4.4.1. 4415 NACA profil ile 50 MW'lık rüzgar türbinin analizi

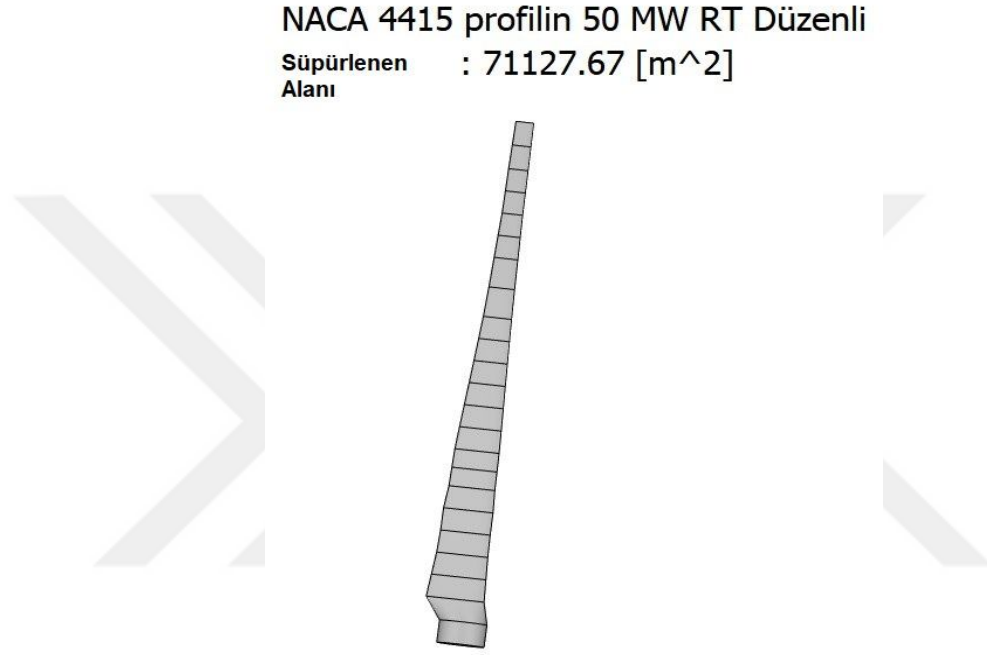
50 MW'lık bir rüzgar türbin kulesinin uzunluğu 301.4 m referans olarak alınmıştır. Kanadın yarıçapı 157 m ve göbeğin çapı 5 m olarak tasarlanmaktadır. Buna karşılık, Kanadın tasarım ederken sırada 24 birime bölünmektedir, her biri yaklaşık 7 m uzunluğunda parçalanmaktadır. Betz yasasını kullanarak, türbin kanatlarının boyutları aşağıdaki Çizelge 4.13 gibi olacaktır.

**Çizelge 4.13.** 50 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilli kanadı değerler çizelgesi

Konum uzunluğu [m]	Kabuk Kalınlığı [mm]	Kiriş uzunluğu [m]	Eğim derecesi [derece]
0	240	12	30
6	300	12	30
12	282	15	39.17
18	265	14.12	39.17
24	257	13.112	39.17
30	256	12.312	41.89
36	236	12.418	47.66
42	232	11.377	46.93
47	228	10.684	46.20
52	214	9.236	45.47
58	199	9.679	44.74
64	184	8.095	44.01
70	170	7.525	33.28
76	156	7.043	32.55
82	143	7.643	31.82
88	130	6.517	31.22
96	120	5.6	30.73
104	112	5.601	30.11
110	103	5.317	30.05
116	101	5.984	30.04
122	98.1	5.754	30.0311
128	93.7	5.341	30.0211

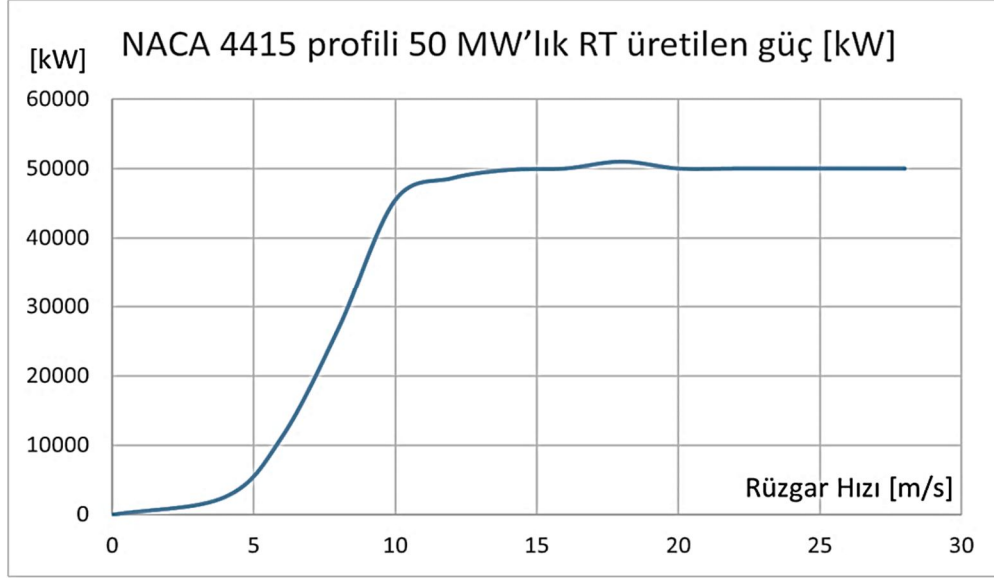
134	89.2	5.211	30.013
146	80.1	4.99	30
152	76.00	4.678	30
157	66.11	4.012	30

Şekil 4.44'de bir 50 MW'lık rüzgâr türbinin NACA 4415 profilli kanadı ve bölümleri görülmektedir. Toplam rotor süpürme alanı 71127.67 m<sup>2</sup> dir.



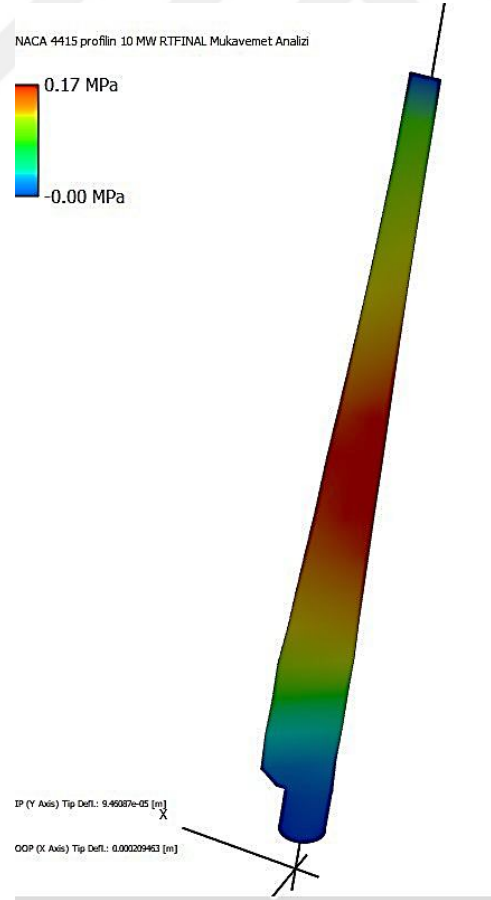
**Şekil 4.44.** 50 MW'lık rüzgar türbini NACA 4415 profilli kanadın bölümleri

50 MW türbin gücü için rotor dönme hızı 0.2 d/d alınarak rüzgar türbininin davranışı farklı rüzgar hızlarında analiz edilecek olup, Şekil 4.45'de türbinin farklı rüzgar hızları için çalışma aralığı güç grafiği verilmiştir.



Şekil 4.45. 50 MW'lık rüzgar türbininin NACA 4415 profil kanadı ile çalışma aralığı güçleri [kW]

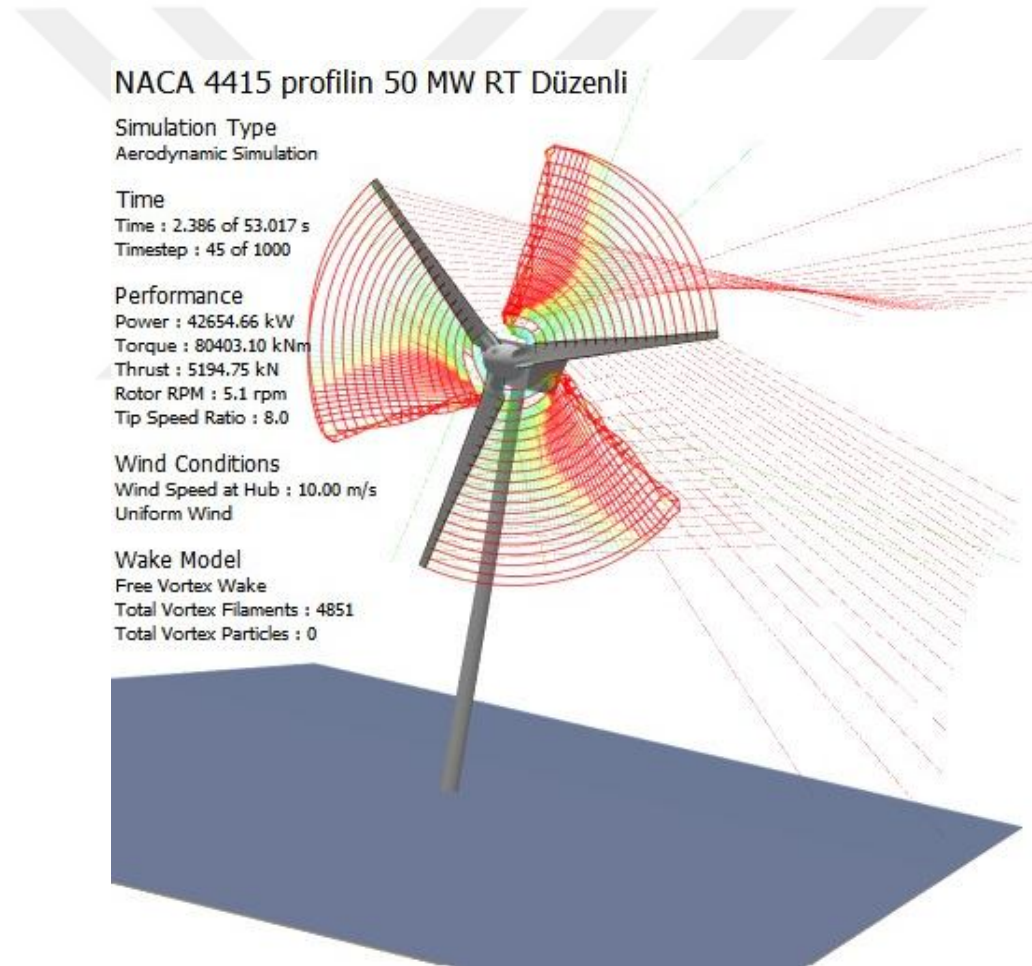
Şekil 4.45'de, 4 m/s rüzgar hızında türbinin en düşük elde edilebilecek güç miktarı 180 kW olarak gösterilmektedir. Rüzgar hızı artıka elde edilebilecek güç miktarı artar.



Şekil 4.46. 50 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profil mukavemet analizi

Şekil 4.46’de kanadın farklı kısımlarına etki eden kuvvetlerin analizi sırasında, en şiddetli etkinin 30-37 m arasındaki kısımda olduğunu analiz edilmektedir. Bu parçalar çatlakları ve çökmeleri önlemek için gerekli malzemelerle güçlendirilmelidir. Kanadın en az etkili kısımları taraflarındadır ve en yüksek kuvvet etkisinden etkilendiği 33-37 m kısımdan uzaklaştıkça etki giderek artar.

Rüzgar türbinin kulesinin yüksekliği 301.3 m olarak tasarlanmakta, rotorun dönme hızı 0.2-0.8 d/d olarak ve yerçekimi ivmesi de saniyede 9.81 m/s<sup>2</sup> alınmaktadır. Türbin ilk çalışmaya başlangıçta maksimum ulaşabilen güç katsayısı 1.1 olmaktadır. Türbinin stabilize etmek için çalışmaya başladıktan 30 saniye sonra stabilitesini görülmektedir. Stabilize ettikten sonra maksimum ulaşabilen güç katsayısı %59 olmaktadır



Şekil 4.47. NACA 4415 profili 50 MW’lık rüzgar türbininin simülasyonun analizi

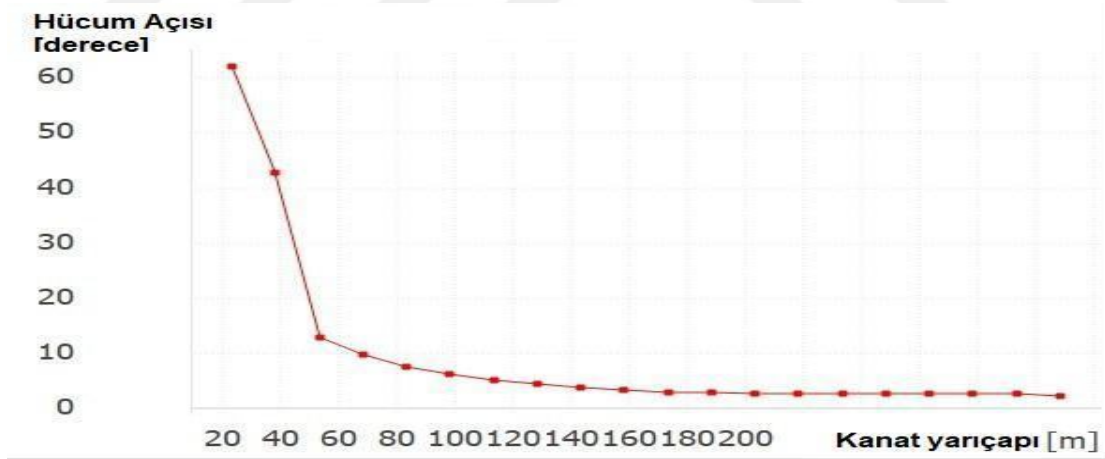
Şekiller 4.47 ve 4.48’de hava yoğunluğu 1.225 kg/m<sup>3</sup> için türbin simülasyonu gösterilmektedir. Bu simülasyonda rüzgar hızı 10 m/s olarak alındı. Atmosferik basınç

100 kPa alınmıştır. Atmosfer basıncı, deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı olarak bir yerden diğerine değişebilir.



Şekil 4.48. 50 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilin güç katsayısı

Şekil 4.49'te, hücum açısının son şeklini göstermektedir. Hücum açısı kanadın başında 0 (m) ve 56 derece aralarında mümkün olduğunca büyüktür ve kanadın uzunluğundaki artışla birlikte hücum açısı değişmektedir, kanadın ilk 20. m uzunluğunda oldukça büyük olan hücum açısı yaklaşık 50. m'ye kadar hızla düşerek 160. m'den sonra en düşük değer olan 4 dereceye ulaşmaktadır.



Şekil 4.49. 50 MW'lık rüzgar türbinin NACA 4415 profilin hücum açısı.

#### 4.4.1.1. NACA 4415 50 MW'lık rüzgâr türbinin yıllık enerji üretimi

Türbinin yıllık çalışma saatlerinin 8760 saat olduğu ve minimum rüzgâr hızı minimum 7.5 m/s ve maksimum 14 m/s olduğu alınmaktadır. Bu şekilde yıllık ortalama rüzgâr hızı 11 m/s olmaktadır. Türbinin toplam verimliliğinin % 48 olduğu göz önüne alındığında, dahili mekanik kayıpları ve elektrik jeneratöründeki kayıplara ek olarak ısı

ve basınçtan kaynaklanan toplam kayıpları 95% hesaba katarak. Toplam enerji çıkışı simülasyon sistemine göre ortalama rüzgar hızı 11 m/s için elektrik çıkış gücü ortalama 46.5 MW'tır. Yıllık üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı da aşağıdaki gibi yaklaşık hesaplanmaktadır.

$$YEÜ = 46.5 \text{ MW} \times 8760 = 407,340,000 \text{ kWh}$$

#### 4.4.2. NACA 2215 profil kanatlı 50 MW'lık rüzgâr türbininin analizi

50 MW'lık bir rüzgâr türbin kulesinin yüksekliği 301.3 m referans olarak alınmıştır. Kanadın uzunluğu 157 m ve göbeğin çapı 9 m olarak tasarlanmaktadır. Kanadın tasarımı yapılırken 24 birime (parça) bölünmekte olup, her biri parça yaklaşık 6 m uzunluğundadır. Betz yasasını ve kanat elemanı momentum metodu kullanılarak türbin kanatlarının boyutları aşağıdaki Çizelge 4.14 gibi bulunmuştur.

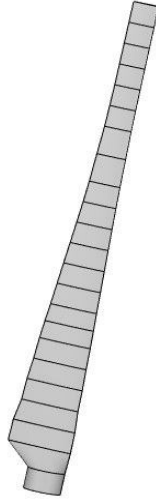
**Çizelge 4.14.** NACA 2215 kanat profilin 50 MW'lık rüzgar türbinin değerler çizelgesi

Konum uzunluğu [m]	Kabuk Kalanlığı [mm]	Kiriş uzunluğu [m]	Eğim derecesi [derece]
0	240	12	20
6	300	12	20
12	282	15	29.17
18	265	14.12	29.17
24	257	13.112	29.17
30	256	12.312	38.89
36	236	12.418	37.66
42	232	11.377	36.93
47	228	10.684	36.20
52	214	9.236	45.47
58	199	9.679	44.74
64	184	8.095	44.01
70	170	7.525	43.28
76	156	7.043	42.55
82	143	7.643	31.82

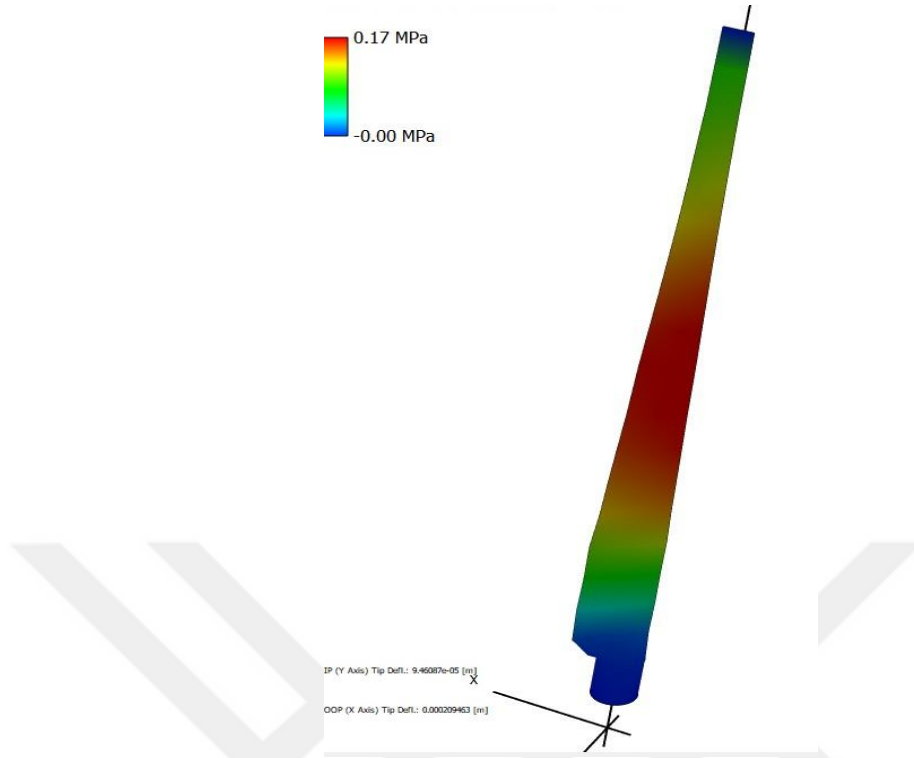
88	130	6.517	31.22
96	120	5.6	30.73
104	112	5.601	30.11
110	103	5.317	30.05
116	101	5.984	30.04
122	98.1	5.754	30.031
128	93.7	5.341	30.021
134	89.2	5.211	30.013
146	80.1	4.99	30
152	76.00	4.678	30
157	66.11	4.012	30

Şekil 4.50'de 50 MW'lık rüzgâr türbinin NACA 2215 profilli kanadı görülmektedir. Toplam rotor süpürme alanı 69492.03 m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

**NACA 2215 profilin 50 MW RT**  
**Süpürülen Alanı : 69492.03 [m<sup>2</sup>]**



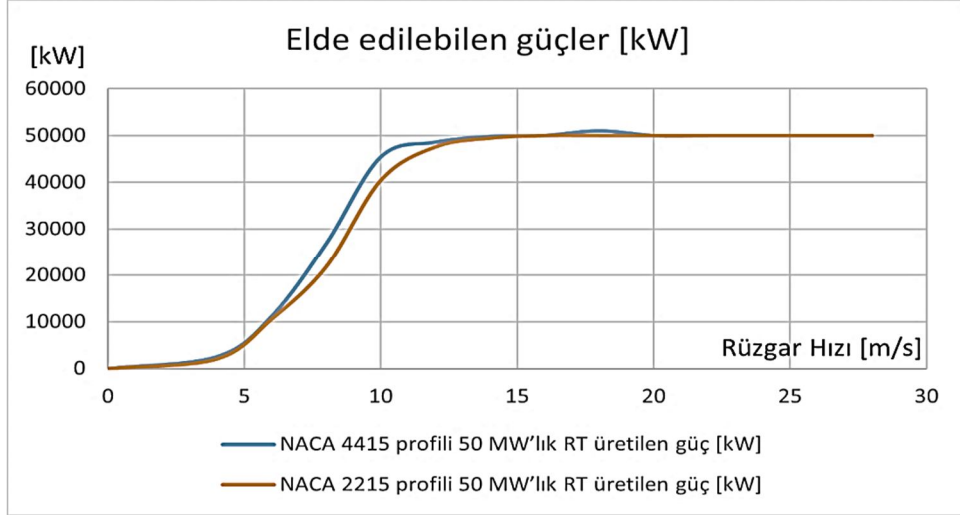
Şekil 4.50. 50 MW'lık rüzgâr türbinin NACA 2215 profilin kanatları



Şekil 4.51. 50 MW'lık rüzgâr türbinin 2215 NACA profilli kanadın mukavemet analizi

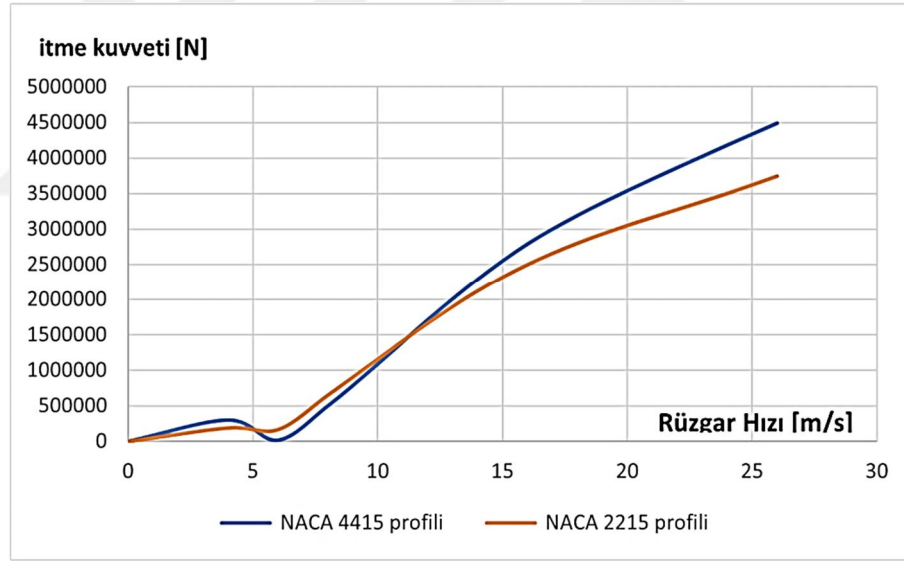
Şekil 4.51'de profilli kanat kenarının başlangıcı en düşük basınca sahiptir, çünkü bu kısımda destekleme malzemesi çoktur, ayrıca profil kesiti henüz başlamamıştır. Yavaş yavaş, kanadın profili ölçeklenmeye başlar ve bu bölgeden başlayarak kanadın parçaları üzerindeki basınç artmaktadır. Kanadın farklı kısımlarına etki eden kuvvetlerin analizi sırasında, en şiddetli etkinin 30-36 m arasındaki kısımda olduğunu analiz edilmektedir. Bu parçalar çatlakları ve çökmeleri önlemek için gerekli malzemelerle güçlendirilmelidir. Kanadın en az etkili kısımları alt taraflarındadır ve en yüksek kuvvet etkisinden etkilendiği 30-36 m kısımdan uzaklaştıkça etki giderek artmaktadır.





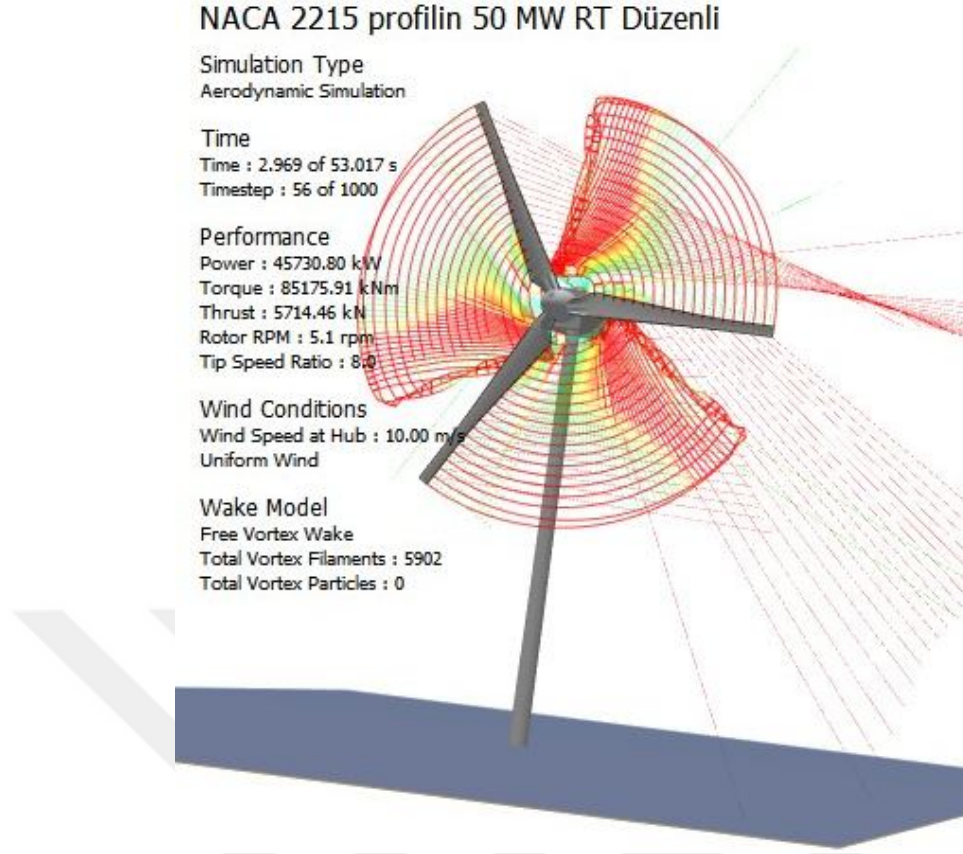
Şekil 4.52. 50 MW'lık rüzgâr türbininin NACA 2215 profili elde edilebilen güç [kW]

Şekil 4.52'da. Rotor dönme hızı 0.2 d/d olarak tespit edilerek rüzgâr türbininin davranışı farklı rüzgâr hızlarında analiz edilmiştir. Nominal türbin gücü olan 50 MW'a her iki profilli kanat için de yaklaşık 13 m/s rüzgâr hızında ulaşıldığı görülmektedir.



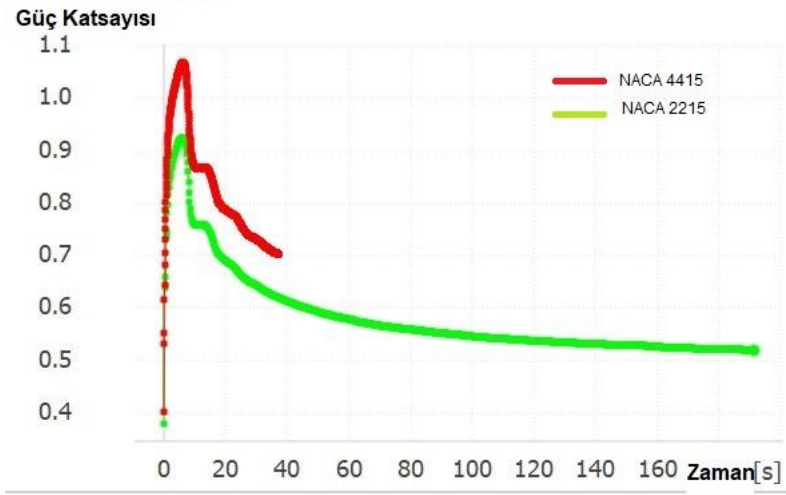
Şekil 4.53. 50 MW'lık rüzgâr türbinini 2215 NACA profilli kanadın itme kuvveti

Şekil 4.53'ta NACA 2215 profilinde NACA 4415 profiline göre türbinin hareket etmesi için çok fazla itme kuvvetine gerek olmadığı görülmektedir. İtme kuvveti yaklaşık 6 m/s rüzgâr hızından itibaren artmaya başlayarak, rüzgâr hızı ile birlikte artmaktadır. 12 m/s rüzgâr hızından sonra NACA 2215 profilli kanatta artış hızı azalarak 25 m/s hızda 2215 profili için 3.5 milyon Newton, 4415 profili için de 4.4 milyon Newton değerlerine ulaşmaktadır.



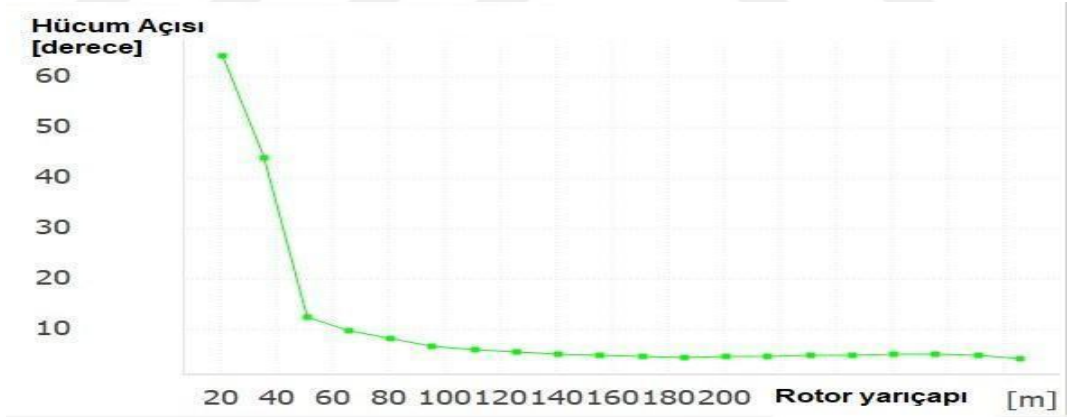
Şekil 4.54. NACA 2215 profili 50 MW'lık rüzgar türbini simülasyon analizi

Şekil 4.54'te 50 MW türbinin NACA 2215 profilli kanaları ile aerodinamik simülasyonu sonuç değerleri verilmektedir. Bu analizde hava yoğunluğu  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , rüzgâr hızı  $10 \text{ m/s}$  ve atmosferik basınç deniz kenarı değeri olan  $100 \text{ kPa}$  olarak alınmıştır. Rüzgâr türbinin kulesinin yüksekliği  $301.3 \text{ m}$  olarak tasarlanmıştır. Rotorun dönme hızı da  $0.2 \text{ d/d}$  ve yerçekimi ivmesi de saniyede  $9.81 \text{ m/s}^2$  olarak alınmıştır. Türbin ilk çalışmaya başladığında Şekil 4.55'de maksimum ulaşabilen güç katsayısı 4415 profili için  $1.1$  yaklaşmıştır. Türbini stabilize etmek için çalışmaya başladıktan  $90$  saniye sonra stabilitesi görülmektedir. Stabilize ettikten sonra maksimum ulaşabilen güç katsayısı  $\% 59$  civarında gerçekleşmektedir.



Şekil 4.55. 50 MW'lık rüzgâr türbinin NACA 2215 profilin güç katsayısı.

Şekil 4.55'de, her iki profilin mukavemet katsayısının karşılaştırmasını göstermektedir. NACA 2215 profilinin güç katsayısının NACA 4415 profilin karşılığına %15 daha düşük olduğunu bulunmaktadır. 50 MW'lık rüzgâr türbininde ilk çalışma başlangıcında NACA 2215 profili ulaştığı maksimum güç katsayısı 0.9 olduğunda, NACA 4415 profilinin ulaştığı maksimum güç katsayısı 1.1 bulunmaktadır.



Şekil 4.56. 50 MW'lık rüzgâr türbinin NACA 2215 profilin hücum açısı.

Şekil 4.56'de NACA 2215 hücum açısının son şeklini göstermektedir. Hücum açısı kanadın başında 0 m ve 56 derece aralarında mümkün olduğunca büyüktür ve kanadın uzunluğundaki artışla birlikte hücum açısı değişmektedir. Kanadın 60. m'den sonraki kısmında en düşük değer olan 4° civarında gerçekleşmektedir.

#### 4.4.2.1. NACA 2215 kanat profilli 50 MW rüzgar türbinin yıllık enerji üretimi

Türbinin yıllık çalışma saatlerinin 8760 saat olduğu ve minimum rüzgâr hızı minimum 7.5 m/s ve maksimum 14 m/s olduğu alınmaktadır. Bu şekilde yıllık ortalama rüzgâr hızı 11 m/s olmaktadır. Türbinin toplam güç katsayısının %48 olduğu göz önüne alındığında, simülasyon sistemine göre 11 m/s ortalama rüzgâr hızında türbin gücü 43.5 MW olup, yıllık üretilebilecek enerji miktarı ifade (4.4)'e göre aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$YEÜ = 43.5 \text{ MW} \times 8760 = 381,060,000 \text{ kWh}$$

#### 4.4.3. 50 MW'lık rüzgar türbininde farklı rüzgar hızlarında üretilen güç

Çizelge 4.15'te, NACA 4415 profilin, 8 m/s rüzgâr hızında NACA 2215 profile göre yaklaşık %18 oranında rüzgârdan daha fazla enerji üretme ve absorbe etme kabiliyetine sahip olduğu gösterilmiştir. Ve rüzgâr hızı arttıkça kanatlar arasındaki bu yüzde farkı azalmaktadır. Rüzgâr hızı 14 m/s iken bu fark yüzdesi %3'e ulaşmaktadır.

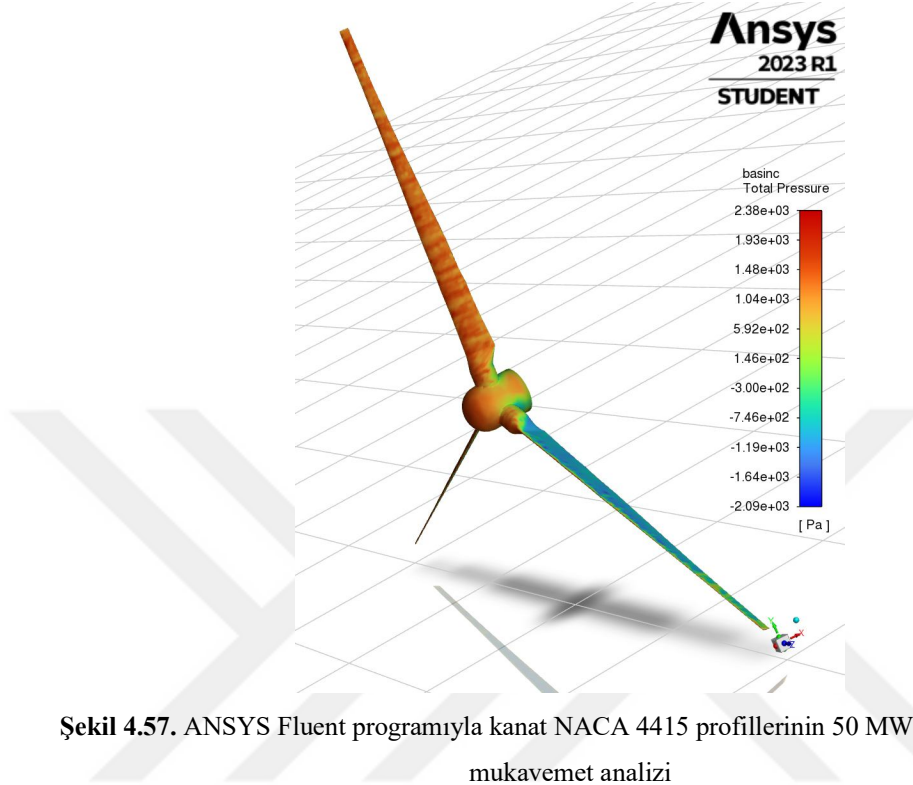
Çizelge 4.15. 50 MW'lık rüzgar türbininde farklı rüzgâr hızlarında elde edilen güçler

Rüzgâr Hızı [m/s]	NACA 4415 profili 50 MW'lık RT üretilen güç [kW]	NACA 2215 profili 50 MW'lık RT üretilen güç [kW]
4	2580.44	2112.69
6	11219.29	10637.1
8	26883.4	21856.6
10	45463.49	40445.7
12	48599.17	47569.71
14	49802.20	49451.6

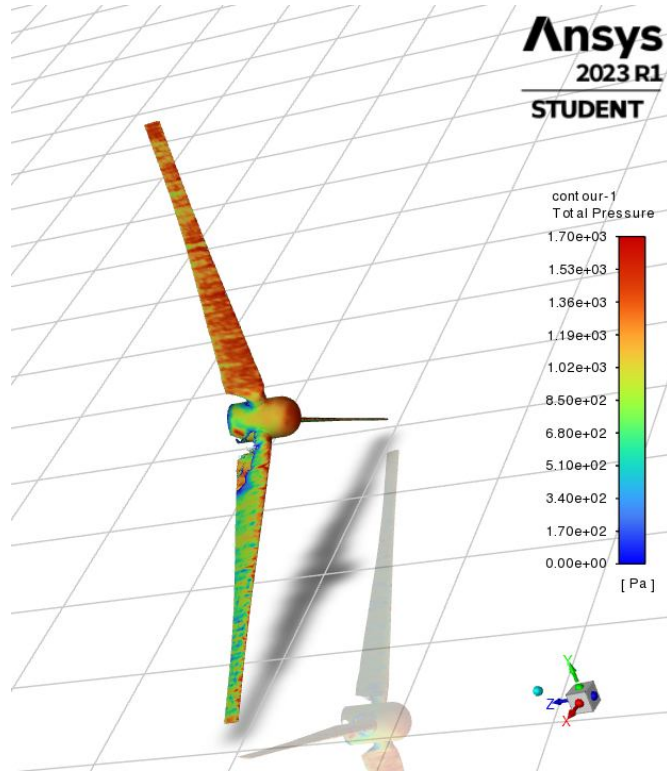
#### 4.4.3 50 MW'lık rüzgar türbininin mukavemet analizi

Ansys FLUENT programı kullanırken sınır koşulları çok önemli bir faktördür ve sınır maksimum hızı 50 m/s rüzgar hızı alınmıştır. Reynolds katsayısı ortalama 2400, hava yoğunluğu ise 1.225 kg/m<sup>3</sup> olarak kullanılmıştır. Simülasyonun maksimum doğruluğunu elde etmek için meshing boyutu 0.05 olarak ayarlanmıştır.

Şekillerde 4.57 ve 4.58’de Tüm türbinin gövdesini etkileyen toplam basınçlar analiz edilmektedir. Etki eden kuvvetler analiz edildiğinde, akışın basınca en çok maruz kalan kısımların özellikle kanatlarda olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.57. ANSYS Fluent programıyla kanat NACA 4415 profillerinin 50 MW rüzgâr türbinin mukavemet analizi



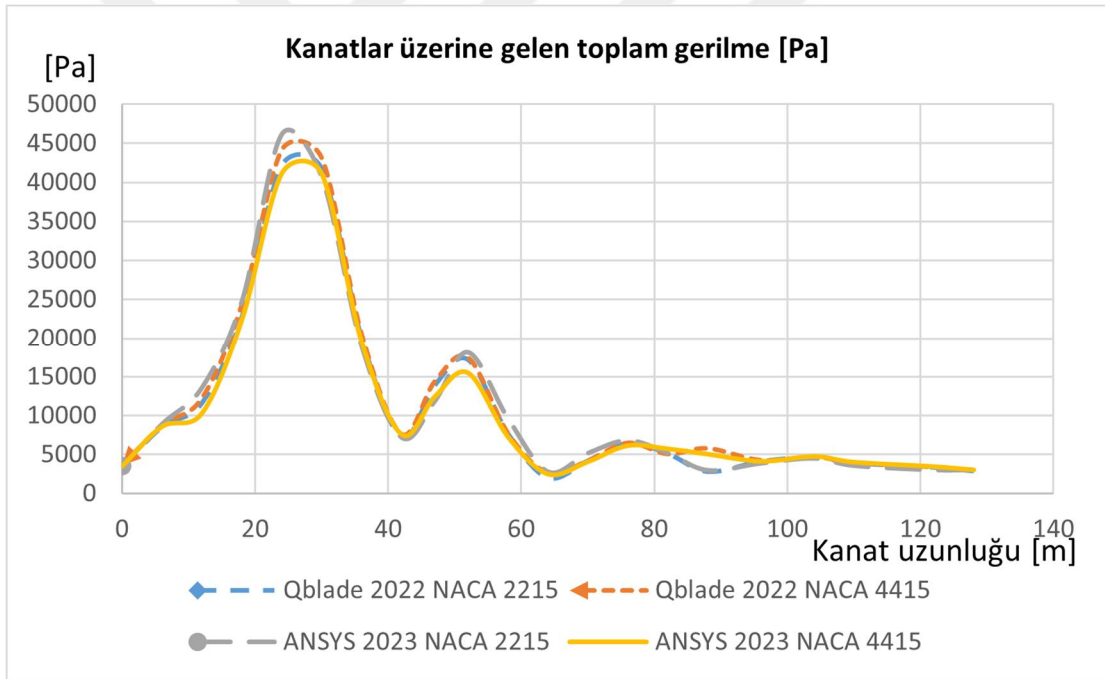
Şekil 4.58. ANSYS Fluent programıyla kanat NACA 2215 profillerinin 50 MW rüzgâr türbinin mukavemet analizi

Profilin kendisi üzerindeki en etkili baskı ise profilin uçlarındadır. Bu nedenle, profilin gövdesi boyunca kuvvetlerde çok az fark vardır. Böylece kanat profil gövdesi boyunca basınç rengi hemen hemen aynıdır. Ancak NACA 4415 profilli kanat için basınç skalası üst sınır değer daha yüksek görünmektedir. Çizelge 4.16’de, kanatlar üzerindeki basıncın kanat konuma göre değişimi verilmiştir.

**Çizelge 4.16.** 50 MW’lık rüzgar türbinin farklı NACA profillerinde üzerindeki gerilme basıncı değerleri

<b>Kanat (m)</b>	<b>Yarıçapı</b>	<b>NACA 2215 profili 50 MW’lık RT Dikey Basınç (Pa)</b>	<b>NACA 4415 profili 50 MW’lık RT Dikey Basınç (Pa)</b>
0		3654	3450
6		8775.1	8545
12		12279.1	11626
18		24418.05	22815
24		44171.7	42173
30		43103.04	41690
36		20504.9	19973
42		7647.09	7213
47		14421.6	13905
52		17465	17166
58		7732	7644
64		2648	2007
70		4240	4191
76		6513	6432
82		5094	5112
88		5819	2794
96		4294	4098
104		4721	4633
110		3985	3893
122		3411	3341
128		2987	2871
134		2610	2566
141		2412	2511
157		2100	2345

Çizelge 4.16’de, NACA 2215-4415 kanatlarının her biri arasındaki basınç farkını göstermektedir. NACA 4415’in profilindeki basıncın etkisinin 2215 profilinden daha büyük olduğu gösterilmiştir. 32 m uzunluğundan başlayarak kanatlara olan baskı kademeli olarak artar ve bu durum dönen kanat profilinin başlamasının bir sonucudur ve profil bu uzunluktan itibaren formasyona dahil olur. Bu nedenle donatı o noktadan itibaren takviye artırılarak yapılmalıdır. Basınç, kanat boyunun sonuna ulaşana kadar hemen hemen sabit kalmaktadır. Şekil 4.59’de, NACA 4415 kanat profili üzerindeki basıncın NACA 2215’ten daha az olduğu görülmektedir. Kanat cismin üzerindeki maksimum basınç ise her iki profilde 24 m ile 60 m arasında bulunmaktadır. Ayrıca, Q-Blade ve Ansys programları NACA profilleri analiz edildiğinde arasındaki fark yaklaşık olarak 1% bulunmuştur. Bu fark, hata doğrulamasından veya meshing boyutlandırılmasından kaynaklanabilmektedir.



Şekil 4.59. 50 MW’lık rüzgâr türbinin farklı kanat profillerin basınç analizi

#### 4.2.4. 50 MW’lık rüzgar türbininin ana mili tasarımı ve mukavemet analizi

Rotor her zaman yüksek yükleri taşıyan güçlü çelikten yapılmıştır. 50 MW’lık türbinin rotor (göbek) çapı ise 6.402 m olarak hesaplandı (Çizelge 4.17). Türbin milinin farklı

dönüş hızlarına göre elde edilen torkların ve farklı dirençlerin analizi yapılmıştır (Çizelge 4.18).

**Çizelge 4.17** 50 MW'lık rüzgar türbininin rotor milin özellikleri

Rotor göbeğin kütlesi	631.22 ton
Rotor göbeği atalet momenti	$17.48 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2$

**Çizelge 4.18** 50 MW'lık rüzgar türbininin rotor milin mukavemet analizi

Milin dönme hızı d/d	Tork [kNm]
0.2	2387324.15
0.25	1909859.35
0.3	1591549.43
0.5	954929.66
0.75	636619.77
1	477464.83
2	238732.41

Çizelge 4.18'da görüldüğü gibi, dönme hızı 0.2 d/d'den maksimum 2 d/d'ye çıkarıldığında, dönme momenti 2,387,324'ten 238,732 kNm'ye azalmaktadır.



## 5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 5.1. Sonuçlar

Son zamanlarda yenilenebilir enerji alanının önemi nedeniyle dikkatler büyük güçlü rüzgar türbinlerine yönelmiştir. Bu çalışmada, HAD yöntemi kullanılarak çeşitli Büyük rüzgâr türbinlerinin tasarım ve analizinde önemli ve efektif bir yöntem bulunmuştur.

HAD yöntemi, farklı türdeki Rüzgâr Türbini Kanatlarının etrafındaki akışkanın etkisini etkili bir şekilde analiz etmemizi sağlamaktadır. Navier-Stock yöntemini, Süreklilik denklemi ve Momentum yöntemi kullanarak, Qblade ve ANSYS gibi farklı Bilgisayar analiz programlarında HAD modelleri yapmamızı sağlamaktadır. Bu çalışmada, büyük kapasiteli türbinler için farklı kanat profilleri kullanarak farklılıklar gösterilmiştir.

NACA 4415 profili gibi ön kenarın uzunluğu ve eğimin uzunluğa NACA 2215 profilden daha büyük olduğunu bilinmiştir. Ön kenarı ve eğimin uzunluğu büyük olan profiller hem yüksek enerji verimliğine sahiptir hem de süpürülen alanı daha fazla olduğu gösterilmektedir.  $C_l / C_d$  kaldırma katsayısı sürüklenme katsayısına oranı, NACA 4415 profili NACA 2215 profilinden daha fazla olduğunu belirlenmiştir. Bu  $C_l/C_d$  katsayısı, ne kadar fazla olursa türbinin üretebilen enerji yüksek hale getirmektedir. Türbinlerin gürültüsü, etraftaki insanlar üzerindeki en kötü etkilerden biridir. Gürültü analiz ederken, NACA 4415 profilin tarafından üretilen gürültü, muadili NACA 2215 profili 'kinden % 40 daha düşüktür. Bu nedenle, yaşam yerlerde büyük türbinleri daha az gürültülü kullanmak istediği için NACA 4415 profilini kullanmayı tercih edilmektedir. 10, 25 ve 50 MW'lık analiz edilirken büyük rüzgâr türbinleri, kanatlara karşı en düşük ters itme kuvveti etkili geometriye sahip NACA 4415 profilinin olduğu görülmüştür. Bu nedenle hava, kanatlarının etrafında NACA 2215 profilinden daha düzgün bir şekilde akmaktadır.

Örneğin, 10 MW'lık rüzgâr türbininde, NACA 4415 profiline sahip olan türbin 11.5 m/s'lik bir rüzgar hızında en yüksek enerji üretmesine ulaşmaktadır. Buna karşılık, NACA 2215 profili olan rüzgar türbini 14.5 m/s'lik bir rüzgar hızında en yüksek enerji üretmesine ulaşmaktadır. Her bir türbinin süpürülen alanı karşılaştırıldığında, NACA 4415 türbininin süpürülen alanının NACA 2215 profilinden %10 daha fazla olduğu görülmektedir. Büyük türbinlerde, hasar görmemek için rotor dönüş hızı azalmaktadır ondan dolayı, 50 MW'lık rüzgâr türbininde rotor dönüş hızı en yüksek 2.0 d/d dönüş

olmasını tercih edilirken, Ansys Fluent analizinde ise 5.1 d/d alınmıştır. Her iki NACA profili de kanatlar üzerindeki kuvveti analizinde, göbekten kanadın %15 uzaklığında olan kısmın en hassas kısım olduğunu göstermiştir. Bu kısım takviye etmek için gerekli malzemelerle desteklenmelidir.

NACA profillerinin kanatları üzerindeki basıncın etkisi kanat uzunluğunun (%11) kısmında maksimum olmuştur. Örneğin, 10 MW Rüzgar Türbini için NACA 4415 profilinde 8 m uzunluğundaki basınç 11648 Pa'dır. Öte yandan, aynı uzunluktaki aynı rüzgar türbininin NACA 2215 profili üzerindeki basıncı 11762'dir. Q-Blade ve Ansys programları toplam profillerin gerilemesi analiz edildiğinde arasındaki fark yaklaşık olarak 1-4% bulunmaktadır. Bu fark hata doğrulamasından veya meshing boyutlandırılmasından kaynaklanabileceği tahmin edilmektedir.

Rüzgar türbinlerinin her iki NACA profili de analiz edilirken, NACA 4415 sahip olan rüzgar türbininin NACA 2215 profili sahip olan rüzgar türbinine göre yaklaşık olarak %10 daha fazla yıllık enerji üretme kabiliyetine sahip olduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak, NACA 4415 profili, NACA 2215'e göre çok daha etkili, ekonomik ve daha düşük gürültülüdür. NACA profillerinin imal edilmesi gibi zorluklara girilmeden HAD yöntemiyle yapılan bu çalışma, NACA 4415 profilinin ön kenarı ve eğim düşük olması nedeniyle daha ekonomik bir kanat olduğunu göstermektedir.

Literatür araştırmasında da verilen 50 MW güçteki bir türbin tasarımı için Yao ve ark, (2021) çalışması sonuçları ile bu tezdeki sonuçlar karşılaştırıldığında; 50 MW rüzgar türbini üç farklı kanat profili için kanatlar 250 m olacak şekilde tasarlanmıştır.

Bu tez çalışmasında ise 50 MW güçteki rüzgar türbini literatürle benzer olarak 11 m/s nominal güç için tasarlandığında kanat uzunluğu aynı uzunluk olan 250 m bulunmuştur. Ancak analiz programlarının bu büyüklükteki bir kanat için uygun olmaması nedeniyle nominal güç tasarım rüzgar hızı 14 m/s alınarak türbin kanat uzunluğu 157 m bulunarak, bu kanat için analizler yapılmıştır.

Farklı rüzgar türbinlerinin tasarımı sırasında kullanılan kanat sayısının üç olması dikkate alınmıştır. Bu nedenle taşıyıcı kule üzerindeki yükler iki katına çıkarılmıştır ve bu nedenle imalat sırasında kullanılan kalınlık çizelge 5.1'de gösterildiği gibi dikkate alınmıştır.

**Çizelge 5.1.** Farklı güçlerdeki rüzgar türbinlerinin kule parçalarının et kalınlıkları

Kule parçası (Segmenti)	10 MW'lık türbin kulesi et kalınlığı (mm)	25 MW'lık türbin kulesi et kalınlığı (mm)	50 MW'lık türbin kulesi et kalınlığı (mm)
1	100	150	400
2	60	90	300
3	38	60	174
4	38	60	174

Bu çalışmada 50 MW'lık rüzgar türbini göbek yarıçapı 4.8 m olacak şekilde tasarlanırken, Yao ve Ark, (2021) çalışmalarında göbek yarıçapını 3.5 m olarak tasarlamışlardır.

Milin mukavemet analizlerin sonucu, NACA 4415'in profilindeki basıncın etkisinin NACA 2215 profilinden daha büyük olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle donatı o noktadan itibaren takviye artırılarak yapılmalıdır. Kanat boyunun sonuna ulaşana kadar basınç hemen hemen sabit kalmaktadır. Kanatların malzemelerine bakılarak, Piyasada kullanılan türbin kanadı malzemelerinden seçilen vinilester matris ve polyester matris cam elyaf şilte ve/veya balsa takviyeli kompozit malzemelerin çekme özellikleri incelenmiştir. Matris malzemesinin kompozit malzemenin mikrosertliği üzerindeki etkisini anlamak için, takviye malzemesi türü ve katkı miktarı aynı kalmak kaydıyla vinilester matrisli ve polyester matrisli kompozit malzemelerin mikrosertlik değerleri incelenmiştir. Çekme testlerinin incelenmesiyle; Vinilester matrisli cam takviyeli plastiklerin çekme mukavemeti ve deformasyon oranlarının polyester matrisli cam takviyeli plastiklere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak rüzgar türbini rotor kanatları üretilirken; 3 m'ye kadar olan rotor kanatlarında matris malzemesi olarak polyester reçine tercih edilmektedir. Ancak 3 m'den uzun kanatlarında matris malzemesi olarak polyester reçinelere göre daha dayanıklı olan vinilester veya epoksi reçineler kullanılmalıdır. Ayrıca, cam elyaf keçe miktarı artırılırken, üretilen kompozit malzemelerin dayanım ve gerinim değerleri matris malzemedan bağımsız olarak artmaktadır.

Sandviç yapı kompozit malzemeler, ana takviye elemanı olarak cam elyafı ve ikinci takviye elemanı olarak balsa ile üretilmektedir. Yapılan araştırmaların sonucunda vinilester matris, 2 kat cam elyafı keçe ve 1 kat balsa takviyeli kompozit malzemelerin mukavemet değerleri, eşit kat balsa ve cam elyafı içeren keçe yapılaraya göre daha üstün bulunmuştur. Yüksek basınca maruz kalan kısımlar, matkap ucunun deformasyona uğrayan kısımlarına güçlü ve hafif bir destek olan alüminyum parçalar ile güçlendirilerek,

uç kısımlarında desteklenmelidir. Büyük türbinler çok büyük kanatlara sahiptir ve bu nedenle alüminyum parçalarla takviye gerekmektedir.

Çizelge 5.2. 10, 25 ve 50 MW'lık türbinlerin farklı rüzgar hızlarında ve farklı türbin kanat profillerinde elde edilen güçler

Rüzgar Hızı [m/s]	NACA 4415 profili 10 MW'lık RT Üretilen Güç [kW]	NACA 2215 profili 10 MW'lık RT Üretilen Güç [kW]	NACA 4415 profili 25 MW'lık RT üretilen güç [kW]	NACA 2215 profili 25 MW'lık RT üretilen güç [kW]	NACA 4415 profili 50 MW'lık RT üretilen güç [kW]	NACA 2215 profili 50 MW'lık RT üretilen güç [kW]
4	3610.2	2139.8	7300	6250	2580.44	2112.69
6	4516.02	3870.78	12882	11929	11219.29	10637.1
8	5880.15	4223.41	18096	16798	26883.4	21856.6
10	6525.41	5751.41	20967	20873	45463.49	40445.7
12	10073.2	9852.09	21606	20958	48599.17	47569.71
14	10121.3	9937.17	25194	24240	49802.20	49451.6
16	10121	10031	24210	24644	50301	50454
18	9981	10031	24910	24644	50301	50454
20	9981	10031	24910	24644	50301	50454
22	9981	10031	24910	24644	50301	50454
24	9981	10031	24910	24644	50301	50454
26	9981	10031	24910	24644	50301	50454

Çizelge 5.2'de, 0 m/s'den 26 m/s'ye kadar farklı rüzgar hızlarında 10, 25 ve 50 MW'lık türbinlerin farklı kanat profillerinde elde edilen güçleri gösterilmiştir. Çizelgede, NACA 4415 profilli kanadın ürettiği güç NACA 2215 kanat profillinden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermektedir. NACA 4415 kanat profilinden 14 m/s rüzgar hızına ulaşırken, aynı hızda NACA 2215 kanat profili % 7 ila % 9 daha düşük bulunmuştur. Bu oran 10, 25 ve 50 MW'lık büyük türbinlerde hemen hemen eşit bulunmuştur. Rüzgâr hızı artıkça elde edilebilen güç artmaktadır, ancak, jeneratörün ve kanatların maksimum kapasitesi ulaşıldıkça rüzgâr türbini daha fazla elektrik gücü üretmemektedir.

**Çizelge 5.3** Farklı türbin güçleri (10, 25 ve 50 MW) ve devir sayılarında rüzgar türbinlerinin millerinde elde edilen torklar [kNm]

Milin dönme hızı d/d	10 MW'lık türbin milin torku [kNm]	25 MW'lık türbin milin torku [kNm]	50 MW'lık türbinin milin torku [kNm]
0.2	477464.82	1193662.08	2387324.15
0.25	381971.86	954929.66	1909859.32
0.3	318309.88	795774.72	1591549.43
0.5	190985.93	477464.83	954929.66
0.75	127323.95	318309.89	636619.77
1	95492.97	238732.42	477464.83
2	47746.48	119366.21	238732.42

Çizelge 5.3'te farklı milin üzerinde etkileyen kuvvet analizi göstermektedir. Milin dönme hızı üç türbin üzerinde tespit edip 0.2 d/d milin dönme hızından başlayıp 2 d/d dönme hızında sona ererek tork (moment) analizi yapılmıştır. 10 MW'lık rüzgar türbini için dönme momenti 447,464'den 47,746 kNm'ye düşmektedir. 25 MW'lık rüzgar türbini için dönme momenti 1193662'dan 119366 kNm'ye düşmektedir. 50 MW'lık rüzgar türbini için dönme momenti 2,387,324'den 238,732.25 kNm'ye düşmektedir. Gerçek durumda ise, 50 MW'lık bir rüzgar türbini için maksimum dönüş hızı 0.2 ile 0.8 d/d arasındadır. Tork değeri azalırken dönüş hızı artmaktadır, çünkü ters bir korelasyonları vardır.

## 5.2. Öneriler

Rüzgar türbini kanat profili olarak NACA 2215 profili gürültünün az olmasının istendiği yerlerde kullanılması tercih edilmektedir. Ancak daha büyük güçler üretmeyi amaçlayan projelerde ise 4415 NACA profili kullanılması tercih edilmelidir.

Tasarlanacak türbinlerin genel bir bakışını ve analizini çizmek için Q-blade programının kullanılması tercih edilmesi tavsiye edilmektedir. Ancak doğruluk açısından ise birçok akışkan analizi seçeneğine sahip olduğu için Ansys Fluent programının kullanılması tercih edilmelidir.

## KAYNAKLAR

- Ananda, G. K., Bansal, S. and Selig, M. S., 2018, Aerodynamic Design of the 13.2 MW SUMR-13i Wind Turbine Rotor, *2018 Wind Energy Symposium*, 346-357.
- Afifi, S., A., 2020. CFD Analysis Of Vertical Axis Wind Turbine Using Ansys Fluent., *2020 Journal of Physics Conference Series* 1517(1):012062
- Corke, T., Nelson, R., 2018. Wind Energy Design, First edition, *CRC Press*. 1-353.
- Cox, Kevin and Andreas, Echtermeyer, 2012, Structural Design and Analysis of a 10MW Wind Turbine Blade, *Energy Procedia*, 24: 194-201.
- Gülsoy, Y., Kanal İçerisinde Rüzgar Türbini Tasarımı Ve Had Analizi İle Kanal Profilinin Türbin Performansına Etkilerinin İncelenmesi, 2018, ITÜ.
- Hansen, Martin O.L., Çev.: Yiğit, C., Kahraman, Y., 2020. Rüzgar Türbinlerinin Aerodinamiği, *Pegem Akademi*, I. Baskı Mayıs 2020, Ankara.
- Lalit, K., 2017. CFD Analysis On Wind Blade, *IJARSE*, Vol. No.4, Issue 04, 67-79.
- Lingling, F., 2015. Modeling and Analysis of Doubly Fed Induction Generator Wind Energy Systems, *Academic Press*, 15.25-36.
- Mansour, H., and Rola A., 2020. Design and 3D CFD Static Performance Study of a Two-Blade IceWind Turbine, *Energies*, 13, 53-65.
- Mauro, S., Sebastian B., Rosario L. and Michele M., 2019. Micro H-Darrieus wind turbines: CFD modeling and experimental validation, *Second International Conference on Material Science, Smart Structures and Applications: Icmss*, 2019, 85-97.
- Kaya, M.N., 2019, Eğimli Bir Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini Kanadının Aerodinamik Tasarımı ve Optimizasyonu, Doktora Tezi, *Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü*, Konya Teknik Üniversitesi, Konya.
- Papi, F., Alberto N., Giovanni F., and Alessandro B., 2021. On the Use of Modern Engineering Codes for Designing a Small Wind Turbine: An Annotated Case Study, *Energies*, 14, 110-122.
- Rajakumar, S., and Ravindran D., 2016. Computational Fluid Dynamics of Wind Turbine Blade At Various Angles Of Attack And Low Reynolds Number, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 15, 56-67.
- Richard, C., 2022, Goldwind And China Three Gorges Roll Out Nacelle For 16MW Offshore Wind Turbine, *WindPower Montly, News*, 24 November 2022.

- Schubel, P. J., and Crossley, R.J., 2012, Wind Turbine Blade Design, *Energies*, 2012, 5, 3425-3449.
- Sy, M. S., Binoe, E. A., and Louis, A. M. D., 2020. Aerodynamic Investigation of a Horizontal Axis Wind Turbine with Split Winglet Using Computational Fluid Dynamics, *Energies*, 13, 45-58.
- Subham, S. A. A., 2019, Wind turbine noise and its mitigation techniques: A review. *Energies* 02, 2-19.
- Simms, D. A., Hand, M., Fingersh, L. ve Jager, D., 1999, Unsteady aerodynamics experiment phases II-IV test configurations and available data campaigns, *National Renewable Energy Laboratory, Colorado*, 3.
- Singh, R. K. ve Ahmed, M. R., 2013, Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications, *Renewable energy*, 50, 812-819.
- Sørensen, J. N., 2016, General momentum theory for horizontal axis wind turbines. Switzerland: Springer.
- Tarhan, C., Çil, M.A., 2022, Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Farklı Kanat Profillerinin Sayısal Olarak İncelenmesi, *Mühendis ve Makina*, cilt 63, sayı:706, s.1-22, 2022.
- Thumthae, C. ve Chitsomboon, T., 2009, Optimal angle of attack for untwisted blade wind turbine, *Renewable energy*, 34 (5), 1279-1284.
- Tu, J., Yeoh, G. H., Liu, C., 2018, Computational fluid dynamics: a practical approach, Butterworth-Heinemann.
- Tong, W., 2010, Wind Power Generation and Wind Turbine Design, *WIT Press*, Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton, SO40 7AA, UK.
- Yao, S., Mayank C., Griffith, D.T., Mendoza, A.S.E., Selig, M.S., Martin, D., Kianbakht, S., Johnson, K., and Loth, E., 2021. Aero-Structural Design and Optimization of 50 MW Wind Turbine With Over 250-m Blades, *Wind Engineering*, 46: 273-295.
- YEGM, 2018, Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Ankara.