

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**YENİ NESİL TEKNOLOJİ KULLANARAK KÜÇÜK GÜÇLÜ
RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE BİLGİSAYAR DESTEKLİ
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KERİM ÜZÜM

BALIKESİR, MAYIS - 2015

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**YENİ NESİL TEKNOLOJİ KULLANARAK KÜÇÜK GÜÇLÜ
RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE BİLGİSAYAR DESTEKLİ
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KERİM ÜZÜM

BALIKESİR, MAYIS - 2015

KABUL VE ONAY SAYFASI

Kerim ÜZÜM tarafından hazırlanan “**YENİ NESİL TEKNOLOJİ KULLANARAK KÜÇÜK GÜÇLÜ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 08.05.2015 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

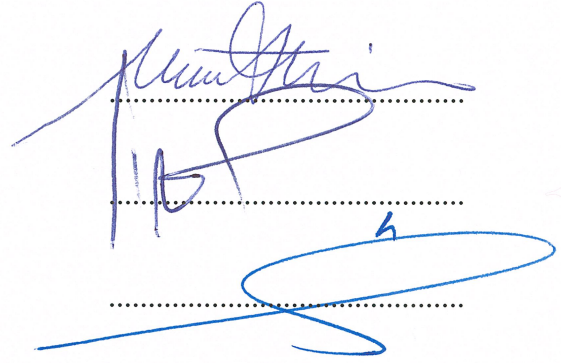
Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Nurettin ARSLAN

Üye
Prof. Dr. İrfan AY

Üye
Prof. Dr. Reşat ÖZCAN



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

ÖZET

**YENİ NESİL TEKNOLOJİ KULLANARAK KÜÇÜK GÜÇLÜ RÜZGAR
TÜRBİNİ TASARIMI VE BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KERİM ÜZÜM
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF.DR. NURETTİN ARSLAN)
BALIKESİR, MAYIS - 2015**

Bu tez çalışması yeni ve yenilenebilir enerji üzerine olacaktır. Bu alanda çalışma konumuz ise 3 kW'lık küçük güçlü rüzgar türbininin yeni nesil teknoloji kullanılarak tasarımını, gerekli analizlerini ve hesaplamalarını bilgisayar desteği ile yapmaktır. Solidworks bilgisayar destekli tasarım programı kullanılarak 3 kW'lık küçük güçlü rüzgar türbininin üç boyutlu katı modeli oluşturulmuştur. Bütün rüzgar türbini bileşenleri modellenmiştir ve daha sonra programın montaj bölümünde parçalar birleştirilerek rüzgar türbininin montajı tamamlanmıştır. Solidworks programının içinde entegre çalışan Solidworks Flow Analysis yani akış analizi modülü kullanılarak tasarlanan rüzgar türbininin akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Akış analizinde elde edilen sonuçlar doğrultusunda kanatların, kulenin, gövdenin ve bağlantı elemanlarının gerekli analizleri Solidworks Simulation modülü kullanılarak gerçekleştirilerek tasarım doğrulaması yapılmıştır. Rüzgar türbini tasarımında, enerji dönüşümü zincirini ilk halkası olan rüzgar türbin kanatları önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada kanat tasarımına azami önem verilmiş gerekli hesaplamalar ve analizler yapılmıştır. Buradan da anlaşılacağı gibi rüzgar türbini tasarımında optimum sonuca ulaşabilmek için çok sayıda tekrar gerektiren hesaplamalar yapılmaktadır. Bu hesaplamalar sonlu elemanlar yöntemi ile ve tasarımlar bilgisayar destekli tasarım programları kullanılarak yapılacak çalışmalarda üretim zamanından, prototip üretim sayısından ve maliyetinden tasarruf edinilmiş olacaktır.

ANAHTAR KELİMELEER: Rüzgar türbini, tasarım, analiz, Solidworks

ABSTRACT

POWERFUL NEW GENERATION TECHNOLOGY FOR SMALL WIND TURBINE DESIGN AND COMPUTER AIDED ANALYSIS

MSC THESIS

KERİM ÜZÜM

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF.DR. NURETTİN ARSLAN)

BALIKESİR, MAY 2015

This thesis will be on new and renewable energy. The subject of our work in this area 3 kW small wind turbine design using new generation technology, make the necessary analysis and calculations with computer support. Using SolidWorks computer-aided design program 3 kW small wind turbine has generated three-dimensional solid model. All of the wind turbine components are modeled and then the combined components in the assembly portion of the wind turbine installation program is completed. Integrated within the SolidWorks program that is running SolidWorks Flow Analysis flow analysis of the wind turbine module was designed using flow analysis performed. In line with the results obtained from flow analysis wing of the tower, performing the necessary analysis using SolidWorks Simulation design validation modules of the body and the fittings are made. Wind turbine design, wind turbine blades energy conversion chain, the first public plays an important role. This study has given maximum importance to the wing design made the necessary calculations and analysis. Here can be understood as a plurality of wind turbine repetitive calculations are made in the design to achieve optimum results. These calculations with finite element method and computer aided design and timely production of studies using design programs, will be acquired from the number of prototype production and cost savings.

KEYWORDS: Wind turbine, design, analysis, SolidWorks

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
TABLO LİSTESİ.....	xii
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ÖNSÖZ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Genel Bilgiler.....	3
1.2 Rüzgar Enerjisinin Küresel Durumu.....	8
1.3 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Durumu.....	11
2. RÜZGAR ENERJİSİ VE KULLANIMI.....	14
2.1 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminin Tarihi.....	15
2.2 Dünya ve Türkiye’de Rüzgar enerjisi Kullanımı.....	17
2.3 Rüzgar Enerjisi Dönüşümü ve Rüzgar Türbinleri.....	18
2.3.1 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	19
3. TÜRBİN ÇEŞİTLERİ.....	20
3.1 Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	20
3.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	21
3.3 Yavaş Hızlarda Çalışan Rüzgar Türbinleri.....	22
3.4 Yüksek Hızlarda Çalışan Rüzgar Türbinleri.....	23
3.5 Önden Rüzgarlı Türbinler.....	24
3.6 Arkadan Rüzgarlı Türbinler.....	25
4. RÜZGAR TÜRBİNİ BİLEŞENLERİ.....	26
4.1 Kanatlar ve Rotor.....	27
4.2 Kanat Döndürme Mekanizması (Pitch).....	31
4.3 Fren.....	31
4.4 Düşük Hızlı Şaft.....	32
4.5 Dişli Kutusu.....	33
4.6 Jeneratörler.....	33
4.6.1 Senkron Jeneratörler.....	34
4.7 Asenkron (Endüksiyon) Jeneratörler.....	36
4.7.1 Kafes Yapılı Rotorlar.....	36
4.8 Kontrol Kutusu.....	38
4.9 Anemometre ve Rüzgar Gülü.....	38
4.10 Türbin Kafa Kısmı.....	39
4.11 Yüksek Hız Şaftı.....	39
4.12 Rota Mekanizması ve Motoru (Yaw).....	39
4.13 Kule.....	40
5. KANAT (PALA) RÜZGAR İLİŞKİSİ.....	41
5.1 Kaldırma ve Sürüklenme Denklemleri.....	42

6. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN KARAKTERİSTİKLERİ.....	48
6.1 Λ (Uç Hız Oranı).....	48
6.2 C_p (Güç Katsayısı).....	49
6.3 Katılık Oranı.....	50
6.4 P_f (Faydalı Güç).....	51
6.5 Rüzgar Türbinin Aerodinamik Verimi.....	51
7. RÜZGAR TÜRBİNİNİN TASARIMI.....	56
7.1 Kanat Tasarım ve Hesaplamaları.....	56
7.2 Tasarım Yapılacak Kanat ve Güç Hesabı.....	59
7.3 Optimum Profil Boyu Hesabı.....	60
7.4 Optimum Bağlama Açısı Hesabı.....	62
7.5 Damla Profilleri İçin Hesaplanacak Kalınlık Ve uzunluk Değerleri.....	63
7.6 Kanat Kök Bağlantı Montaj Sacı.....	73
7.7 Kanat Tutucu.....	74
7.8 Kanat Döndürme Mekanizması.....	75
7.9 Rotor (Hup) Montajı.....	77
7.10 Rüzgar Türbini Gövde Montajı.....	78
8. AKIŞ, STATİK, TİTREŞİM VE BURKULMA ANALİZİ.....	84
8.1 Tek Kanatın Akış ve Statik Analizi.....	84
8.2 Hup Akış ve Statik Analizi.....	88
8.3 Kanat Titreşim Analizi.....	102
8.4 Direk Akış, Statik ve Burkulma Analizi.....	104
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	112
10. KAYNAKLAR.....	114

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Dünya enerji kaynakları	9
Şekil 1.2: Dünya elektrik üretimi	9
Şekil 1.3: İşletmede olan rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre yüzdesel dağılımı.....	13
Şekil 1.4: İşletmede olan rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu güç bakımından illere göre yüzdesel dağılımı.....	13
Şekil 2.1: Dünyanın ilk otomatik çalışan elektirik üreten rüzgar türbini	15
Şekil 2.2: Paul la Cour test rüzgar türbini, Danimarka, 1897.....	15
Şekil 2.3: 1.250 MW kapasiteli Smith-Putnam rüzgar türbini	16
Şekil 2.4: Yıllara göre dünya rüzgar enerjisi santralleri kurulu güçleri	18
Şekil 3.1: Dikey eksenli bir rüzgar türbini.....	21
Şekil 3.2: Elektrik üreten yatay eksenli 3 kanatlı bir rüzgar türbini	24
Şekil 4.1: Rüzgar türbini bileşenleri	26
Şekil 4.2: Modern bir rotor göbeğinin iç yapısı.....	29
Şekil 4.3: Direct drive sistemi	30
Şekil 4.4: Direct Drive sistemli Enercon jeneratör	30
Şekil 4.5: Pitch mekanizması.....	31
Şekil 4.6: Fren mekanizması	32
Şekil 4.7: Dişli kutusunun kesit görünüşü	33
Şekil 4.8: Senkron jeneratörler	35
Şekil 4.9: Asenkron jeneratörler	36
Şekil 4.10: Elektrik jeneratörü.....	38
Şekil 4.11: Rüzgar gülü	39
Şekil 4.12: Yaw mekanizması	40
Şekil 4.13: Kule	40
Şekil 5.1: Rüzgar – Kanat profili ilişkisi.	41
Şekil 5.2: Kanat profili kesiti	45
Şekil 5.3: NACA 4415 Profili CD – CL Eğrisi	45
Şekil 5.4: NACA 4415 Profili CD – α Eğrisi	46
Şekil 5.5: Kaldırma katsayısının α ile değişimi (SymLab Programı).....	46
Şekil 5.6: Direnç katsayısının α ile değişimi (SymLab Programı)	46
Şekil 6.1: Rüzgar türbini pervanesinde gücün hıza bağlı değişimi	48
Şekil 6.2: Uç hız oranı – Kanat sayısı ilişkisi.....	49
Şekil 6.3: Rüzgar türbini pervanesinde aerodinamik verimin uç hız oranına bağlı değişimi	49
Şekil 6.4: Güç katsayısının uç hız oranına göre değişimi.....	50
Şekil 6.5: Kanat ön ve arka bölgelerinde hız değişimi	51
Şekil 6.6: Rotor önünde ve arkasında hız ve basıncın değişimi	52
Şekil 6.7: Hız oranı güç katsayısı ilişkisi	54
Şekil 6.8: Yatay eksenli bir rüzgar türbinin analizi için pala geometrisi ve hız-kuvvet diyagramı.....	54
Şekil 7.1: Kanat profilinin temel parametreleri	57
Şekil 7.2: NACA 4415 2 metrelik kanat şekli.	68
Şekil 7.3: NACA 4415 2 metrelik kanat katı şekli farklı görünüşü	68
Şekil 7.4: Airfoiltools internet sitesindeki damla profil şekli.....	69

Şekil 7.5: Airfoiltools internet sitesindeki damla profillerin x, y, z kordinatları.....	69
Şekil 7.6: Kanat damla profilinin çıkartılması.....	69
Şekil 7.7: Kanat damla profili.....	70
Şekil 7.8: Twist axial noktası	70
Şekil 7.9: Kanat damla profilinin döndürülmesi.....	71
Şekil 7.10: Farklı açılarda kanat görünümü	71
Şekil 7.11: Farklı açılarda kanat görünümü ve kök bağlantısı.....	72
Şekil 7.12: Kanadın loft edilmiş hali	72
Şekil 7.13: Kanat kök bağlantı sacı	73
Şekil 7.14: Kanat kök bağlantı sacı ile montajı.....	73
Şekil 7.15: Kanat kök bağlantısı ile birlikte rotora bağlandığı kanat tutucusu.....	74
Şekil 7.16: Kanat kök bağlantısı ile rotora bağlandığı kanat tutucusu montajı.....	74
Şekil 7.17: Kanat döndürme mekanizması	75
Şekil 7.18: Kanat döndürme mekanizması farklı açıdan görünüşü	76
Şekil 7.19: Kanat döndürme mekanizması 90° dönmüş hali	76
Şekil 7.20: Elketirikli linear aktüatör montajı.....	76
Şekil 7.21: Rotor önden görünüşü	77
Şekil 7.22: Rotor arkadan görünüşü	77
Şekil 7.23: Rotor gövde montajı.....	78
Şekil 7.24: Gövde iskelet montajı.....	78
Şekil 7.25: Alternatör ve kuyruk gövde montajı.....	79
Şekil 7.26: 3.5 kW'lık Daimi mıknatıslı senkron alternatör kasnak montajı.....	79
Şekil 7.27: Gövde direk ile montajı.....	79
Şekil 7.28: Gövdenin direk ile montaj ara parçası.....	80
Şekil 7.29: 5'' Siyah borudan oluşan 12 metrelik direk montajı.....	80
Şekil 7.30: 3 kW'lık rüzgar türbini montajı.....	81
Şekil 7.31: 3 kW'lık rüzgar türbini montajının farklı görünüşü.....	81
Şekil 7.32: 3 kW'lık küçük güçlü rüzgar türbininde kullanılan kasnaklar.....	83
Şekil 8.1: Tek kanat üzerinde 12 m/s rüzgar şiddetinde hız ve basınç dağılımı.....	84
Şekil 8.2: Tek kanat üzerinde 12 m/s rüzgar şiddetinde hız ve basınç dağılımını düzlem üzerinde ve kanat üzerinde görünüşü.....	85
Şekil 8.3: Tek kanat üzerinde yapılan mesh işlemi.....	85
Şekil 8.4: Kanat üzerinde gerilim sonuçları.....	86
Şekil 8.5: Kanat üzerinde yer değiştirme sonuçları.....	86
Şekil 8.6: Kanat üzerinde gerinim sonuçları.....	86
Şekil 8.7: Kök bağlantısız tek kanat üzerinde 12 m/s rüzgar şiddetinde hız ve basınç dağılımı.....	87
Şekil 8.8: Kök bağlantısız tek kanat üzerinde 12 m/s rüzgar şiddetinde hız ve basınç dağılımını düzlem üzerinde ve kanat üzerinde görünüşü.....	87
Şekil 8.9: Tek kanat üzerinde 30 m/s rüzgar şiddetinde hız ve basınç dağılımı	88
Şekil 8.10: Eklenti aktifleştirme	89
Şekil 8.11: Analiz sihirbazı çalıştırılması	89
Şekil 8.12: Analiz adının girilmesi.....	89
Şekil 8.13: Analiz'de kullanılacak birim sistemi seçimi	90
Şekil 8.14: Akışkan tipi seçimi ve diğer parametrelerin ayarlanması	90
Şekil 8.15: Akışkan seçimi	91
Şekil 8.16: Sınır şartları ve pürüzlülük değerlerinin seçimi	91
Şekil 8.17: Analiz girdi değerleri.....	92
Şekil 8.18: Mesh ayarı	92
Şekil 8.19: Kontrol hacmi ayarı	93

Şekil 8.20: Rotasyon ayarı	93
Şekil 8.21: Sınır koşulları ayarı	94
Şekil 8.22: Sonuç segmesi	94
Şekil 8.23: 3 kanat üzerinde hız dağılımı	95
Şekil 8.24: 3 kanat üzerinde basınç dağılımı	95
Şekil 8.25: Statik analize basınç sonuçlarını aktarma	96
Şekil 8.26: Statik analize geçiş	96
Şekil 8.27: Statik analiz basitleştirmesi	97
Şekil 8.28: Statik analiz malzeme atama	98
Şekil 8.29: Akış analizini statik analize tanıtmaya	98
Şekil 8.30: Akış analizini statik analize tanıtmaya ve kanatları sabitleme	99
Şekil 8.31: Mesh atama	99
Şekil 8.32: Statik analiz çalıştırma.....	100
Şekil 8.33: Statik analiz von-mises gerilim sonuçları.....	100
Şekil 8.34: Statik analiz yer değiştirme sonuçları	101
Şekil 8.35: Statik analiz gerilim sonuçları	101
Şekil 8.36: Frekans analizi seçimi	102
Şekil 8.37: Frekans analizi sonuçları	103
Şekil 8.38: Frekans titreşimleri değerleri ve periyotları	103
Şekil 8.39: Direk akış analizi sonucunda basınç ve hız dağılımı	104
Şekil 8.40: Direk akış analizi sonucunda basınç ve hız dağılımı farklı görünüşü.....	105
Şekil 8.41: Direk akış analizi sonucunda basınç ve hız dağılımı ve oluşan kuvvetlerin sonuçları.....	105
Şekil 8.42: Akış analiz sonucunda oluşan basınçların etkisi ile yapılan statik analizinin gerilme sonuçları.....	106
Şekil 8.43: Akış analiz sonucunda oluşan basınçların etkisi ile yapılan statik analizinin yer değiştirme sonuçları.....	106
Şekil 8.44: Akış analiz sonucunda oluşan basınçların etkisi ile yapılan statik analizinin güvenlik faktörü sonuçları.....	107
Şekil 8.45: Rüzgar türbinin gövde ve hup kısmınının akış analizi sonucunda oluşan kuvvetleri statik analize aktarılarak yapılan analiz gerilme sonucu.....	107
Şekil 8.46: Rüzgar türbinin gövde ve hup kısmınının akış analizi sonucunda oluşan kuvvetleri statik analize aktarılarak yapılan analiz yer değiştirme sonucu.....	108
Şekil 8.47: Rüzgar türbinin gövde ve hup kısmınının akış analizi sonucunda oluşan kuvvetleri statik analize aktarılarak yapılan analiz güvenlik faktörü sonucu.....	108
Şekil 8.48: Basınç gemi dizayn analiz seçimi	109
Şekil 8.49: İki analiz bir arada yapılan statik analiz çalışması sonucunda oluşan gerilme dağılımı sonuçları.....	109
Şekil 8.50: İki analiz bir arada yapılan statik analiz çalışması sonucunda oluşan yer değiştirme sonuçları.....	110
Şekil 8.51: İki analiz bir arada yapılan statik analiz çalışması sonucunda oluşan güvenlik faktörü dağılımı sonuçları.....	110
Şekil 8.52: Burkulma analizi kritik yük faktörü ve yerdeğiştirme sonuçları.....	111

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Tükenebilirliğine göre enerji türleri, avantaj ve dezavantajları.....	4
Tablo 1.2: Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınıflandırılması	5
Tablo 1.3: Türkiye’de bölgesel rüzgar verileri.....	11
Tablo 2.1: Rüzgar türbinlerinin tarihsel gelişiminin yıllara göre sıralanması.....	17
Tablo 2.2 Rüzgar türbinlerinin güçlerine göre sınıflandırılması	19
Tablo 5.1: NACA profillerine ait α ile kaldırma direnç katsayılarının değişimi.	47
Tablo 7.1: NACA 4415 profillerine ait kaldırma kuvveti katsayıları	58
Tablo 7.2: NACA 4415 profillerine ait kalınlık değerleri.....	59
Tablo 7.3: Kanat düzlem sayısı ve mesafeleri	60
Tablo 7.4: NACA 4415 profillerine ait kullanılan kalınlık değerleri.....	63

SEMBOL LİSTESİ

A	: Rotor kanatlarının kapladığı alan
A	: Rotor kanatlarının süpürdüğü alan
A	: Eksenel indüksiyon katsayısı
A'	: Radyal indüksiyon katsayısı
a	: Merkezkaç kuvvetinin birim kütleye etki eden ivmesi
b	: Belli bir kesitte veter uzunluğu
c	: Veter uzunluğu (Kiris uzunluğu)
C_L	: Kaldırma kuvveti
C_D	: Sürüklenme kuvveti
C_P	: Güç katsayısı
D	: Sürüklenme kuvveti
F	: Rüzgarın tesir kuvveti
K	: Boyutsuz katsayı
L/D	: Taşıma/Sürüklenme oranı
M	: Kütleli debi
PR	: Rotordan elde edilen güç
P	: Rüzgar gücü
Re	: Reynold sayısı
R	: Kanat süpürme alanının yarıçapı
S	: Rüzgarın etkisi altındaki cismin alanı
r	: Rüzgarın dolanım yarıçapı
V	: Serbest hava akış hızı
V_d	: Kanat arkasındaki rüzgar hızı
V_{rel}	: Bağlı hız
V₁	: Kanat önündeki rüzgar hızı
V₂	: Kanat arkasındaki rüzgar hızı
α	: Hücum açısı
ρ	: Havanın yoğunluğu
T	: Havanın viskozitesi
λ	: Kanat uç hız oranı
Ω	: Rotorun açısal hızı
σ	: Katılık oranı
φ	: Dönme düzlemi ile bağlı hız arasındaki açı
θ	: Kanat açısı
Γ	: Kanat etrafındaki sirkülasyon
abğl	: Bağlama açısı
aopt	: Optimum hücum açısı
α₁	: Relatif hız vektörü ile profil giriş hattı arasındaki açı
λ_D	: Dizayn devirlilik sayısı
t_{opt}	: Optimum profil boyu
Z	: Kanat sayısı
Φ	: Stator akısı
f	: Stator uyarma frekansı
P	: Magnetik kutup çiftlerinin sayısı
I₂	: Rotor barlarında indüklenen akım

ÖNSÖZ

Yeni Nesil Teknoloji Kullanılarak Küçük Güçlü Rüzgar Türbini Tasarımı ve Bilgisayar Destekli Analizi tezimde benden yardımını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Nurettin ARSLAN'a desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim. Ayrıca Rüzgar Türbini ilgili teknik bilgilerini paylaşan ve bu konuda tecrübe edinmemi sağlayan Aero Rüzgar Endüstrisi, Northel Enerji, Cimo Mühendislik firmalarına teşekkürü bir borç bilirim.

Bu günlere gelmemdeki en büyük desteği olan aileme minnettarlığımla birlikte teşekkürlerimi sunarım.

Balıkesir, 2015

Kerim ÜZÜM

1. GİRİŞ

Enerji; bir sistemde bulunan iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Enerji; kullanım alanına göre elektrik enerjisi, mekanik enerji, kimyasal enerji gibi çeşitlere ayrılabilir. Bununla beraber dünyada yararlanılan enerji kaynaklarının bir kısmı tükenir ve yeniden kullanılamaz. Genel olarak bu grubun kaynağını fosil yakıtlar oluşturmaktadır. Katı, sıvı ve enerji talebi her geçen gün artmaktadır talebini karşılayamaz hale gelmiştir ve insanoğlu yeni arayışlara girmiştir. Bu noktada yenilenebilir enerji kaynakları devreye girmiştir. Enerji talebini artıran en önemli etkenler olarak teknolojik gelişmeler, sanayileşme ve maddi gelirin yükselmesiyle beraber konfor arayışı gösterilebilir [1].

Artan enerji talebiyle beraber fosil yakıtlar hızla tükenmektedir. 2050'li yıllara gelindiğinde petrolün tükenme noktasına gelineceği varsayılmaktadır. Doğalgaza 2070, kömüre ise 2150 yılına kadar ömür biçilmektedir. Bunun yanında fosil yakıtların kullanılması çevremize olumsuz etkileri beraberinde getirmiştir. Şehirlerimiz kara dumanlarla kaplanmaya başlamış nefes alamaz duruma geldiğimiz zamanlar olmuştur. Ozon tabakası delinmiş olup güneşten gelen zararlı ışınlarla karşı süzme görevini yerine getiremez duruma gelmiştir. Sera etkisi, asit yağmurları bize hiç yabancı kelimeler olmayıp küresel ısınmanın etkilerini her geçen gün şiddetle hissetmeye başlamış bulunmaktayız [1].

Bir çok ülke gün be gün artacak olan bu enerji ihtiyacını nasıl karşılayacağını araştırmaktadır. Fosil yakıt bakımından zengin olan ülkeler tabii ki önceliği bu kaynaklarına vermekte ve enerji ihtiyaçlarının büyük bir bölümünün hala fosil yakıtlardan temin etmektedir. Fosil yakıt bakımından fakir ülkeler ise nükleer enerjiye ağırlık vermiştir. Örneğin Fransa elektrik enerjisinin %78'ini nükleer reaktörlerden sağlamaktadır. Ülkemiz fosil yakıtlar bakımından zengindir. 1999 yılına kadar elektrik enerjimizin neredeyse tamamını termik ve hidrolik santrallerden sağlıyorduk. Enerji istatistikleri dergisine göre bu oranların % 68,75 termiksantrallerden,%29,2 hidrolik santrallerden, %0,07 jeotermal santrallerden %0,02 Rüzgar santrallerinden olduğu açıklanmıştır. % 1,96 gibi bir oranda ithal

edilmiştir. Daha sonraki yıllarda doğalgazın ülkemize ithalatının artmasıyla elektrik enerjisi üretiminin belkemiğini oluşturmuştur. Günümüzde ise elektrik üretimimizin yarısında doğalgaz kullanılmaktadır. 2013 yılı brüt üretime bakacak olursak bu payların % 43,8 doğalgaz , %26,6 termik %24,7 hidrolik % 4,9 jeotermal ve rüzgar enerjisi olduğu görülür. Burada dikkat edilmesi gereken husus enerji üretimimizin yarısı kendi ülkemize ait olmayan ithal ettiğimiz doğalgaza kaymıştır. Hatta ithal ettiğimiz doğalgazı kullanmak için termik santrallerimizin kapasiteleri en alt seviyelere indirilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim olmakla beraber süreç bir an önce hızlandırılmalıdır. Çünkü enerjiyi dışarıdaki kaynaklardan temin etmek dışa bağımlı hale gelmektir. Görüldüğü üzere tükenen enerji kaynaklarıyla beraber yenilenebilir enerji kaynaklarını hızla faaliyete geçirmek zaman geçtikçe daha da önemli hal almaktadır. Ülkemiz açısından durumu değerlendirecek olursak şanslı sayılırız. Ancak potansiyelimizi harekete geçirememek gibi bir derdimiz var. Su bakımından zengin sayılabilecek bir ülkeyiz ancak suyumuz boşa akıyor [1].

Yapılması planlanan hidroelektrik santralleri bir an önce bitirmeliyiz. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde belki de en önemlisi Rüzgar enerjisidir. Çünkü bu potansiyelimizi çok ihmal ettik. Dünyaya genel olarak baktığımızda Almanya, Hollanda, İsviçre gibi ülkeler ellerini biraz çabuk tutup Rüzgar enerjisinden azami derecede faydalanmaya çabalamışlardır. Ülkemizde ise bu konu 2000’li yıllarda dikkat çeker hale gelmiş olup günümüzde gündemimize iyice girmiş durumdadır. Bu enerjiden faydalanmada biraz geç kalınmış olsa da açığımızı kapatmak için kolları sıvamış durumda bulunmaktayız. Zira gelişmelerden anlaşılıyor ki Rüzgar enerjisi üretimi konusunda patlama yaşanacağı bariz bir şekilde gözükmektedir. Bunu EPDK’ya lisans başvurusunda bulunan firmaların çokluğundan rahatça anlayabiliyoruz. Görünen o ki en kısa surede Rüzgar türbinlerine gözlerimiz alışacak ve yörelerimizin birer sakinleri olacaklardır [1].

1.1 Genel Bilgiler

Rüzgâr enerjisinin kaynağı güneştir. Güneş enerjisinin; karaları, denizleri ve atmosferi her yerde özdeş ısıtmamasından dolayı oluşan sıcaklık ve buna bağlı basınç farkları rüzgârı yaratmaktadır. Rüzgâr, yüksek basınç alanından alçak basınç alanına yer değiştiren havanın dünya yüzeyine göre bağlı hareketidir. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin çok küçük bir kısmı rüzgâr enerjisine dönüşebilmektedir. Bu enerji yerel coğrafi farklılıklar ve homojen olmayan ısınmaya bağlı olarak zamansal ve yöresel değişiklikler gösterir. Rüzgâr enerjisinde; rüzgârın hızı, yönü ve esme saat sayısı gibi özellikleri değerlendirilir. Rüzgârın hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı biçimde artar. Rüzgârın yönü, günlük hava şartlarına ve iklim özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Meteorolojik ve tomografik açıdan rüzgârın olabileceği yerler aşağıda sıralanmıştır [2]:

- Basınç radyanının yüksek olduğu yerler
- Yağışların sürekli esen rüzgârlara paralel olduğu vadiler
- Yüksek, engebesiz tepe ve platolar
- Yüksek basınç radyanla düzlükler ve sürekli rüzgâr alan az eğimli vadiler
- Güçlü jeostrofik rüzgâr alanlarının etkisinde kalan tepe ve zirveler
- Jeostrofik rüzgâr ve termal gradyant alanına sahip kıyı şeritleri

Topografya rüzgârın yönü, hızı ve dağılımında önemli rol oynar. Dağ silsileleri, tepe ve kayalıklar, rüzgâr profillerini büyük ölçüde etkiler . Enerjiye olan büyük gereksinim, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekli gündemde olmasının nedenidir. Alternatif kaynaklar olarak da adlandırılan bu enerji kaynaklarından biriside rüzgâr enerjisidir [2].

Rüzgâr enerjisi, fosil yakıtların tükeneceğinin anlaşıldığı son yıllarda, enerji sorununa çözüm olarak görülen kaynaklardan birisidir. İlk kullanım örneklerinin bundan 3000 yıl öncesinde rastlanılmasına rağmen, rüzgar enerjisi son on yıl öncesine kadar yeterince irdelenmemiş ve değerlendirilmemiştir. Enerji, dünyanın var olma süresinin referans olarak alındığı bir sınıflandırmaya göre; tükenebilen ve kendisini dünya var oldukça yenileyebilen, yani tükenmeyen enerji olarak iki grupta incelenebilmektedir Tablo 1.2 Yenilenebilir enerji kaynakları da enerjinin ana kaynağına göre; güneş kaynaklı, dünya kaynaklı ve ay kaynaklı olarak üç grupta

incelenmektedir.Tablo 1.2'nin incelenmesinden de anlaşıldığı gibi güneş kaynaklı olan rüzgâr enerjisi, doğal enerji dönüşümü sonucunda kendisini atmosferde hava hareketi ve denizlerde dalga hareketi olarak hissettirmektedir. Bu kinetik enerjide, rüzgar enerjisi ve dalga enerjisi tesislerinde elektrik enerjisine, su pompalama tesislerinde mekanik enerjiye dönüştürülebilmektedir.Dünya enerji gereksiniminin karşılanmasında ağırlıklı olarak kullanılan fosil yakıtlar ve atom enerjisi, kendine özgü ve tüm insanları doğrudan ilgilendiren sorunlara neden olurlar [2].

Bu sorunların başında, 2001 yılı kaynaklarına göre; tahmini olarak atom enerjisinin kaynağı olan uranyumun 50 yıl, petrolün 44 yıl, doğalgazın 64 yıl ve kömürün 185 yıl sonra, bugüne kadar bulunmuş rezervlerinin tükenecek olmasıdır. Fosil yakıtlar ile ilgili diğer bir sorunda, çevreye verdikleri zararlardır. Elektrik enerjisi elde etmek için fosil yakıtlar yerine rüzgâr santrali kullanıldığında, karbondioksit, kül, kükürt dioksit ve azot oksit 'in atmosfere karışması engellenmiş olunacaktır. Bu nedenlerden dolayı son yıllarda gelişmiş dünya ülkeleri, enerji gereksinimlerinin karşılanabilmesi için rüzgar, güneş, jeotermal, biyoenerji, gelgit ve hidrolik enerjiden oluşan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmişlerdir [2].

Tablo 1.1: Tükenebilirliğine göre enerji türleri, avantaj ve dezavantajları [2].

TÜKENEBİLEN ENERJİ	TÜKENMEYEN (YENİLENEBİLİR) ENERJİ
Kömür, Linyit, Petrol, Doğalgaz, Atom (Uranyum) gibi kaynaklardan elde edilen enerji	Su (Hidrolik), Güneş, Rüzgar, Dalga, Jeotermal, biyoenerji, gelgit olayı gibi kaynaklardan elde edilen enerji
Çevreyi kirletirler ve dünyanın varolma sürecinde tükenirler	Çevre dostudurlar ve dünya varoldukça tükenmezler.

Tablo 1.2: Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınıflandırılması [2].

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI				
Ana Kaynak	Birincil Enerji Kaynakları	Doğal Enerji Kaynakları	Teknik Enerji Dönüşümü	Kullanım Enerjisi
GÜNEŞ	Su	Buharlaştırma Yağış	Su Güç Tesisleri	Elektrik Enerjisi
	Rüzgar	Atmosferdeki Hava Hareketi	Rüzgar Enerji Tesisleri	Elektrik ve Mekanik Enerjisi
	Güneş Işınları	Dalga Hareketi	Dalga Enerjisi Tesisleri	Elektrik ve Mekanik Enerjisi
		Yer ve Atmosferin Isınması	Isı Pompası	Isı Enerjisi
	Güneş Işınları		Kollektörler	Isı Enerjisi
			Solar Hücreler	Elektrik Enerjisi
Isı Güç Tesisleri			Isı ve Elektrik Enerjisi	
DÜNYA	Bioenerji	Bioenerji Üretimi	Dönüşüm Tesisleri	Yakıt Enerjisi
	Yer Merkezi Isısı	Jeotermal Enerji	Jeotermal Güç Tesisleri	Isı ve Elektrik Enerjisi
AY	Ay Çekimi Gücü	Gel-Git Olayı	Gel-Git Güç Tesisleri	Elektrik Enerjisi

Elektrik gücünün temel kaynağı, elektrik jeneratörüne bağlı olan bir mili çevirmek için yenilenebilir olmayan yakıtlardan elde edilen enerjiyi kullanan katı yakıtlı güç jeneratörleri olmuştur. Bu sistemler her zaman birincil güç kaynakları oldukları için kontrol edilebilirlik ve verimlilik alanlarında büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Ayrıca, elektrik her zaman, elektrik endüstrisini tekelleştiren büyük hizmet şirketleri tarafından sağlanmıştır. Bu, elektrikte fiyatın artmasına ve büyüyen pazarla birlikte daha düşük kalite ve hizmetin verilmesine neden olmuştur. Buna tepki olarak daha küçük hizmet şirketleri elektriği belki daha düşük bir fiyattan üretmekte kullanabilecekleri alternatif enerji kaynaklarının araştırmasına yatırım yaptılar. Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan elektrik düzenlemeleri ile birlikte alternatif enerji kaynaklarına yönelik araştırmalarda artış gözlenmiştir. Üzerinde araştırma yapılmakta olan önemli kaynakların bazıları yakıt hücreleri, mikro

türbinler ve rüzgâr türbinleridir. Rüzgâr türbinleri bu tezin odaklandığı ana konu olacaktır [2].

Rüzgar enerji dönüşümü dünyada yeni elektrik üretiminin en hızlı büyüyen kaynağıdır ve belli bir sürede öyle kalacağı tahmin edilmektedir. Diğer kaynaklarla kıyaslandığında rüzgar enerji dönüşümünün ömrü, yayını olmayan işlemi ve düşük maliyeti yenilenebilir bu enerji kaynağını daha cazip hale getirmiştir. İş yaratma açısından da caziptir ve teknolojisi gelişmekte olan ülkelere kolayca nakledilebilir. Rüzgar türbinleri belirli şartlar altında en az maliyet yaklaşımını sağlayarak diğer elektrik güç kaynaklarının kullanımını tamamlarlar. Pek çok durumda en düşük maliyetli sistem, güç kaynaklarından birisi olarak rüzgar enerjisine sahip bir hibrit sistem olacaktır. Bu, merkezi olmayan elektrik projeleri günümüzün merkezi elektrik üretim projeleri ile aynı derecede uygulandığında günümüzü yansıtan potansiyel elektrik üretim projelerinin alanını genişletir [2].

Rüzgar türbinleri birkaç yüz yıldır kullanılıyor olmasına rağmen, Danimarka elektrik üretimi amacıyla rüzgarı kullanan ilk ülkeydi. 1910 yılına kadar Danimarka işletimde olan birkaç yüz rüzgar türbinine sahipti. Geniş ölçekte, ticari rüzgar türbinleri elektrik pazarında 1925 yıllarında görülmeye başlandı. Bunlar ucuz alternatif enerji üretti ve birincil kullanımları bataryaları şarj etmek ve tarlalara su basmaktı. Fakat hizmet endüstrisi tarafından üretilen elektriğin düşük maliyeti ve güvenilirliği rüzgar türbinlerine talep eğilimini arttırdı. 1970'lerin başında hizmet endüstrisi tarafından tüketilen elektrik artmaya başladı ve tüketiciler şikâyet etmeye başladılar; bu rüzgâr türbinlerini düşünme ihtiyacını gündeme getirdi. Ev rüzgâr türbinlerine ek olarak, hizmet şirketleri daha ucuz güç üretmek ve kömür fabrikalarının salınımlarını dengelemek için büyük rüzgar türbinleri yapmaya başladılar. Palmar C. Putnam büyük değerinde güç sağlayan büyük rüzgar türbinlerinin kullanımını kavramını sundu. The S. Morgan Smith Şirketi, PA onun çalışmasını destekledi ve the Smith – Putman rüzgar türbini deneyi doğdu. Daha sonraki yıllarda daha büyük ve iyi rüzgar türbinleri tasarlama yönünde araştırmalar yapıldı. Federal rüzgar enerji programı (FWEP) 1972'de çalışmalarına başladı. Ulusal bilim kuruluşu (NSF) ve ulusal havacılık ve uzay dairesi ulusun enerji kaynak seçeneklerinin geliştirilmesi için rüzgar enerjisinin geliştirilmesini tavsiye ettikten birkaç yıl sonra, rüzgar türbini geliştirme sorumluluğu enerji araştırma ve geliştirme dairesi

(ERDA)'nın bir parçası oldu. Yıllar boyunca birkaç yüz tip rüzgar türbini geliştirilmiş ve daha verimli ve daha güvenilir rüzgar türbinleri bulma yönünde çalışmalar devam etmektedir [2].

Rüzgar türbinlerinin en önemli özelliği diğer üretim sistemlerinden farklı olarak güç akış hızının kontrol edilemez olmasıdır. Güç üretim sistemlerinin büyük bir bölümünde jeneratöre uygulanan yakıt akış veya enerji miktarı çıkış gerilim frekansını kontrol eder. Fakat, rüzgar hızı zamanla değişir. Tabi buna bağlı olarak güç talebi de değişir. Bundan dolayı diğer üretim sistemleri kontrollü enerji kaynakları olarak adlandırılabilir. Oysa rüzgar kontrol edilemeyen bir enerji kaynağıdır ve güç talebi kontrol edilemeyen enerji azalmasıdır. Bazen rüzgar hızı çok yüksek olabilir ki bu güç üretiminin yükün talebini aşmasıyla sonuçlanabilir. Bu türbinin, dönme hızı oranını aşmasına sebep olabilir ve sonuç olarak türbine zarar verebilir. Diğer yandan rüzgar hızı herhangi bir güç üretimi için çok düşük olabilir ve bu yüzden diğer enerji kaynakları kullanılmalıdır. Enerji kaynak girişi, rüzgarın önceden tahmin edilmezliğini ve değişken bir kontrolör ihtiyacını doğrulamak için yeterli sebepleri vermektedir. Bu kontrolör, rüzgar türbininin eşlenmiş bir işlemi için kontrol edilmesi gereken bütün değişkenleri düzenleyecektir. Ana enerji kaynaklarının çoğu toprak altında bulunmaktadır ve bu enerji kaynaklarının teknolojik olarak yenileştirilebilmesi kısa vadede ekonomik olarak kolay olmadığı için yenileştirme çabaları uzun zaman dilimlerine yayılarak gerçekleştirilmektedir. Elektrik endüstrisinde rüzgar türbinleri çoğunlukla enerji miktarını desteklemek için ek enerji kaynaklarıdır. Bu yüzden, türbinlerin çıkış ara yüzlerinin var olan elektrik hatlarına uyumunu sağlamak için rüzgar türbinlerinin tasarlanması ve kontrolüne ihtiyaç vardır [2].

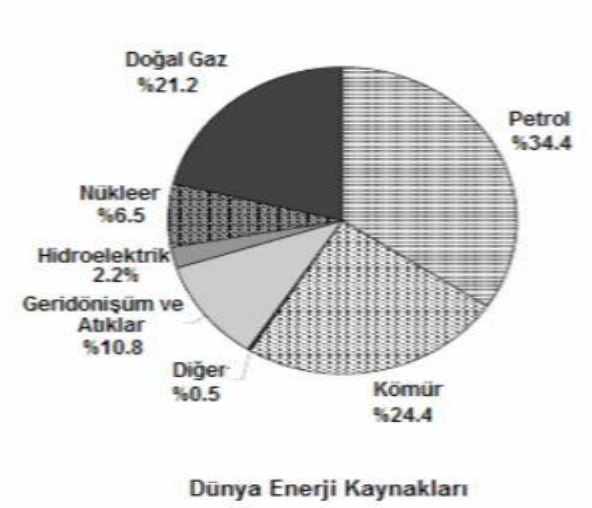
1.2 Rüzgar Enerjisinin Küresel Durumu

Modern enerji çağında temel değişimler, 1970'li yıllarda OPEC ülkeleri endüstrileşmiş ülkelerin ekonomileri üzerindeki güçlerini kavradıklarında, ortaya çıktı. Bunun sonucunda yakıt fiyatları bir gecede tavana vurdu ve sürekli ucuz, sürekli daha çok enerji arzı ani bir sona ulaşır göründü. Ama 1980'li yılların ortalarında yeni arz şirketleri OPEC'in pazar payını azaltınca petrol fiyatları düştü ve OPEC'in birliği parçalandı [3].

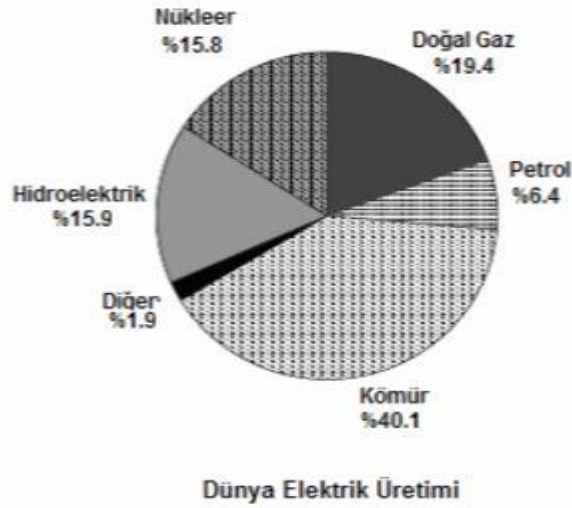
Yapılan hesaplamalara göre, tüketim hızı aynı devam ettiğinde, petrol rezervleri 2050, doğalgaz 2070, kömür ise 2150 yılında büyük bir olasılıkla tükenecektir. Rüzgar enerjisi kullanımının avantajları şunlardır [3]:

- Sera gazı etkisi yaratmaz,
- Temiz bir enerji kaynağıdır,
- Güvenirliği ve ucuzluğu gittikçe artmaktadır,
- Rüzgar türbini kurulan bir arazi ikili kullanım imkanına sahiptir.

Modern enerji sahnesindeki bir diğer aktör nükleer enerjidir. 40 yıl önce var olmayan bir sanayi bugün üretiminin zirvesindedir. Ama aynı zamanda, bu endüstri sönmektedir. Yeni siparişler 20 yıl önce son bulmuştur ve yaşlanan reaktörler ömürlerinin sonuna gelmiş, birer birer kapatılmaktadır. 1970'li yıllarda yüksek fosil yakıt fiyatları ve uygun devlet politikaları sonucunda yenilenebilir enerji kullanımı da artmıştır. Hidroelektrik güç en büyük yenilenebilir enerjidir. Nükleer ve yenilenebilir enerjilerin katkılarına rağmen dünya hala fosil enerji çağında bulunmaktadır. Fosil yakıtlar – kömür, petrol ve doğal gaz – birincil enerji kaynaklarıdır. Elektrik üretiminde kömür egemendir, petrol taşıma yakıtları üzerinde neredeyse tekeldir ve doğal gaz, gelişmekte olan ülkelerde kışın ısıtma için kullanılan en yaygın yakıttır [3].



Şekil 1.1: Dünya Enerji Kaynakları [3].



Şekil 1.2: Dünya Elektrik Üretimi [3].

Rüzgar enerjisinin bu kadar popüler olmasının sebepleri, ucuz, bol ve tükenmez bir enerji kaynağı olmasıdır. 1980’lerde rüzgar enerjisinin kWh maliyeti 38 cent iken günümüzde bu rakam 4 cent civarlarına düşmüştür. Yapılan tahminlerde bu rakam 2020 yılında ise 2.1 cent’e kadar düşmesi tahmin edilmektedir. Enerji yatırımlarında toplam proje maliyeti hesaplanırken toplumsal maliyetlerin göz önüne alınmıyor olması, geçmişin sorunlu teknolojilerinin gelişmekte olan ülkelere taşınmasının temel nedenidir. Her teknoloji yatırımı için toplumsal maliyetler, doğal çevre ve insan sağlığına yapılan tahribatının ekonomik değeri olarak, toplam yatırım

maliyetine eklenmelidir. Örneğin bir kömürlü termik santraldan elektrik üretmenin toplumsal maliyeti ABD doları üzerinden 4 sent /kWh (0.04\$) mertebesindedir [3].

Her enerji projesi için toplam maliyetler beşikten mezara tüm maliyetleri kapsamalıdır. Örneğin, DECON senaryosuna göre, ABD’de son zamanlarda kapatılan Maine Yankee Nükleer Güç Santralının sökülmesinin maliyeti 2 Milyar Dolardır. Aynı santralin 1972 yılındaki yatırım maliyet 231 Milyon Dolardır (Tabiki bugün için aynı Nükleer Güç Santralının kurulum maliyeti göz önüne alınmalıdır.) [3]. Avrupa Birliğine üye ülkeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının faydalarını göz önünde bulundurarak, enterkonnekte şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kaynaklarının önünü açmak için çalışmalar yaptılar. Bu kararın uygulanmasıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının Avrupa Birliği enerji güvenilirliğindeki artışta stratejik rolü olduğu görüldü. Ayrıca yerel ve bölgesel ekonomiye yarar sağladığı görüldü. Yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişimi, çeşitli politikaların ve çalışmaların sonucunda başarılmıştır. Avrupa Birliği’ne üye ülkeler arasında bu politika ve çalışmalarda farklılık olsa da genelde uygulanan politika ve çalışmalar şunlardır:

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının teknolojik gelişimi için yapılan ARGE masraflarına devlet yardımları.

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının yayılmasını kolaylaştırmak için hükümet teşvikleri.

- Kredilerde ve vergilerde indirim.

- Arazi sağlanmasında kolaylıklar.

Uluslararası enerji kurumu (IEA) istatistiğine göre Avrupa’da üç ülke, Almanya, İspanya ve Danimarka öne çıkmaktadır. Avrupa Birliği’nin 2010 yılındaki hedefi 75GW’lık gücün rüzgar yoluyla üretilmesidir. 2020 yılındaki hedefse 175 GW güçtür. Rüzgar türbinleri en az 20 yıl ömür için dizayn edilmiştir. Bazı parçaları (örn: fren aksamı, akü..) her iki üç senede, daha önemli ve pahalı parça olan dişli sistemi ömrünü yarıladağında değiştirilmelidir [3].

1.3 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Durumu

Türkiye’nin hızlı nüfus artışı ve sanayileşmesine paralel olarak enerjiye olan ihtiyacı artmaktadır. Ülkemizde en büyük pay dışa bağımlı olduğumuz fosil yakıtlara aittir. Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları bakımından oldukça iyi durumdadır. Türkiye’nin toplam rüzgar enerjisi potansiyeli 40.000 ile 80.000 MW düzeyindedir. Devlet Meteoroloji İşleri istasyonlarının verilerine göre, Türkiye’nin yıllık ortalama rüzgar hızının on metre yükseklikte 2.54 m/s ve rüzgar gücü yoğunluğunun 24W/m² olduğu belirlenmiştir. Türkiye’nin rüzgar enerjisi potansiyeli bölgelere göre değerlendirildiğinde, Marmara ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinin rüzgar gücü yoğunluğu bakımından diğer bölgelere göre daha zengin olduğu görülmektedir (bkz.Tablo1.3) [3].

Tablo 1.3: Türkiye’de bölgesel rüzgar verileri [3].

Bölge Adı	Ortalama Rüzgar Gücü Yoğunluğu (W/m ²)	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)
Marmara	21.36	3.29
Güneydoğu Anadolu	29.33	2.69
Ege	23.47	2.65
Akdeniz	21.36	2.45
Karadeniz	21.31	2.38
İç Anadolu	20.14	2.46
Doğu Anadolu	13.19	2.12

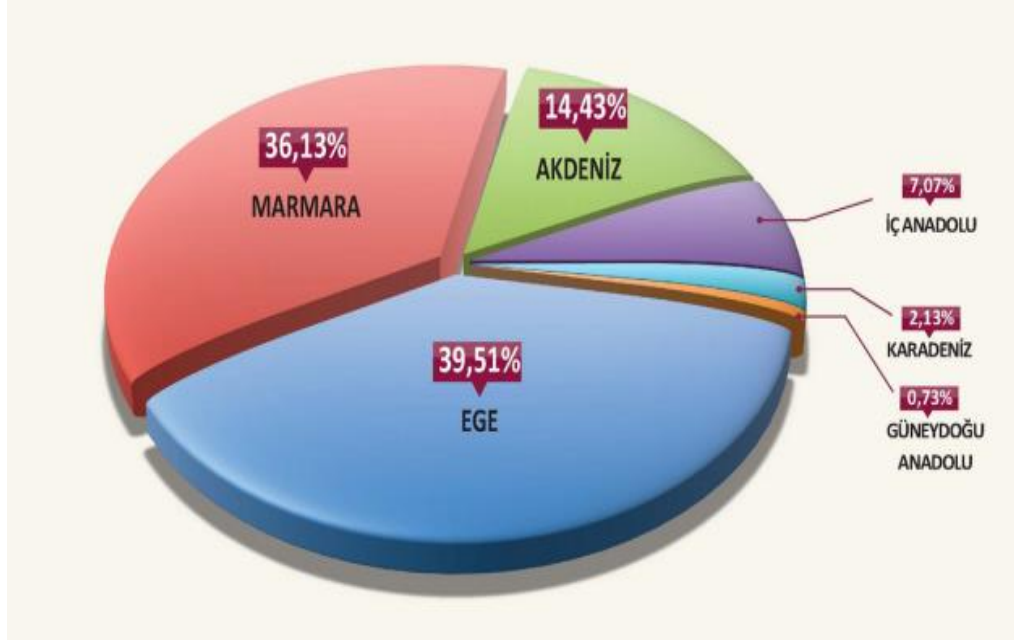
Türkiye fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan sera gazı emisyonlarını sınırlandırmak üzere Birleşmiş Milletler tarafından Cumhurbaşkanımızın katıldığı Rio Zirvesinde imzaya açılan İklim Değişikliği Konvansiyonu Çerçeve Anlaşmasını bu güne kadar imzalamamıştır. Türkiye’nin anlaşmaya taraf olmadığı için aktif olarak katılmadığı Rio, Kyoto, Buenos Aires ve Bonn toplantılarında oluşan kararlar, halen fosil yakıtlara olan bağımlılığımız ile birleşince, Türk ekonomisini olumsuz etkileyecek kısıt ve yaptırımlar ortaya çıkabilecektir. Fosil yakıtların (kömür,

akaryakıt ve doğal gaz) kullanımını içeren herhangi bir enerji yatırımı BM İklim Değişimi Çerçeve Anlaşması taslaklarını bugün için olmasa da gelecek yıllar için göz önünde bulundurulmalıdır [3].

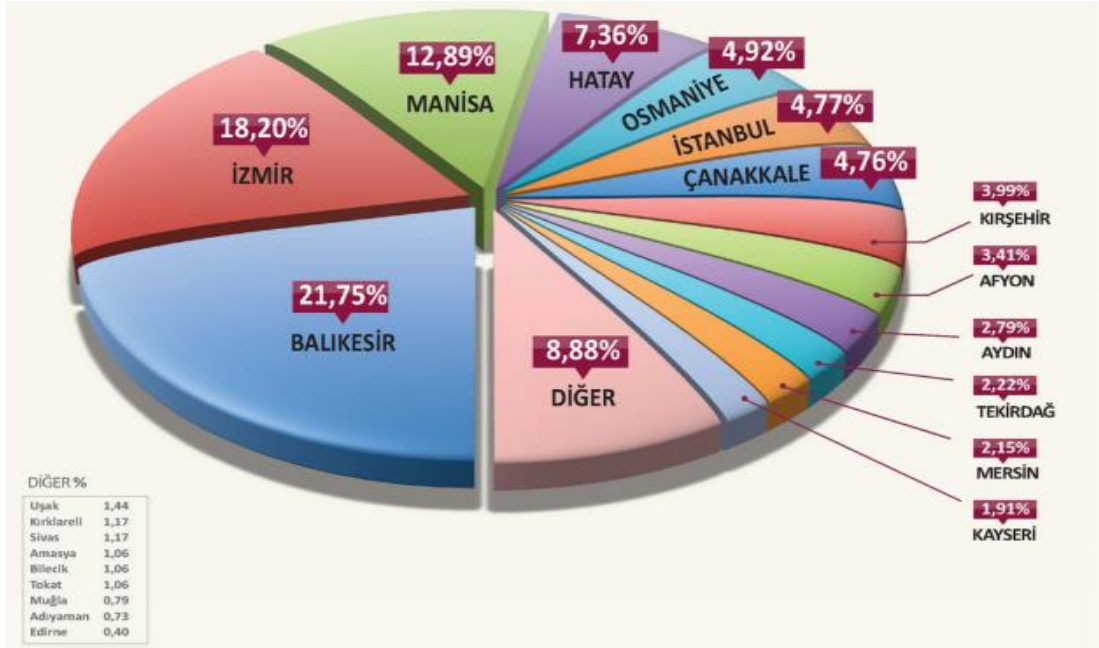
Türkiye’de Marmara, Ege, ve Akdeniz kıyıları, dünyada rüzgar gücü potansiyeli bakımından ilk %30’luk alana girmektedir. Ticari amaçlı ilk rüzgar santrali olan Çeşme’nin Germiyan Köy ‘ünde kurulmuş otoprodüktör statüsündeki 1.5MW kurulu gücündeki santral, yılda yaklaşık 5.000.000kWh enerji üreterek çevre bölgede yaşayan beş bin kişinin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır [3].

Yapılan fizibilite çalışmaları, Türkiye’nin özellikle Marmara ve Ege Bölge’lerinin rüzgar enerji dönüşüm sistemleri için uygun olduğunu göstermiştir. Elektrik sarfiyatının en yüksek olduğu bölgelerin Marmara ve Ege olduğu göz önüne alınırsa buralarda kurulacak olan rüzgar türbinleriyle elektriğin iletimi sırasında ortaya çıkacak kayıplarında azalacağı açıktır [3].

Çeşitli firmalar rüzgar hızının yeterli olduğu yerlerde, enterkonnekte sisteme bağlı rüzgar enerjisi projelerinin ön fizibilite çalışmalarına devam etmektedir. Türkiyede rüzgar enerjisi kurulu gücü 2014 verilerine göre 3.762,10 MW ulaşmış bulunmaktadır. Enerjide dışa bağımlılığı azaltmak amacıyla yerli ve yenilenebilir kaynakların kullanımını arttırmaya çalışan Türkiye, rüzgardan enerji üretimine hız vermektedir [4]. 2015 ocak ayının verilerine göre işletmede olan rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre yüzdesel dağılımı (bkz.Şekil.1.3) verilmiştir ve işletmede olan rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu güç bakımından illere göre yüzdesel dağılımı (bkz.Şekil.1.4) verilmiştir [4].



Şekil 1.3: İşletmede olan rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre yüzdesel dağılımı [4].



Şekil 1.4: İşletmede olan rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu güç bakımından illere göre yüzdesel dağılımı [4].

2. RÜZGAR ENERJİSİ VE KULLANIMI

İnsanlık yel değirmenlerinden, modern rüzgar santrallerine doğru uzanan teknolojik bir süreç yaşamıştır. Elektriğin keşfedilmesinden sonra teknolojik süreçler hızla ilerlemiştir. Elektrik kullanımıyla elektriğin üretildiği kaynaklar da zaman içinde önem kazanmış ve en çok tartışılan enerji konularının başına geçmiştir. Yüzyıllardır insanlığa hizmet eden rüzgar enerjisi, Ortaçağ Avrupası'nın da sembolü haline gelen yel değirmenlerinde kullanılmış; 1890'larda yine Avrupa'da rüzgar türbinlerinde elektrik enerjisine çevrilerek sonraki yıllarda kullanıma sunulmuştur. Binlerce yıldır teknelerin yelkenini şişiren, mısır ve buğday öğütmekte kullanılan rüzgar enerjisi, artık ortak enerji üretimi için esmektedir. 1970'lerdeki petrol kriziyle başlayan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim, günümüzde rüzgar enerjisi alanında büyük isimler haline gelen Danimarka, Almanya ve İspanya başta olmak üzere Avrupa ve Amerika'da dev bir enerji sektörüne dönüşümle sonuçlanmıştır. CO2 emisyon oranı hemen hemen sıfır olduğu için küresel ısınmayı engellemeye yardımcı olan rüzgar enerjisi, bugün en hızlı büyüyen ve en ekonomik alternatif enerji kaynağı olarak konvansiyonel enerji kaynaklarıyla yarışabilir durumdadır [5].

Elektrik üretilirken çevreye verilen zararlar, dünyadaki küresel ısınmanın ve iklim değişikliklerinin en büyük nedenlerinden biri olmuştur. Bunu önlemede, fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ilk çözüm olarak düşünülmektedir. Bu kaynaklardan rüzgar enerjisi dünyada en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Teknolojisinin gelişmesi, diğer kaynaklara göre kurulmasının kolay olması, maliyeti daha az olması, kurulan arazide daha az yer işgal etmesi gibi avantajları, rüzgar enerjisine talebi artırmıştır. Rüzgar gücü, güneş enerjisinin dolaylı bir şeklidir. Bu güç, yeryüzünün her bölgesinin eşit şekilde ısınması ve buna bağlı olarak oluşan alçak ve yüksek basınç merkezlerinin karşılıklı etkileşim sürecinin eseridir. İlk olarak 1891 yılında Danimarkalı mühendis Paul la Cour'un inşa ettiği rüzgar enerjisinden elektrik üreten rüzgar türbinin keşfi ile rüzgardan elektrik üretimi başlamıştır. Rüzgarın kinetik enerjisinden rüzgar türbini aracılığıyla elektrik enerjisi elde edilmektedir [5].



Şekil 2.1: Dünyanın ilk otomatik çalışan elektrik üreten rüzgar türbini [5].

2.1 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminin Tarihi

Dünyada rüzgar enerjisinden elektrik üreten ilk türbin, 1891’de modern aerodinamiğin önemli mühendisi olan Paul la Cour tarafından Danimarka’da inşa edilmiştir. Doğru akım elde eden Paul La Cour, elektroliz yoluyla hidrojen gazı elde etti ve bu şekilde rüzgar enerjisini depolamış oldu. Daha sonra Paul la Cour 1891-1918 yılları arasında 100’den fazla 20-35 kW güç aralığında türbinler tasarlamıştır. Tasarımlarında Danimarka yel değirmenlerini esas almıştır [6].



Şekil 2.2: Paul la Cour test rüzgar türbini, Danimarka, 1897 [5].

1918 yılı sonrasında büyük şehirler elektriğe kavuşmuş ve dizel yakıtların ucuzluğu nedeniyle rüzgar enerjisini değerlendirme çabaları, bir kenara bırakılmıştır. Rüzgar enerjisinin bu bir kenara itilmişliği, enerji sıkıntısı nedeniyle 2.Dünya Savaşı’na kadar sürmüştür. Endüstri devrimi gerçekleşince, elektrik üretmek için

daha büyük rüzgar türbinleri gerekmiştir. Paul la Cour 'un ilk rüzgar türbininden sonra 1930'ların sonlarında ABD'li mühendisler son teknolojileri ile megawatt boyutunda rüzgar türbini üretmeyi planlamışlardır. Bu çalışmanın sonucunda 1941 yılında 1.25 MW kapasiteli Smith-Putnam rüzgar türbini ortaya çıkmıştır (bkz. Şekil 2.3). O yıldan sonraki 40 yıl boyunca bu türbin dünyanın en büyük rüzgar türbini özelliğini korumuştur [5].



Şekil 2.3: 1.250 MW kapasiteli Smith-Putnam rüzgar türbini [5].

1970'li yıllardaki petrol krizi nedeniyle rüzgar enerjisine ve bu alanda yatırımlar artmıştır. 1980 sonrasındaki gelişmelerle, Avrupa ve ABD'de rüzgar santralleri ekonomi, çevre ve enerji açısından çağdaş mühendislik ürünleri haline gelmiştir. Rüzgar türbinlerinde seri üretimine geçilmesi ile bu alandaki yatırımlar ve türbin teknolojisindeki gelişmeler gün geçtikçe artmış ve rüzgar santralleri kurulmuştur. 1980'li yıllardaki gelişmeler sonucunda seri olarak üretilen ve yaygın olarak kullanılan rüzgar türbini nominal güçleri 600 kW, 750 kW, 1000 kW, 1500 kW ve 2000 kW'tır. Önceleri kara parçaları üzerinde kurulan rüzgar santralleri, daha sonra denizlerin üzerine de (Offshore) kurulmuştur [6].

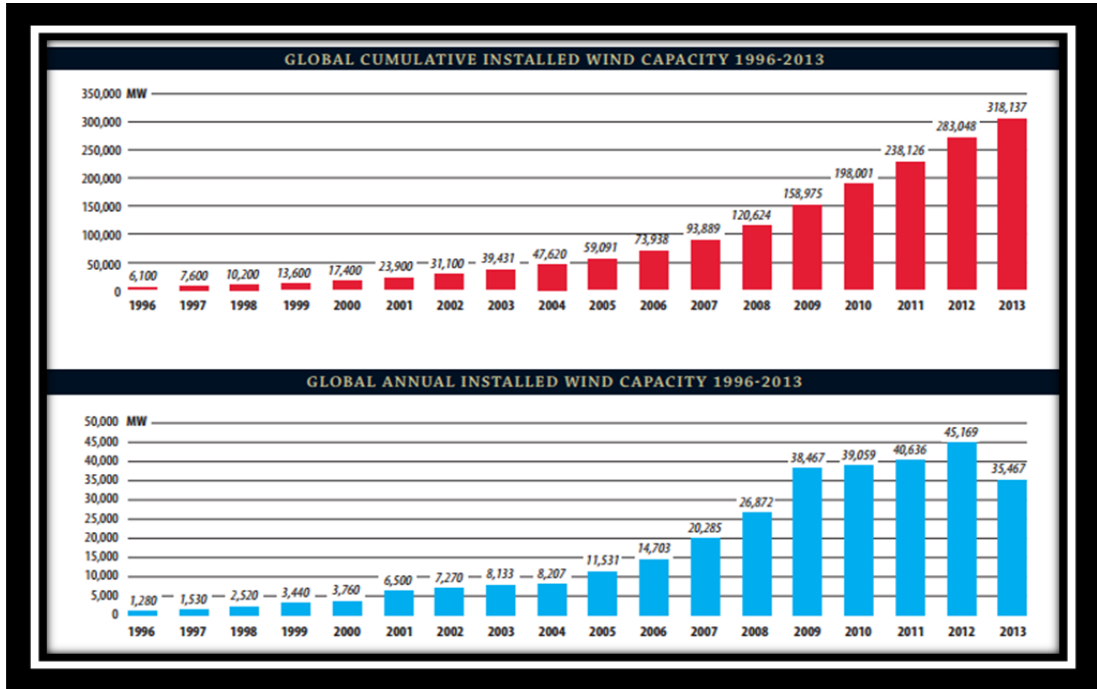
Tablo 2.1: Rüzgar türbinlerinin tarihsel gelişiminin yıllara göre sıralanması [5].

Türbin Tipi ve Ülkesi	Çap (m)	Süpürdüğü Alan (m ²)	Güç (kW)	Spesifik Güç (kW/m ²)	Kanat Sayısı	Kule Yüksekliği (m)	Hizmete Giriş Yılı
Poul LaCour <i>Danimarka</i>	23	408	18	0.04	4	-	1891
Smith-Putnam <i>ABD</i>	53	2231	1250	0.56	2	34	1941
FL Smidth <i>Danimarka</i>	17	237	50	0.21	3	24	1941
FL Smidth <i>Danimarka</i>	24	456	70	0.15	3	24	1942
Gedser <i>Danimarka</i>	24	452	200	0.44	3	25	1957
Hutter <i>Almanya</i>	34	908	100	0.11	2	22	1958

2.2 Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Kullanımı

Çevresel avantajları ve enerji ekonomisi açısından pek çok ülke, resmi teşviklerle rüzgar enerjisini desteklemektedirler. Bu teşviklerdeki amaç, resmi teşviklerle günümüzdeki fosil yakıtların sahip olduğu üstünlüğü ve çevre sorunlarının elektrik üretimi ile ilgili sebeplerini ortadan kaldırmaktır. Dünyada rüzgar santrallerinin kurulu gücü hızlı bir artış göstermektedir. Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği raporuna göre (World Wind Energy Report 2009), 1997 yılında 7600 megawatt (MW) olan kurulu güç, sonraki yıllarda hızla artış göstererek 2009 yılı haziran ayı itibariyle dünyadaki toplam rüzgar santralleri kurulu gücü 159 000 MW olmuştur [5].

2013 yılı toplam kurulu rüzgar gücü, yılda 318137 MW gücünde res bulunmaktadır. Şekil 2.4'de yıllara göre rüzgar santralleri kurulu güçleri gösterilmiştir [6].



Şekil 2.4: Yıllara göre dünya rüzgar enerjisi santralleri kurulu güçleri [6].

2.3 Rüzgar Enerjisi Dönüşümü ve Rüzgar Türbinleri

Günümüzün rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri, elektrik şebekesine bağlı, bir veya birden fazla türbin içeren rüzgar çiftlikleri biçimindedir. Ayrıca şebekeden bağımsız ev tipi sistemler mevcuttur. Rüzgar santralının ana yapı elemanı aerogeneratör de denilen rüzgar türbinidir. Rüzgarın kinetik enerjisi, rüzgar türbinleri vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür [5].

2.3.1 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılabilirler. En önemli ve piyasada en çok kullanılan sınıflandırma kriteri eksenlerine göre dir. Rüzgar türbinleri eksenlerine göre yatay eksenli ve düşey eksenli türbinler olmak üzere iki çeşittir. Tablo 2.2’de rüzgar türbinlerinin güçlerine göre sınıflandırılması görülmektedir. İlk üretilen rüzgar türbini 12 kW kapasiteliydi. Günümüzde 10 MW kapasiteye kadar rüzgar türbinleri üretilmektedir [5].

Tablo 2.2 Rüzgar türbinlerinin güçlerine göre sınıflandırılması [8].

Ölçek	Rotor Çapı (m)	Nominal Güç (kW)
Mikro	3m’den küçük	0.05 – 2 kW
Küçük	3m – 12m	2 – 100 kW
Orta	12m – 45m	40 – 1000 kW
Büyük	45m’den büyük	1000 kW’den büyük

Dönme eksenlerine göre yatay eksenli ve düşey eksenli rüzgar türbinlerinin kendi içlerinde çeşitleri vardır. Fakat her iki tip türbin de aynı aerodinamik prensiplerle çalışırlar [8].

3. TÜRİN ÇEŞİTLERİ

Rüzgar türbinleri dönme eksenine göre yatay eksenli ve düşey eksenli olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar [7].

3.1 Düşey eksenli rüzgar türbinleri

Adından da anlaşılacağı gibi, türbin mili düşey ve rüzgarın geliş yönüne diktir. Savonius tipi, Darrieus tipi gibi çeşitleri vardır. Daha çok deney amaçlı üretilmişlerdir. Ticari kullanımları çok azdır. Darrieus tipi düşey eksenli rüzgar türbininde, düşey şekilde yerleştirilmiş iki tane kanat vardır (bkz. Şekil 3.1). Kanatlar, yaklaşık olarak türbin mili uzun eksenli olan bir elips oluşturacak biçimde yerleştirilmişlerdir. Kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşur. Yapısı gereği Darrieus tipi rüzgar türbinlerinde, devir başına iki kere en yüksek tork elde edilir. Rüzgarın tek yönden estiği düşünülürse; türbinin verdiği güç, sinüs şeklinde bir eğri oluşturur. Dikey eksenli rüzgar türbinleri her istikametlidirler ve değişen rüzgar yönlerinde dönerler. Böylece rüzgarı her bir yönden kabul ederler. Dönüşün dikey eksenli, sürücünün toprak seviyesine dahi yerleştirilmesine izin vermektedir. Bu tipteki rüzgar türbinlerinin güç katsayısı 0,15'ten azdır. Bu nedenle güç üretiminde tercih edilmezler [7].

Bu türbinlerin avantajları şöyle sıralanabilir:

- Jeneratör ve dişli kutusu yere yerleştirildiği için, türbini kule üzerine yerleştirmek gerekmez. Böylece kule masrafı olmaz.

-Türbini rüzgar yönüne çevirmeye gerek yoktur. Yani dümen sistemine ihtiyaç yoktur.

- Türbin mili hariç diğer parçaların bakım ve onarımı kolaydır.

-Elde edilen güç toprak seviyesinde çıktığından, nakledilmesi daha kolaydır.

Kötü yönleri ise şöyledir:

-Yere yakın oldukları için alt noktalardaki rüzgar hızları düşüktür.

-Verimi düşüktür.

-Çalışmaya başlaması için bir motor tarafından ilk hareketin verilmesi gerekir.

-İlk hareket motoruna ihtiyacı vardır.

-Ayakta durabilmesi için tellerle yere sabitlenmesi gerekir. Bu da pek pratik değildir.

-Türbin mili yataklarının değişmesi gerektiğinde, makinenin tamamının yereyatırılması gerekir [7].



Şekil 3.1: Dikey eksenli bir rüzgar türbini [7].

3.2 Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Bu tip türbinlerde dönme eksenini rüzgar yönüne paraleldir. Kanatları ise rüzgar yönüyle dik açı yaparlar. Ticari türbinler genellikle yatay eksenlidir. Rotor, rüzgarı en iyi alacak şekilde, döner bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Yatay eksenli türbinlerin çoğu, rüzgarı önden alacak şekilde tasarlanırlar. Rüzgarı arkadan alan rüzgar türbinlerinin ise, yaygın bir kullanım yeri yoktur. Rüzgarı önden alan türbinlerin iyi tarafı, kulenin oluşturduğu rüzgar gölgelenmesinden etkilenmemesidir. Kötü tarafı ise, türbinin sürekli rüzgara bakması için dümen sisteminin yapılmasıdır [7].

Rüzgarı arkadan alan türbinlerde ise; eğer rotor ve gövde uygun şekilde tasarlanmışsa, dümen sistemine gerek yoktur. Bu nedenle daha hafiftirler. Fakat

büyük çaplı türbinlerde rüzgarın arkadan gelmesi tercih edilmez. Bunun nedeni ise; serbestçe dönmeye bırakılan türbinin elektrik enerjisini taşıyan kabloları burmasıdır. 1000 amper gibi yüksek akımlarla çalışan bu sistemde, akımın mekanik sistemlerle de toplanması sağlıklı değildir. Fakat küçük çaplı türbinlerde kolaylıkla uygulanabilirler [7].

Yatay eksenli türbinlerin bir başka sınıflandırması ise, dönme hızlarına göre. Yavaş hızlarda çalışan rüzgar türbinleri ve yüksek hızlarda çalışan rüzgar türbinleri adı altında iki gruba ayrılırlar. Ayrıca rüzgarı alış yönüne göre, önden rüzgarlı ve arkadan rüzgarlı türbinler olarak ta iki gruba ayrılır[7].

3.3 Yavaş hızlarda çalışan rüzgar türbinleri

İlk olarak 1870'li yıllarda ABD'de çok kanatlı düşük hızlarda çalışan türbinler üretilmeye başlandı. Günümüzde 12 ile 24 adet arasında değişen kanatlar, rotorun ya tüm yüzeyini, ya da hemen hemen tüm yüzeyini kaplar. Yerleştirilen kuyruk kanadı dümen işlevini görür. Genellikle bu tip rüzgar türbinlerinin çapı 5 ile 8 m arasında değişir. Bu tipin en büyük örneği ABD'de inşa edilmiş olup, çapı 15 m'dir. Yavaş çalışan rüzgar türbinleri 2-3 m/s arası rüzgar hızlarında kendiliğinden çalışmaya başlarlar. Bu türbinlerin özellikleri aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir [7].

- Genellikle hızları 3-7 m/s arasında değişen rüzgarlarda kullanılırlar.
- Elektrik üretimi için verimleri düşüktür.
- Çap büyüdükçe ağırlık artacağından, bu türbinleri kurmak kolay değildir.
- Bu tipteki türbinler, daha çok su pompalama işi için idealdirler. Genellikle pistonlu pompalarda kullanılırlar [7].

3.4 Yüksek hızlarda çalışan rüzgar türbinleri

Yüksek hızlarda çalışan bu tip rüzgar türbinlerinde kanat sayısı 1 ile 4 adet arasındadır. Düşük hızlarda çalışan çok kanatlı rüzgar türbinlerinden çok daha fazla hafiftirler. En çok kullanılan üç kanatlı rüzgar türbini Şekil 3.2’de gösterilmiştir. İki kanatlı türbinler, üç kanatlılara göre %2-3 daha az verimlidir. Tek kanatlı türbinler ise, iki kanatlı türbinlerden %6 daha az verimlidirler. Ayrıca tek kanatlı türbinlerde dengeleyici olarak karşı ağırlık kullanılır. Yüksek rüzgar hızlarında çalışan bu tip türbinlerde kanat sayısı arttıkça verim artar. Ancak 3 kanattan daha fazla sayıda kanat, maliyeti önemli ölçüde arttıracığından tercih edilmez. Bir ve iki kanatlı türbinler daha hızlı döndüklerinden, üç kanatlı türbinlere göre daha fazla gürültü yaparlar. Bütün bunların yanında, üç kanatlı türbinlerin estetik görünüşleri de bu tip türbinlerin daha çok tercih edilmesinde önemli bir etkidir. Söz konusu türbinlerin yavaş hızlarda çalışan rüzgar türbinlerine göre avantajları şunlardır [7];

-Düşük kanat sayısı; bu tipteki türbinlerin fiyatını ve ağırlığını önemli ölçüde azaltır.

-Ani rüzgar patlamalarından kaynaklanan basınç değişimlerinden az etkilenirler.

- Çok yüksek hızlarda çalışan kanat koruyucu sistemleri, bu tip türbinlerde daha ucuzdur.

-Yüksek verimleri nedeniyle günümüzde elektrik üretimi amaçlı kullanılan rüzgar türbinlerinin büyük çoğunluğu bu tip türbinlerdir [7].



Şekil 3.2:Elektrik üreten yatay eksenli 3 kanatlı bir rüzgar turbine [7].

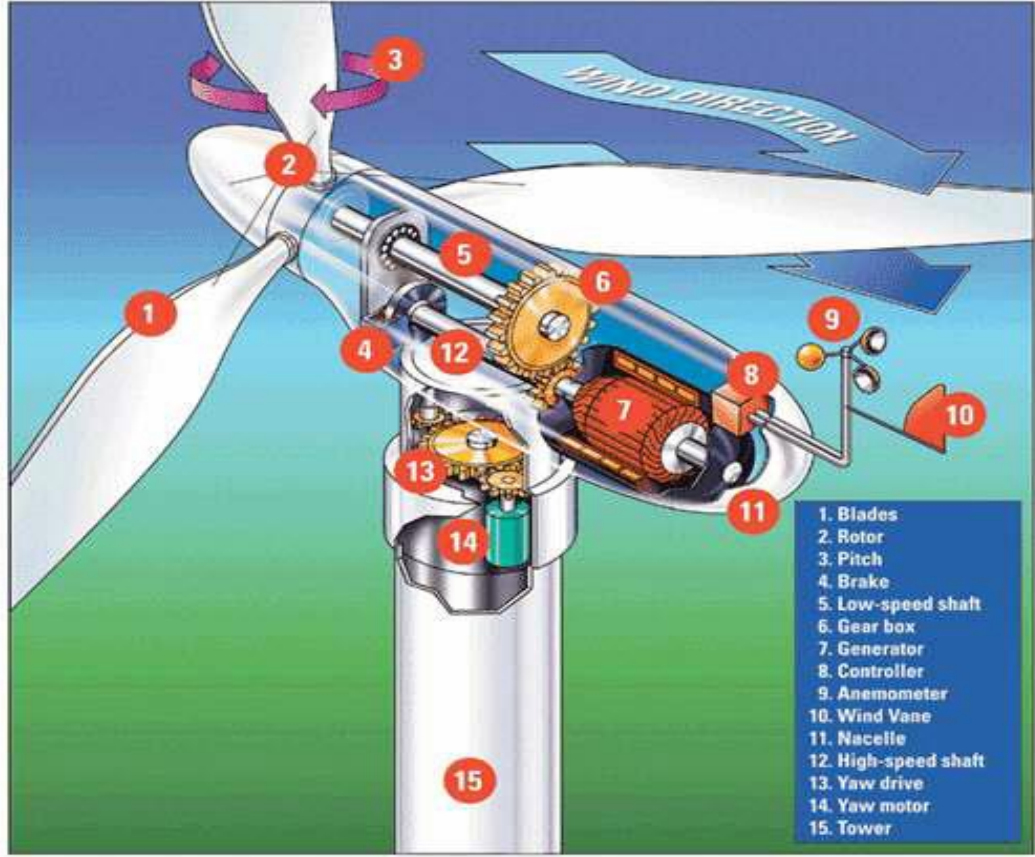
3.5 Önden rüzgarlı türbinler

Yatay eksenli türbinlerde rotor yüzü rüzgara yönlenmiş ise önden rüzgarlı türbinler adını alırlar. Bu türbinlerin en önemli üstünlüğü kulenin yapacağı gölgeleme etkisine maruz kalmamasıdır. Yıllardır yaygın olarak bu makineler kullanılmıştır. Öte yandan yine de kulenin önünde, az da olsa, bir rüzgar gölgelemesi vardır. Yani rüzgar kuleye eğilerek gelir. Kule yuvarlak ve düz olsa bile, kanatın kule hizasından her geçişinde türbinin ürettiği güç biraz azalır. İste bu nedenle rüzgar çekilmesinden dolayı kanatların çok sert yapılması ve kuleden biraz uzakta yerleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca önden rüzgarlı makineler, rotoru rüzgara karşı döndürmek için yaw mekanizması ile donatılmışlardır [7].

3.6 Arkadan rüzgarlı türbinler

Arkadan rüzgarlı türbinlerin rotorları kule arkasındadır. Bunların önemli üstünlüğü yaw mekanizmasına gerek olmayışıdır. Eğer nacelle ve rotor uygun tasarlanırsa nacelle rüzgarı pasif olarak izler. Bu rüzgar türbinlerinde bu kesin bir üstünlük değildir. Rotor pasif olarak belirli bir periyotta her yöne dönebildiği için, bu tip türbinlerin üreteçlerinden inen kabloların dolanabilmesi söz konusudur. İste “yaw” bu sorunu ortadan kaldırır. Daha önemli üstünlük kanatların esnek özelliğe sahip yapılmasıdır. Bu hem ağırlık hem de makinenin güç dinamiği açısından önemli bir üstünlük sağlar. Böylece kule yükü azalmış olur. Arkadan rüzgarlı türbinlerin temel üstünlüğü böylece önden rüzgarlı türbinlere göre daha hafif yapılması şeklinde ortaya çıkar. Ancak, kanat kule hizasından geçerken meydana gelen güç dalgalanması, türbine önden rüzgarlı makinelerden daha çok zarar verebilir [7].

4. RÜZGAR TÜRBİNİ BİLEŞENLERİ



Şekil 4.1: Rüzgar türbini bileşenleri [1].

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi türbin şu parçalardan oluşmaktadır.

1. Kanatlar
2. Rotor
3. Kanat döndürme mekanizması
4. Fren
5. Düşük hızlı shaft
6. Dişli kutusu
7. Jeneratör
8. Kontrol kutusu
9. Anemometre
10. Rüzgar gülü
11. Türbin kafa kısmı

12. Yüksek hız shaftı
13. Rota mekanizması
14. Rota motoru
15. Kule

Şimdi bu parçaları inceleyelim [1].

4.1 Kanatlar ve Rotor

Kanatlar rüzgârı yakalar ve onun gücünü rotora aktarır. Rotor, gücü shaft vasıtasıyla dişli kutusuna, oradan da jeneratöre gönderen en dış birimdir. 600 KW'lık modern bir rüzgâr türbininde her bir kanat 20 m (66 ft) uzunluğundadır ve bir uçak kanadının oldukça benzeri olarak dizayn edilmektedir. Rüzgârın içerisinde barındırdığı kinetik enerji rüzgâr türbinleri yardımıyla yararlı enerjiye çevrilmektedir. Bir rüzgâr türbininden maksimum enerji üretimini sağlayabilmek çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar rüzgâr türbininin yüksekliği, rüzgâr türbin kanadının süpürme alanı ve aerodinamik yapısı, hava yoğunluğu ve rüzgâr hızı gibi faktörlerdir. Bu faktörlerin en önemlilerinden biri de rüzgâr türbin kanadının aerodinamik yapısıdır. Rüzgar türbin kanadının aerodinamik yapısının önemi rüzgârın barındırdığı kinetik enerjinin maksimum %59'unun yararlı enerjiye dönüştürülebilir olmasından kaynaklanmaktadır [1]

Kanat tasarımı, rüzgâr türbininde çok önem arz etmektedir. Bu yüzden kanat tasarımı konusunda uzun süre çalışmalar yapılmıştır ve çeşitli kanat profilleri geliştirilmiştir. Türbinlerin verimlerinin artırılması için geliştirilen bu kanat profillerine üzerinde yoğun olarak teorik çalışmalar yapılan NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) profilleri örnek olarak gösterilebilir. Bir yörede rüzgâr türbini kurulacağı zaman, yörenin spesifik özelliklerine bakılarak bu kanat profillerinden uygun olan seçilmelidir. Seçilen kanadın önemli olduğu kadar, bu kanadın rotora bağlanma açısı da çok önemlidir. Büyük ölçekli türbinlerde kanatlar istenildiği gibi, verim optimum olacak şekilde ayarlanabilmektedir ancak küçük türbinlerde kanadın bağlama açısı uygun seçilmelidir [1].

Yapılan bir çalışmada NACA 4415 profili için uygun kanat açıları ve burulma açıları hesaplanmıştır. Rüzgar santrali amaçlı türbinlerden farklı olarak

türbin kanat açılarının türbinin çalışması esnasında sürekli sabit olduğu göz önünde tutulmuştur. Rüzgar türbin kanatlarının burulma ve kanat açılarını ve kanat sayılarını ortaya koymak en verimli kanat formunun secimi açısından son derece önemlidir. Materyal olarak "balsa" kullanılarak NACA 4415 profilli 4 adet kanat yapılmıştır. Kanatlar için profil genişlikleri (chord) hesaplanmış ve uç profil genişliği 1,5 cm olarak bulunmuştur. Kök profil genişliği ise 3 cm olarak belirlenmiştir. 2, 3 ve 4 kanatlı olarak test edilmesi planlanan rotorların çapı ise 30 cm dir. Kanatlar 10 ve 20 derece burulma açısında yapılmıştır. Kanat açısı olarak, 10 derece burulma açısındaki kanatlarda 8-10-15 derece, 20 derece burulma acısındaki kanatlarda 10-15-18 derece seçilmiştir. Test sonuçlarına göre NACA 4415 profili kullanılarak işletme bazlı bir rüzgâr türbini kurulması halinde kullanılacak rotorda verim açısından performansı en yüksek 10 derece burulma acılı ve 10 derece kanat açılı 2 kanatlı türbin uygun bulunmuştur [1].

Kanat malzemesi olarak genellikle (GRP-Glass Reinforced Plastic), ağaç, haddelenmiş ağaç, karbon fiberiyle kuvvetlendirilmiş plastik (CFRP-Carbon Fibre Reinforced Plastic), çelik ve alüminyum kullanılmaktadır. (Walker ve Jenkins, 1997). Ağaçtan yapılan kanatçıklar çok iyi yorulma dayanımı vermektedir. Büyük türbinlerde kanatlar CFRP'den imal edilmektedir ancak maliyet fazladır. Çelik malzemede ise yorulma dayanımı düşüktür. Tokluk yüksektir ve ağırlık önemli bir sorun teşkil etmektedir. Günümüzde büyük türbinlerde GRP kullanılmaktadır. Geleneksel sistemlerde, türbin rotorundaki dairesel hareket, aktarma elemanları yardımıyla jeneratör ile bağlantılı duruma getirilmektedir. Dişli kutusu, 30-60 d/dk. düşük devir sayısını, jeneratörün ihtiyaç duyduğu 1500 d/dk. mertebelerine yükseltir. Dişli sistemi, kavrama sistemine göre avantajlı sayılsa da direk sistemle karşılaştırıldığında daha karmaşık olduğu görülmektedir. Soğutma ve yağlama sistemleri gerektirmektedir [1].

Şekil 4.3'de görülen Direct Drive Sistemi, modern rüzgâr türbinlerinde kullanılmaktadır. Bu sistem daha az dönel parça içerdiğinden mekanik gerilmelerde azalma sağlandığı gibi ekipmanların teknik ömrü de daha uzun olmaktadır. Ayrıca bakım ve servis maliyeti azalmakta, işletme maliyeti azaltılmaktadır. Bu sistemde rotor göbeği ve jeneratör direk bağlanmakta, arada karmaşık dişli mekanizmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Rotor ünitesi sabit mile takılır. Geleneksel türbinlerle

karşılaştırılma yapıldığında, dişli sistemlerde gerek duyulan bir çok yataklama noktasına karşın, direk sistemde iki adet, yavaşça dönen rulmanlı yatak bulunmaktadır. Bunun nedeni, direk sistemde düşük hıza gereksinim duyulmasıdır. Direk sistemde en önemli parça dairesel jeneratör kısmıdır. Rotor göbeğiyle kombine çalışması, sürtünme kayıplarını en aza indirmekte, kesintisiz bir enerji akımı oluşturmaktadır [1].



Şekil 4.2: Modern bir rotor göbeğinin iç yapısı [1].



Şekil 4.3: Direct drive sistemi [1].



Şekil 4.4: Direct Drive sistemli Enercon jeneratör [1].

4.2 Kanat Döndürme Mekanizması (Pitch)

Pitch kontrollü türbinlerde kanatlar, göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmiş değildirler. Kanat, pitch kontrol mekanizması sayesinde rüzgâr hızına göre eksenini etrafında döndürülebilmektedir. Bu türbinler, nominal hız üzerinde sabit güç üretimi sayesinde daha kaliteli bir güç çıkışı sağlamaktadırlar. Bu sistem ile bütün hızlarda kullanılarak elde edilen enerjinin artırılması sağlanabilir ya da sistemde aşınmayı azaltmak için sadece nominal hızın üzerinde güç kontrolü için kullanılabilir. Pitch kontrollü türbinlerden elde edilecek performans artışı temel olarak kullanılan pitch mekanizmalarının hızına ve hassasiyetine bağlıdır. Bu makineler sahip oldukları pitch sistemleri sebebiyle yüksek hızlarda yapısal sorunlara gebedirler. Ancak gelişen teknolojiyle bu sorunlar en aza indirilmektedir [1].

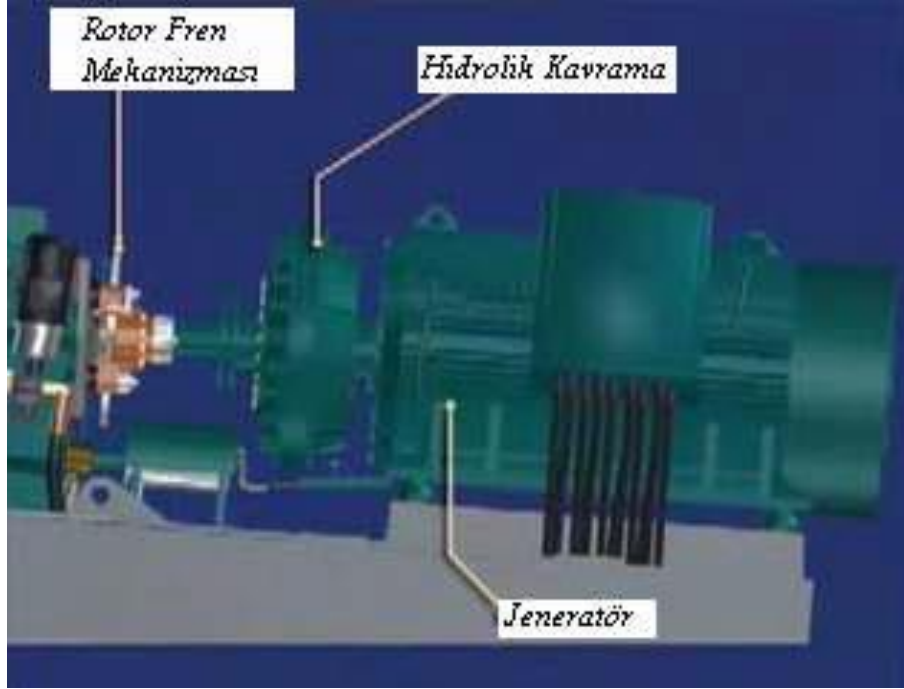


Şekil 4.5: Pitch mekanizması [1].

4.3 Fren

Rüzgârdan elde edilen enerji, rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılıdır. Dolayısı ile yüksek rüzgâr hızlarında meydana gelebilecek kuvvetler tahmin edilebilir. Bu kuvvetleri kontrol altına alabilmek için fren sistemi kullanılmaktadır. Özellikle fırtınalı havalarda rüzgâra karşı küçük bir yüzey çıkarmak, hatta tesisten yararlanılmayacaksa tamamen durdurmak gerekir. Bu sonuçları elde etmek amacıyla çeşitli sistemler uygulanmaktadır. Bunlardan birisi de mekanik fren düzenidir.

Mekanik fren, dişli kutusuna yerleştirilen bir diskten oluşmaktadır. Fren diski çelikten yapılır ve mil üzerine sabitlenir. Olabilecek arızalara karşı frenleme sistemini korumak için hidrolik yağ basıncı gerekmektedir. Hidrolik sistem türbinin aerodinamik frenlerini ayarlamak için kullanılır. Yağ basıncı olmadığında, fren blokları fren diskini sıkıştıracaktır. Frenleme, fren bloğu ile disk arasındaki sürtünmenin bir sonucudur [1].



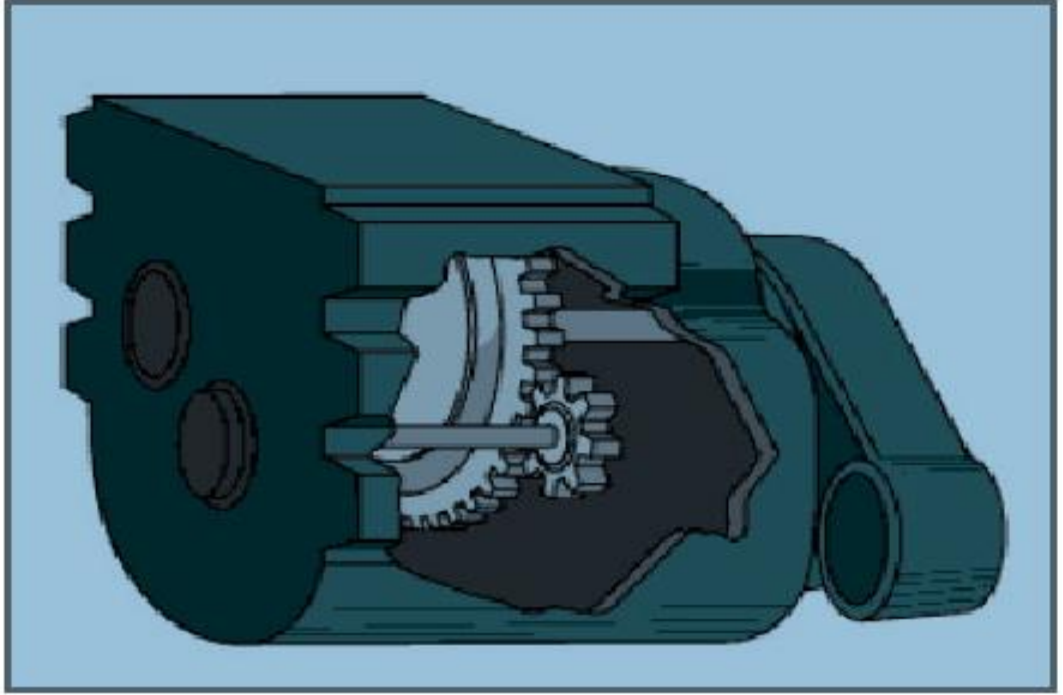
şekil 4.6: Fren mekanizması [1].

4.4 Düşük Hızlı şaft

Rüzgar türbinini, rotor bağlantı noktası yüksekliğinden dişli kutusuna bağlar. 600 KW' lık modern bir rüzgar türbin rotoru 19-30 dönüş /dakika (RPM) kadar nispeten yavaş döner. şaft, aerodinamik frenleri işletebilecek hidrolik sistemleri borulara bağlar [1].

4.5 Dişli Kutusu

Solunda düşük hızlı şaft vardır. Düşük hızlı şafttan yaklaşık olarak 50 kat daha hızlı dönen yüksek hızlı şaft ise sağındadır. Rüzgar türbini rotorunun (pervanesinin) dönmesiyle elde edilen güç, ana şaft, dişli kutusu ve yüksek hız şaftından oluşan güç ünitesiyle jeneratöre aktarılır. Rüzgar türbini rotorundan elde edilen yavaş dönme hızı ve yüksek tork, dişli kutusuyla jeneratör için kullanılan yüksek hız, düşük tork gücüne dönüştürülür. Genellikle rotorun dönüşüyle jeneratör arasında, tek bir dişli oranı vardır [1].



Şekil 4.7: Dişli kutusunun kesit görünüşü [1].

4.6 Jeneratör

Rüzgar türbinlerinde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için gerekli olan parçadır. Senkron ve asenkron olmak üzere iki türü kullanılır. Senkron jeneratörler şebeke frekansında çalışırlar. Şebekeden reaktif güç çekmezler. Fakat pahalıdırlar. Çalışmaya başlamaları için şebekeye bağlı olmaları gerekir. Asenkron jeneratörler basit ve ucuzdurlar [3]. Şebeke frekansından biraz yüksek frekansta çalışırlar. Ancak şebekeden reaktif güç çekerler. Rüzgar türbinleri ya senkron veya

asen kron jeneratörler çalışabilecek şekilde dizayn edilirler. Bu yapılırken jeneratör şebekeye direk veya endirekt olarak bağlanabilir. Direk bağlanması demek; Jeneratör elektrik şebekesine arada hiçbir aracı olmadan bağlanır. Endirekt bağlanması demek ise; Türbinden akımın şebekeye uyarlayacak olan elektrik cihazları boyunca akıp şebekeye ulaşmasıdır. Aşağıda belirtilen üç tip jeneratör rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [3].

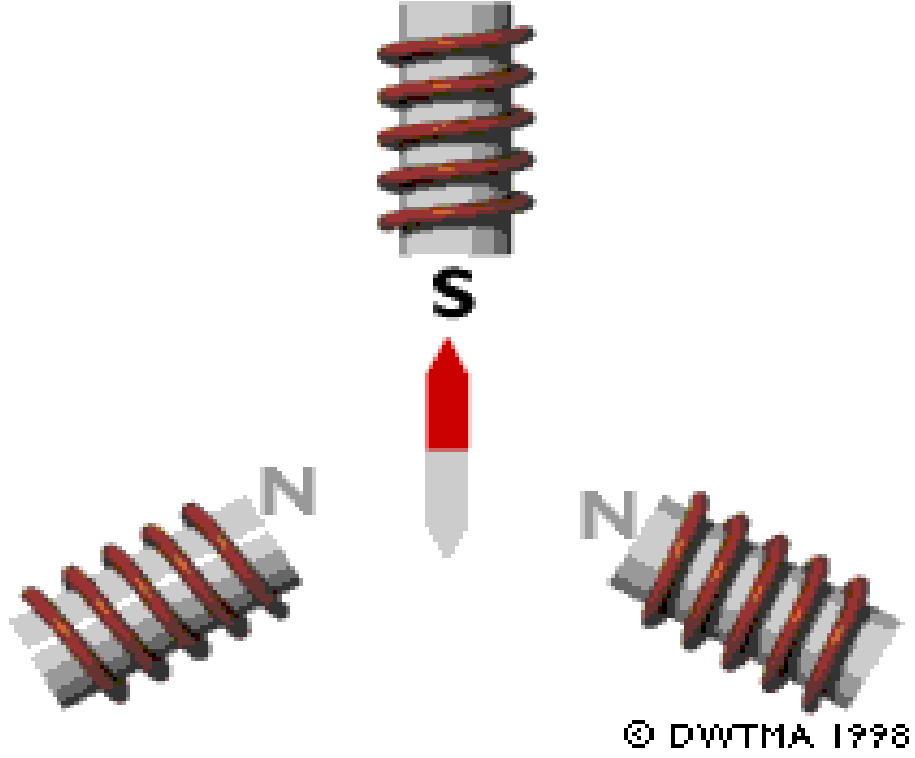
Bunlar;

- Doğru Akım Jeneratörleri
- Senkron Jeneratörleri
- Asenkron Jeneratörler

Küçük güç sistemlerinde eskiden daha fazla kullanılan doğru akım jeneratörleri şimdi senkron veya asenkron jeneratörlerle değiştirilmektedirler Bu jeneratörler, çok pahalı olmayan doğrultmaçlar yardımıyla kolayca doğru akıma dönüştürülebilen alternatif akım üretirler. Günümüzde kullanılan doğru akım makineleri ise kalıcı magnetler içerirler. Rotor kalıcı magnetik kutuplar içerir ve stator de alternatif akım üretir Alternatif akım daha sonra doğrultucular yardımıyla doğrultulur. Bu tip makineler komütatör ve fırçalar kullanmazlar böylece makinaların güvenilirliği arttırılmış olur. Kalıcı magnetli DC makineler küçük türbinlerle kullanılırlar. Bunun sebebi magnet kapasitesindeki sınırlamalardır. Fırçasız DC makinalarının 100 kW altında anma gücünde üretilebildiği bilinmelidir [3].

4.6.1 Senkron Jeneratörler

Dünya üzerinde tüketilen elektrik enerjisinin büyük çoğunluğu senkron jeneratörler yardımıyla üretilir. Bunlara senkron jeneratör denmesinin sebebi ortadaki magnetin Şekil 4.8’de magnetik alanın dönüşü ile senkronize olup sabit hızla dönmesidir [3]



Şekil 4.8: Senkron jeneratör [3].

Bu tip makineler sabit frekansa bağlı olarak sabit hızda çalışırlar. Bu sebepten ötürü rüzgar santrallerinde değişken hızlı işletimler için pek uygun değildirler. Buna ilaveten, senkron makine rotor alanını uyarabilmek için doğru akıma gereksinim duyar. Bu da karbon fırçalarına ihtiyaç duyulması demektir. Doğru akım ve fırça gereksinimi reluktans motorunun kullanımı ile elimine edilebilir ve böylece güvenilirlik de arttırılırken maliyet de azaltılır. Fakat bu tip makineler sadece onlu kW'lı güçlere sahiptirler. Senkron makinaların sabit hızlı örnek olarak solar güç santrallerinde kullanılması daha doğrudur. İndüksiyon makinelerinin aksine, senkron makineler elektrik şebekelerinde kullanıldığı zaman bazı avantajlara sahiptirler. Şebekeden reaktif güç ihtiyacı duymazlar. Bu daha kaliteli güç sağlanmasını sağlar. Bu avantajın önemi, rüzgar santrali küçük kapasiteli bir şebekeye uzun ve düşük gerilimli hatlarla bağlandığı zaman daha da ön plana çıkar [3].

4.7 Asenkron (Endüksiyon) Jeneratörler

Yeryüzündeki rüzgar türbinlerinin çoğunluğu alternatif akım üretebilmek için 3 fazlı asenkron ya da bilinen adıyla indüksiyon jeneratörler kullanırlar [3].



Şekil 4.9: Asenkron jeneratörler [4].

Bu tip jeneratörler, rüzgar teknolojisi dışında pek kullanılmazlar. Bu tip jeneratörler ilgili ilginç olan nokta bunların elektrik motoru olarak dizayn edilmeleridir. Dünya elektrik enerjisi tüketiminin yaklaşık 1/3'ü fabrikalarda, pompa istasyonlarında, asansörlerde ve kompresörlerde elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirmek amacıyla indüksiyon makinalarının işletiminde kullanılır. Bu tip jeneratörler seçmenin sebebi bunların oldukça güvenli ve maliyet bakımından uygun olmalarıdır [3].

4.7.1 Kafes Yapılı Rotorlar

Asenkron jeneratörler senkron jeneratörlerden farklı kılan rotordur. Rotor elektriksel olarak birbirine bağlanmış alüminyum veya bakır barlar içerir. Rotor statorun orta kısmına yerleştirilmiştir. ve statorda 3 fazlı olarak elektrik şebekesine bağlanır [3]. Bu tip makinaların çalışma prensibi dönen magnetik alan üretilmesidir. Bu dönen magnetik alanın hızına senkron hız adı verilir [3].

$$N_s = 60 \cdot f / p \quad (4.1)$$

f = stator uyarma frekansı

P = magnetik kutup çiftlerinin sayısı

Senkron hızla dönen stator magnetik alanı aşağıdaki belirlenir. Endüklenen gerilim Faraday elektromanyetik indüksiyon kanununa göre [3]:

$$e = -d\Phi/dt \quad (4.2)$$

Bu gerilim rotordaki sirkülasyon akımını üretir. Rotor akımının ve stator akısının elektromagnetik kesişimi momenti üretir. Bu momentin genliği aşağıdaki eşitlikle verilir [3].

$$T = K \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos\Phi_2 \quad (4.3)$$

K = sabit

Φ = stator akısı

I_2 = rotor barlarında indüklenen akım

Φ_2 = rotor akımı ile gerilimi arasındaki faz açısı

Rotor bu momentin etkisi altında ivmelenecektir. Eğer rotor sürtünmesiz bir ortamda ve hiçbir mekanik yüke bağlı değilse, rotor sıfır dirençle döner. Bu koşullar altında, rotor, statorla aynı hıza, senkron hıza ulaşacaktır. Bu hızda, rotor hızında indüklenen akım sıfır değerine sahiptir ve hiçbir moment değerine sahip değildir [3].

Eğer rotor bir mekanik yüke bağlanırsa, rotor yavaşlayacaktır. Sabit ve senkron hızla dönen stator akısı rotor hızına uygun hıza sahip olacaktır. Sonuç olarak, elektromagnetik olarak endüklenmiş gerilim, akım ve moment rotorda oluşturulur. Oluşturulan moment yükü aynı hızda sürmek için gerekli momente eşit olmalıdır. Eğer rotoru bir rüzgar türbinine bağlarsak ve senkron hızdan daha hızlı sürersek, endüklenen akım ve moment yön değiştirirler. Bu durumda makine, stator çıkışlarına bağlanmış yük için türbinin mekanik enerjisini elektrik enerjisine çeviren bir jeneratör gibi çalışır. Eğer makine şebekeye bağlı ise, gerekli gücü şebekeye sağlayacaktır. Bu sebepten ötürü, indüksiyon makinaları sadece senkron hızın üstündeki hızlarda jeneratör gibi çalışırlar. İndüksiyon makinaları stator ve rotor arasında hiçbir elektriksel bağlantıya ihtiyaç duymazlar. Bunların işletimi tamamen elektromagnetik indüksiyona dayanır. Elektriksel kontakların olmaması, ve bunların yapımındaki kolaylık bunları dayanıklı, güvenilir ve düşük maliyetli makinalar yapar. Bu tip makinaların çalışma prensibi bir trafonun çalışma prensibiyle benzerlikler gösterir [3].



Şekil 4.10: Elektrik jeneratörü [3].

4.8 Kontrol Kutusu

Elektronik kontrolcü, rüzgâr türbininin şartlarını sürekli olarak takip eden ve rota mekanizmasını (yaw) kontrol eden bir bilgisayar bulundurur. Herhangi bir bozukluk (dişli kutusu veya jeneratörün aşırı ısınması gibi) durumunda türbini otomatik olarak durdurur ve türbin operatörü bilgisayarına modem hattı ile çağrı mesajı gönderir [1].

4.9 Anemometre ve Rüzgar Gülü

Rüzgârın hızını ve yönünü ölçmek için kullanılırlar. Örneğin türbin devreye girme hızı 5 m/s olan, Kesme hızı 25 m/s olan bir türbinde, rüzgâr hızı 5 m/s'ye eriştiğinde türbini harekete geçirmek için rüzgâr türbininin elektronik kontrolcüsü tarafından anemometrenin gönderdiği elektronik sinyaller kullanılır. Eğer rüzgâr hızı 25 m/s' yi aşarsa bilgisayar, türbini ve çevresindekileri korumak için rüzgâr türbinini otomatik olarak durdurur. Rüzgar gülünden gelen sinyaller, rüzgâr türbini elektronik kontrolcüsü tarafından alınarak, rota mekanizması (yaw) yardımıyla rüzgâra karşı türbini döndürmek için kullanılır [1].



Şekil 4.11: Rüzgar gülü [1].

4.10 Türbin Kafa Kısmı

Rüzgar türbininin dişli kutusunu ve jeneratör dahil ana parçalarını içine alır. Servis personeli, kafa kısmına türbin kulesinden girebilir. Kafa kısmının solunda rüzgâr türbin rotoru, rotor kanatları ve kanat bağlantı noktası bulunur [1].

4.11 Yüksek Hız Şaftı

Yaklaşık 1.500 devir/dak. (RPM) ile döner ve elektrik jeneratörünü çalıştırır. Acil bir mekanik disk freni ile birlikte dir. Aerodinamik frenler kusurlu olduğu zaman veya türbin hizmette olduğu zaman mekanik fren devreye girer [1].

4.12 Rota Mekanizması ve Motoru (Yaw)

Rota mekanizması, rüzgâr gülünü kullanarak rüzgâr yönünü belirleyen elektronik kontrolcü tarafından işletilir. Rüzgârdan azami derecede faydalanabilmek için kanatların yönü daima rüzgâra dik olmalıdır. Rüzgar yönü değiştii zaman rota mekanizması devreye girerek türbin kanatlarını en uygun duruma getirir. Bu genelde birkaç derecelik bir açđ değişimi ile sağlanabilir. Bu rota motorunun döndürme etkisiyle olur. Bazen de, çok yüksek rüzgâr hızlarında kanatların dönüşünün yavaşlaması hatta durması istenebilir. Bu gibi durumlarda rota mekanizması ters yönde çalıştırılabilir. Yeni nesil türbinlerde yaw mekanizması hidrolik fren

sistemiyle birlikte takılmaktadır. Hidrolik fren rotor dönüşündeki pürüzleri düzelttiği gibi, rüzgâra göre uygun konum yakalandığında rotoru sabitlemektedir [1].



Şekil 4.12: Yaw mekanizması [1].

4.13 Kule

Rüzgar türbininin kulesi, kafa kısmını ve rotoru üzerinde taşır. Genellikle kulenin yüksek olması bir avantajdır çünkü, rüzgâr hızları yerden yükseldikçe artar. Ancak kule ağırlığının ve maliyetin artması kule yüksekliğini sınırlamaktadır. Rotor 3-26 ton, gövde 10-56 ton ve kule ağırlığı 12-88 ton arasında değişmektedir. Tipik olarak 600 KW'lık modern bir rüzgâr türbininin kulesi 40-60 m yüksekliktedir (bir 13-20 katlı bina yüksekliği kadar). Kuleler ya tüp ya da kafes biçimindedir. Tüp biçimli kuleler çalışanlar için daha avantajlıdır, çünkü gerektiğinde bir merdivenle içeriden türbinin tepesine çıkmak daha kolaydır. Kafes kulelerin avantajı esas olarak ucuz oluşlarıdır.



Şekil 4.13: Kule [1].

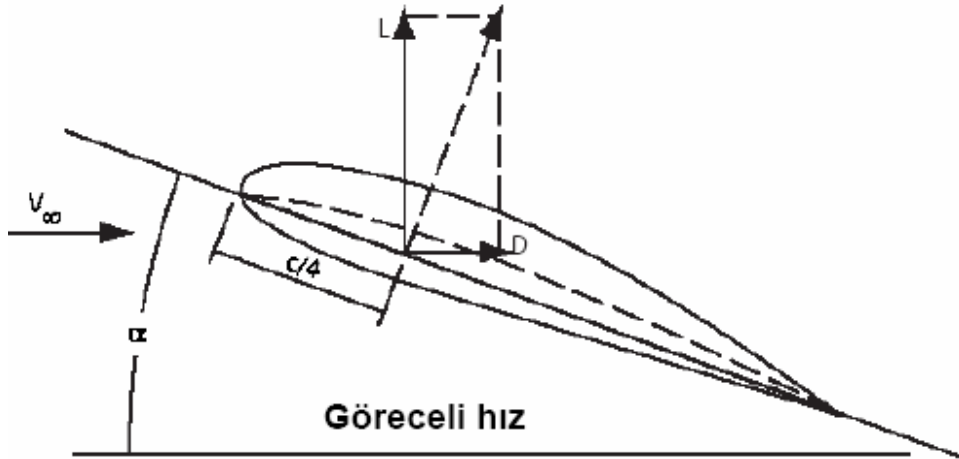
5. KANAT(PALA) RÜZGAR İLİŞKİSİ

Kutta teoremine göre, V hızındaki bir akım içerisinde konmuş bir kanada, V hızına dik yönde

$$F = \rho \cdot V \cdot \Gamma \quad (5.1)$$

şiddetinde bir kuvvet etkimektedir. Buradaki tesir kuvveti iki bileşene ayrılmaktadır. Bunlardan akışa paralel olan kuvvet sürüklenme kuvveti (D), akışa dik olan kuvvet ise kaldırma kuvveti (L) olarak adlandırılır. Kanat etrafındaki sirkülasyonu gösteren ifade ise aşağıdaki gibidir [1].

$$\Gamma = c \cdot CL \cdot V \quad (5.2)$$



Şekil 5.1: Rüzgar – Kanat profili ilişkisi [1].

Şekilde gösterilen değerler aşağıda açıklanmıştır.

c : Vite uzunluğu (Kiriş Uzunluğu) L : Kaldırma kuvveti

D : İtme (sürüklenme, direnç) kuvveti α : Hücum açısı

5.1 Kaldırma ve Sürüklenme Denklemleri

Hava içinde hareket eden cisme, en büyük etkiyi, cismin yüzeyleri arasındaki basınç farkından kaynaklanan kuvvet meydana getirir. Bu kuvvet yanında, sürtünmeden meydana gelen kuvvetler ihmal edilebilir. Kaldırmanın meydana gelmesi için en büyük rolü basınç kuvvetleri oynar. Hava içinde hareket eden bir cismin etrafındaki ortam basıncı, bir bileşke kuvvet meydana getirmez. Bu durumdan anlaşılır ki, hava içinde hareket eden bir cisme etkileyen kuvvetin kaynağı dinamik basınçtır. Dinamik basıncın tesirini anlamamız için otomobilde giderken elimizi camdan dışarı çıkarmamız yeterlidir. Kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranı olarak tarif edilen "L/D" profilin verimliliğinin bir ölçüsü olarak kabul edilir. Yapılan deneyler sonucu görülmüştür ki, hava içerisinde hareket eden bir cisme aşağıda sıralanan değişkenler etkimektedir. Cisim üzerinde meydana gelen kuvvetler bu değişkenlerin fonksiyonudur. Bu değişkenlerden, etkisi ihmal edilemeyecek olanlar aşağıda açıklandığı gibi kabul edilebilir [1].

1. Havanın yoğunluğu
2. Serbest hava akış hızı
3. Havanın sönük hızı
4. Havanın viskozitesi
5. Cisim geometrisi
6. Cisim alanı
7. Cismin yüzey pürüzlülüğü
8. Hücum açısı

Bu değişkenler göz önünde bulundurularak kaldırma, sürüklenme ve moment denklemleri çıkarılabilir. Kuvvet ve moment denklemlerini çıkarmak için boyut analizi yöntemi kullanılabilir [1].

Hava içerisinde hareket eden kanada etkileyen toplam aerodinamik kuvvet $\rho, \alpha, T, V, S, Va$ ile cismin geometrisi ve yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Burada son iki değişkenin etkisi ihmal edilecektir. Bir kanadı etkileyen kuvvet aşağıdaki gibi ifade edilebilir [1].

$$F = (\rho, \alpha, T, V, S, Va) \quad (5.3)$$

Boyutsal homojenliği korumak için, bu parametrelerin üslü veya köklü şekilde çarpım durumunda olmaları gerekir. Bu durumda ifade aşağıdaki halde yazılır [1].

$$F = K. (V^a . p^b . S^c . Va^d . \mu^e) \quad (5.4)$$

Bu ifadede a, b, c, d, e ve K bilinmeyen sabitlerdir. α' nın boyutu olmadığı için etkisi K içinde kabul edilir. Yukarıdaki ifadeyi MLT sistemi ile analiz edersek [1];

$$[MLT^{-2}] = K. [LT^{-1}]^3 . [ML^{-3}]^b . [L^2]^c . [LT^{-1}]^d . [ML^{-1}T^{-1}]^e \quad (5.5)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadenin her iki tarafı boyutsal açıdan özdeştir. Üstel olarak denklik sağlanmalıdır [1].

$$M \text{ için,} \quad 1 = b + e \quad (5.6)$$

$$L \text{ için,} \quad 1 = a - 3b + 2c + d - e \quad (5.7)$$

$$T \text{ için,} \quad -2 = -a - d - e \quad (5.8)$$

Şeklinde yazılmalıdır. Beş bilinmeyene karşın üç denklem mevcuttur. Diğerlerine göre daha az önemli olan Va ile T diğerleri cinsinden yazılırsa [1];

$$a = 2 - d - e \quad (5.9)$$

$$b = 1 - e \quad (5.10)$$

$$c = 1 - e/2 \quad (5.11)$$

bulunur. Böylece kanadı etkileyen kuvvet denklemi:

$$F = K. (V)^{2-d-e} . (p)^{1-e} . (S)^{1-(e/2)} . (Va)^d . \mu^e \quad (5.12)$$

şeklinde yazılabilir. Benzer üslü büyüklükleri toplarsak;

$$F = K. p. S. V^2 . \left(\frac{Va}{V}\right)^d . \left(\frac{\mu}{p.V.S^{1/2}}\right)^e \quad (5.13)$$

neticesini buluruz. Boyutsal olarak $S^{1/2}$, uzunluk boyutuna eşdeğerdir. Bu sebeple $S^{1/2}$ yi doğrusal bir boyut olan “d” ile değiştirmek mümkündür. Bu suretle,

$$F = K. p. S. V^2 . \left(\frac{Va}{V}\right)^d . \left(\frac{\mu}{p.V.d}\right)^e \quad (5.14)$$

ifadesi elde edilir.

$$\frac{Va}{V} = \frac{1}{M} = \frac{1}{Mach} \quad (5.15)$$

$$\frac{\mu}{p.V.d} = \frac{1}{R_y} = \frac{1}{Reynold} \quad (5.16)$$

Olduğundan

$$F = K.p.S.V^2.\left(\frac{1}{M}\right)^d.\left(\frac{1}{R_y}\right)^e \quad (5.17)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade şu şekilde tanımlanabilir.

F = sabit . dinamik basınç . referans alan Sabit çarpan boyutuz olduğu için

$$e = K.2.\left(\frac{1}{M}\right)^d.\left(\frac{1}{R_y}\right)^e \quad (5.18)$$

şeklinde yazılabilir [1].

Bu sabit sayılar taşıma ve sürüklenme kuvvetleri için ayrı notasyonlarla ifade edilirse genel aerodinamik kuvvet ifadeleri

$$Kaldırma kuvveti (L) = C_L.\frac{1}{2}.p.S.V^2 \quad (5.19)$$

$$\frac{C_L}{2} = K.\left(\frac{1}{M}\right)^d.\left(\frac{1}{R_y}\right)^e \quad (5.20)$$

$$Sürüklenme kuvveti(D) = C_D.\frac{1}{2}.p.S.V^2 \quad (5.21)$$

$$\frac{C_D}{2} = K.\left(\frac{1}{M}\right)^d.\left(\frac{1}{R_y}\right)^e \quad (5.22)$$

Sonuç olarak;

Kaldırma kuvveti için

$$L = C_L.q.S = C_L.\frac{1}{2}.p.S.V^2 \quad (5.23)$$

Sürüklenme kuvveti için

$$D = C_D.q.S = C_D.\frac{1}{2}.p.S.V^2 \quad \text{yazılabilir.} \quad (5.24)$$

Burada 'S' kanadın karakteristik yüzeyine karşı gelmektedir. S yüzeyi olarak kanat izdüşümü alanı alınır.



Şekil 5.2: Kanat profili kesiti [1].

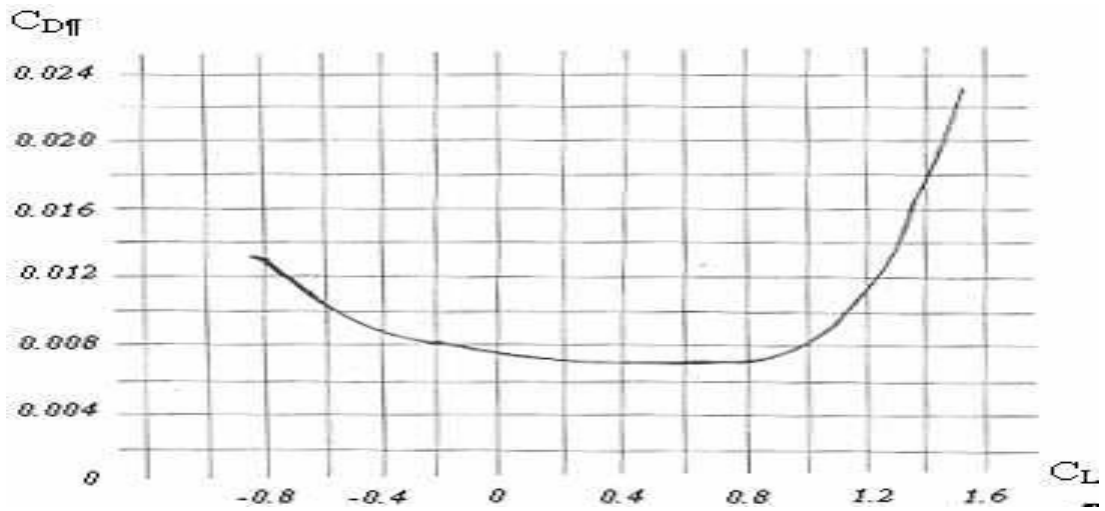
$$S = b.c \text{ olur.} \quad (5.25)$$

C_L ve C_D boyutsuz kaldırma ve direnç katsayılarını göstermektedir. Bu katsayılar belirli bir kanat formu için Re sayısı ve pürüzlülüğün birer fonksiyonudur. Bu katsayılar pürüzsüz ve belirli bir kanat formu için hücum acısı ve Re sayısının birer fonksiyonu olarak kabul edilebilir [1].

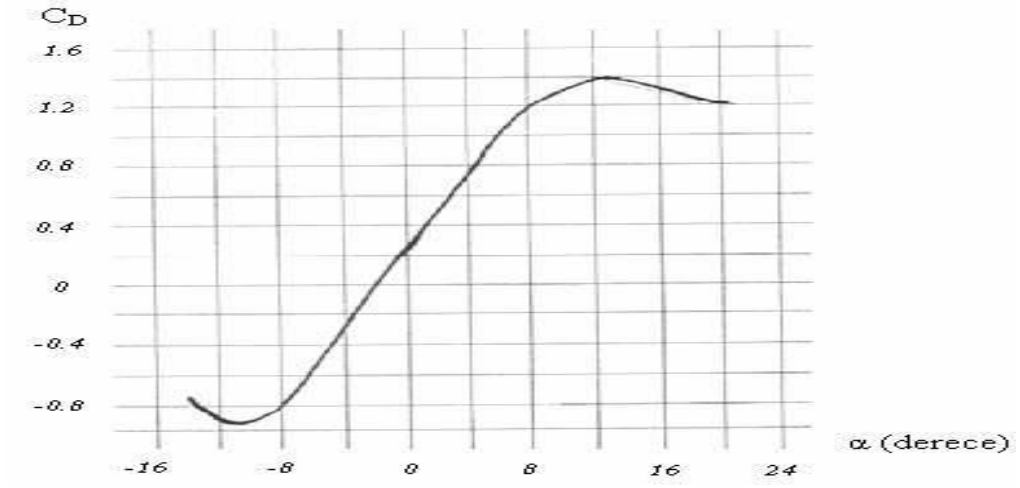
$$C_L = f(Re, \alpha) \quad (5.26)$$

$$C_D = f(Re, \alpha) \quad (5.27)$$

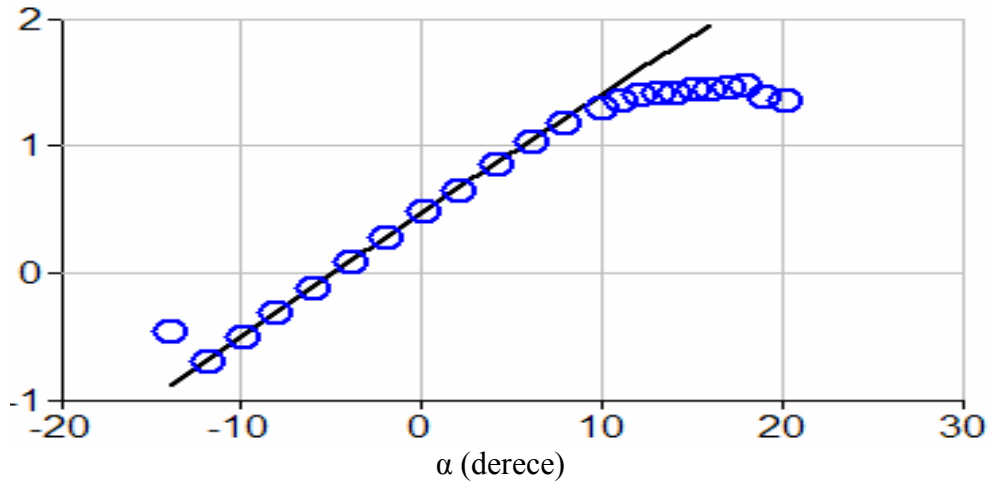
Kanada ters yönde direnç uygulayan D kuvvetinin küçük olması istenir. D/L ile C_D/C_L oranı verimliliğin bir göstergesidir. Bu oran ne kadar küçükse kanat o kadar verimli kabul edilir. Az bir dirençle büyük bir kaldırma elde edilmesi anlamına gelir. Aşağıda diğer gelişmiş kanat profil türlerine göre daha kolay imal edilebilecek NACA 4415 profiline ait direnç katsayı grafikleri verilmiştir [1].



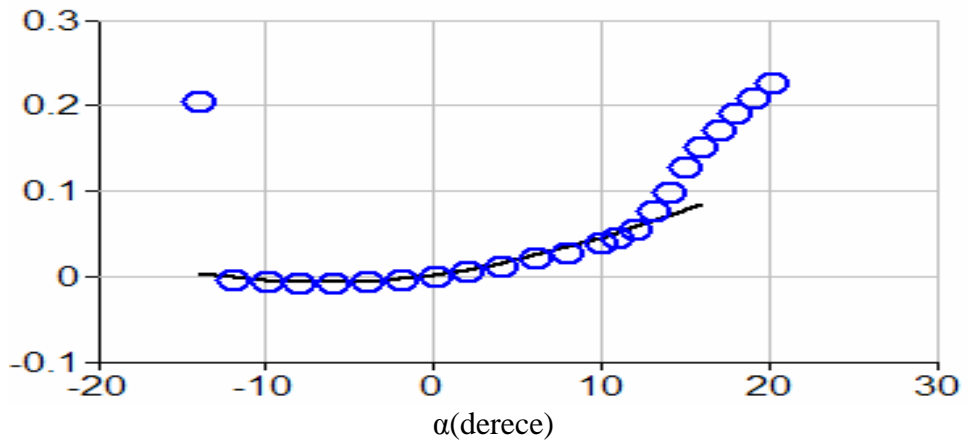
Şekil 5.3: NACA 4415 Profili $C_D - C_L$ Eğrisi [1].



Şekil 5.4: NACA 4415 Profili $C_D - \alpha$ Eğrisi [1].



Şekil 5.5: Kaldırma katsayısının α ile değişimi (SymLab Programı) [1].



Şekil 5.6: Direnç katsayısının α ile değişimi (SymLab Programı) [1].

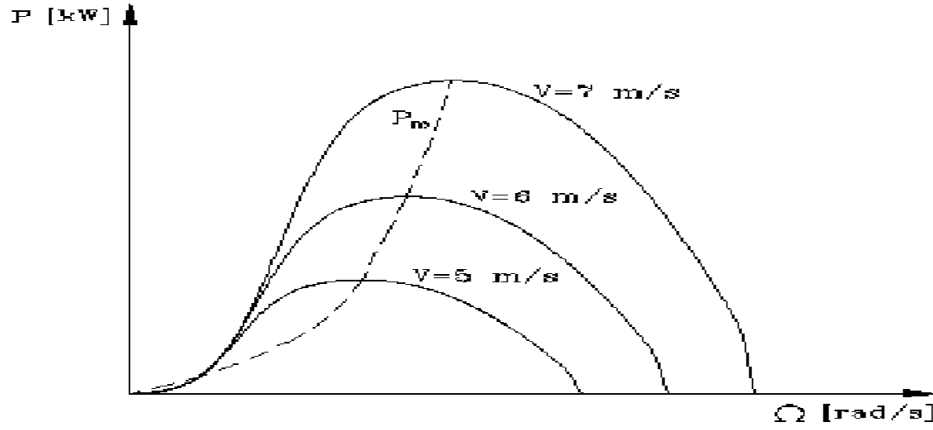
Tablo 5.1: NACA profillerine ait α ile kaldırma direnç katsayılarının değişimi [1].

Profil	α	C_L	C_D
Naca 23012	-2	0.0	0.006
	8	0.872	0.010
	20	1.210	0.190
Naca 23015	-2	-0.001	0.007
	8	0.898	0.010
	20	1.270	0.167
Naca 4412	-4	0.003	0.008
	8	1.135	0.014
	20	1.504	0.164
Naca 4415	-4	-0.038	0.075
	8	1.102	0.116
	20	1.304	0.121
Naca 0012	25	0.835	0.445
	75	0.567	2.006
	150	-0.976	0.689
Naca Fx 60-120	-4	0.102	0.007
	8	1.364	0.013
	20	1.297	0.012
Naca Fx 60-184	-4	0.019	0.008
	8	1.262	0.012
	20	1.300	0.012

6. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN KARAKTERİSTİKLERİ

6.1 λ (Uç Hız Oranı)

Kanadın ucundaki çevresel hızın, rüzgâr hızına oranı olarak tarif edilir. Rüzgâr türbini dizaynında öncelikle pervane hızının güç üretimi üzerindeki etkisini incelemek gerekir. Belli bir rüzgâr hızında pervanenin rüzgârdan çekebileceği gücün pervanenin dönme hızına bağlı değişimini gösteren grafik Şekil 6.1'deki gibidir [1].



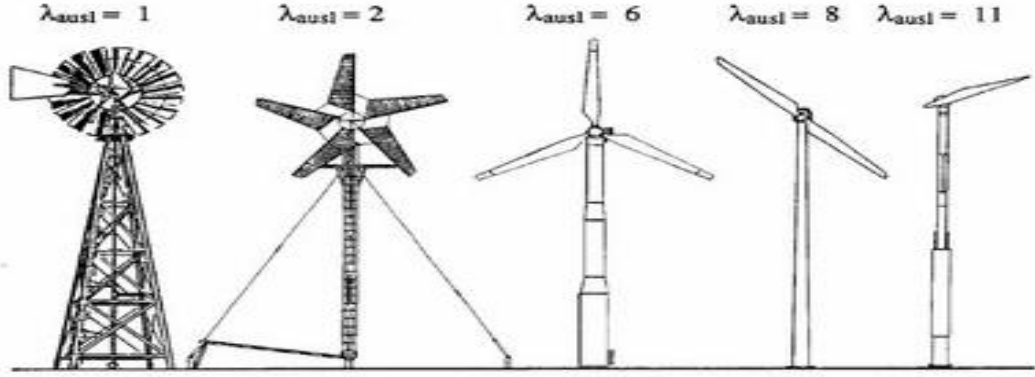
Şekil 6.1: Rüzgar türbini pervanesinde gücün hıza bağlı değişimi. [1].

Buradaki her bir eğri farklı rüzgâr hızlarına aittir. Görüldüğü gibi rüzgâr hızı sabit iken maksimum güç, sadece belli bir açısal hızda elde edilebilmektedir. Rüzgâr hızı arttıkça maksimum güç noktasına tekabül eden açısal hız da artmaktadır. Söz konusu P- Ω grafiğinde her rüzgâr hızı için maksimum güç noktalarını birleştiren bir P_m eğrisini çizmek mümkündür. Bu durumda pervaneden en iyi aerodinamik verimi alabilmek için pervanenin P_m eğrisini takip edecek şekilde çalıştırılması gerekir. Şekil 6.1'de her bir rüzgâr hızı için çizilen eğrileri tek bir eğri ile ifade edebilmek için güç (P) ve açısal hız (Ω) parametrelerini boyutsuzlaştırıp, güç yerine 'güç katsayısı' (C_p), açısal hız yerine de 'uç hız oranı' (λ) parametrelerini kullanmak gerekir. Böylece P- Ω eğrileri basitleştirilerek Şekil 6.3'deki tek bir $C_p - \lambda$ eğrisine dönüştürülebilir [1].

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (6.1)$$

R : Kanat süpürme alanının yarıçapı Ω : Rotorun açısal hızı ($2\pi n$) (1/s)

V : Rüzgar hızı (m/s)



Şekil 6.2: Uç hız oranı – Kanat sayısı ilişkisi [1].

6.2 Cp (Güç Katsayısı)

Rotor gücünün, rüzgârdan elde edilebilecek güce oranı şeklinde tanımlanır.

$$C_p = P_R/P \quad (6.2)$$

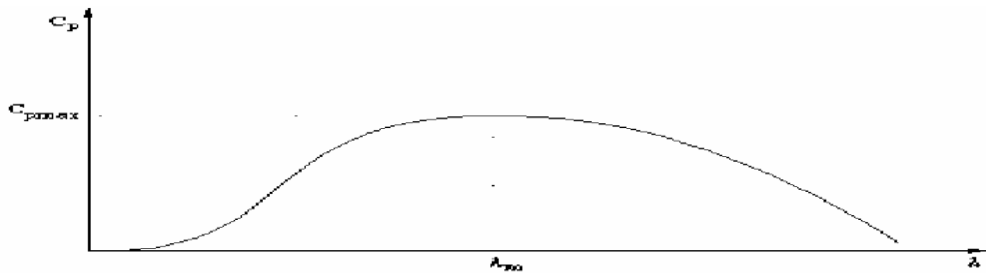
$$P_R = C_p \cdot P = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad \text{buradan R çekilecek olursa}$$

$$R = [2P_R/(\rho \cdot \pi \cdot V^3 \cdot C_p)]^{1/2} \quad (6.3)$$

P_R : Rotordan elde edilen güç (W, kW)

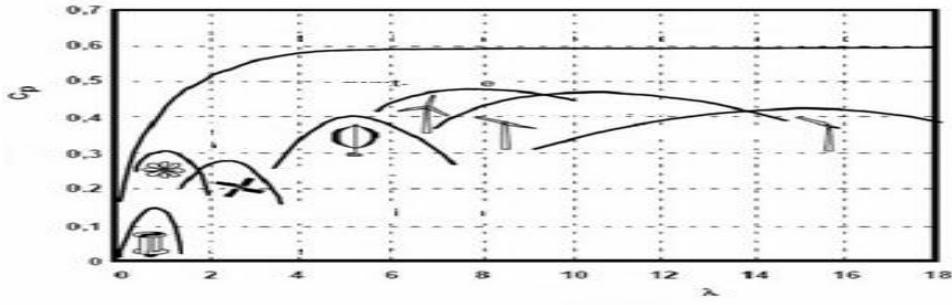
P : Rüzgar gücü (W, kW)

A : Rotor kanadının süpürdüğü alan



Şekil 6.3: Rüzgar türbini pervanesinde aerodinamik verimin uç hız oranına bağlı değişimi [1].

Şekil 6.3'deki maksimum CP noktası, Şekil 6.1'deki tüm maksimum güç noktalarını birleştiren Pm eğrisini temsil etmektedir. Bu durumda maksimum verim bölgesinde hız kontrolü için uygulanacak temel kural “pervanenin, maksimum CP noktasına karşılık gelen λ_m uç hız oranını koruyacak şekilde işletilmesi” olarak özetlenebilir. m değeri ise tamamen pervanenin aerodinamik tasarımına bağlıdır. Bir fikir verebilmek amacıyla, aerodinamik kaldırma prensibiyle çalışan modern türbinlerde bu değer genellikle 6-8 arasında değiştiğini söylemek mümkündür [1].



Şekil 6.4: Güç katsayısının uç hız oranına göre değişimi [1].

6.3 Katılık Oranı

Rotor kanatlarının kapladığı alanın, Kanatların süpürdüğü alanın tamamına oranı olarak tanımlanır [1].

$$\text{Katılık Oranı} = \frac{A}{A} \quad (6.4)$$

A : Rotor kanatlarının kapladığı alan

A : Rotor kanatlarının süpürdüğü alan

Belli bir katılık oranı için, pala sayısı ne kadar az olursa bir palaya ait kesit alan değeri o kadar artacağından palanın dayanımı da artacaktır. Yapısal dayanım açısından pala sayısının mümkün olduğunca az seçilmesi iyidir belli bir katılık oranı için pervanedeki pala sayısının az olması oluşan gerilmeler açısından avantaj sağlamaktadır [1].

6.4 Pf (Faydalı Güç)

Sistemden elde edilen güç, faydalı güç olarak tanımlanır.

$$P_f = n_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (6.5)$$

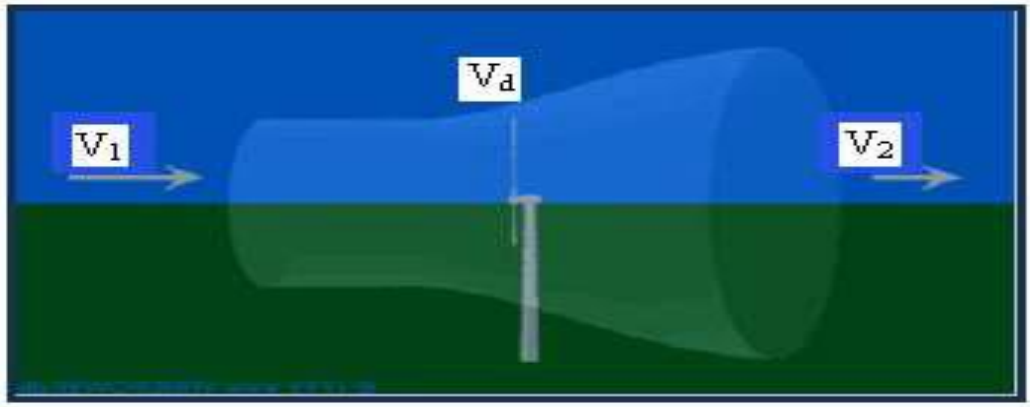
n_t :Sistemin toplam verimidir.

Pratikte bir rüzgar enerji türbininin faydalı gücü aşağıdaki şekilde kabaca tahmin edilir [1].

$$P_f = (0.1 - 0.3) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (6.6)$$

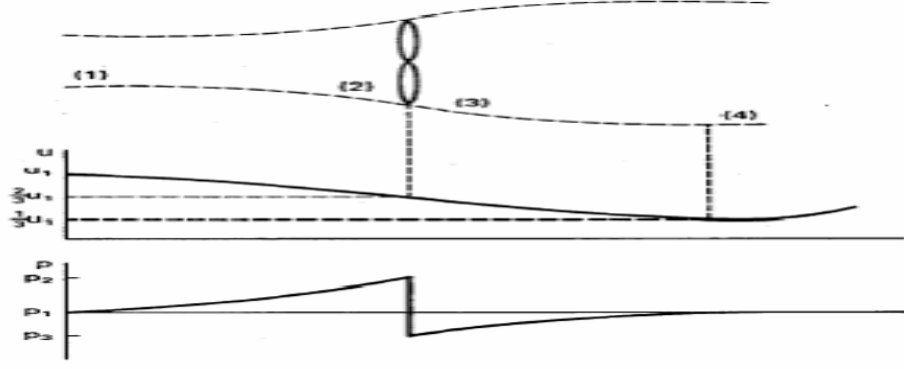
6.5 Rüzgar Türbinin Aerodinamik Verimi

Rüzgar türbininin aerodinamik verimi LANCHESTER – BETZ LİMİTİ ile sınırlıdır. Betz teoremi enerjinin, çizgisel momentum ve kütlenin korunumu kanunlarından türetilebilir. Hesabının basitliği açısından tek boyutlu akım hali için bu kanunlar uygulanmıştır [1].



Şekil 6.5: Kanat ön ve arka bölgelerinde hız değişimi [1].

Rüzgârın akış yönüne dik, herhangi bir A alanı içinden V_1 hızıyla geçen hava kanat bölgesinden V_d hızıyla geçerek, kanadın arkasında V_2 hızına ulaşır.



Şekil 6.6: Rotor önünde ve arkasında hız ve basıncın değişimi [1].

Şekil 6.6'daki 1 bölgesinde A kesit alanından geçen rüzgârın, önünde kanat olmadan taşıdığı enerji P olsun [1].

$$P = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_1^2 \text{ (Watt)} \quad (6.7)$$

m : kütleli debi

V_1 : Serbest alandaki rüzgâr hızı

$$m = \rho \cdot A \cdot V_1 \text{ (kg/s)} \quad (6.8)$$

Rüzgârın getirdiği güç ;

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1 \cdot V_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1^3 \text{ (Watt)} \quad (6.9)$$

Buradan anlaşılmaktadır ki, hız arttıkça rüzgârdan elde edilen güç küpüyle doğru orantılı olarak artmaktadır. Ayrıca rüzgârın geçtiği kesit alan $\pi \cdot r^2$ olduğundan, kanadın süpürme alanının yarıçapıyla doğru orantılıdır. Kanat süpürme alanına dik doğrultuda oluşan kuvvet, Newton'un 2. Kanunundan yararlanılarak bulunabilir [1].

$$F = m \cdot (V_1 - V_2) \text{ (N)} \quad (6.10)$$

olup rotor üzerinde birim zamanda yapılan iş (Nr) :

$$Pr = F \cdot V_d = m \cdot (V_1 - V_2) \cdot V_d \text{ (Watt)} \quad (6.11)$$

$$m = \rho \cdot A \cdot V_d \text{ (kg/s)} \quad (6.12)$$

m : rotorlu durumdaki kütleli debidir.

V_d : kanat arkasındaki rüzgâr hızıdır.

iş – Enerji prensibine göre, birim zamandaki kinetik enerji değişimi rotor üzerinde birim zamanda yapılan işe eşittir [1].

$$m. (V_1 - V_2). V_d = 1/2 \cdot m. (V_1^2 - V_2^2) \quad (6.13)$$

$$V_d = (V_1 + V_2)/2 \text{ (m/s)} \quad (6.14)$$

Yani rotor düzlemindeki akım hızı, rotora yaklaşan ve rotordan uzaklaşan akımların hızlarının ortalamasıdır [1].

$$P_r = F. V_d \quad (6.15)$$

$$P_r = m. (V_1 - V_2). V_d \quad (6.16)$$

$$P_r = m. (V_1 - V_2). (V_1 + V_2)/2 = p. A. (V_1 + V_2)/2. (V_1 - V_2). (V_1 + V_2)/2 \quad (9.17)$$

$$P_r = p. A/4. (V_1 + V_2). (V_1^2 - V_2^2) \quad (6.18)$$

Bu güç fonksiyonunun maksimum değeri uygulamada çok önemli olmaktadır. Bu değere göre maksimum verim tahmin edilmektedir. Burada güç ifadesinin V_2 hızına göre türevini alırsak [1];

$$\frac{dP_r}{dV_2} = (p. A/4). (V_1^2 - 2. V_1. V_2 - 3. V_2) = 0 \quad (6.19)$$

$V_1^2 - 2. V_1. V_2 - 3. V_2$ ifadesi V_2 göre ikinci dereceden bir denklem olup, bu denklemin kökleri $(V_1 - 3. V_2). (V_1 + V_2) = 0$ olup, buradan gerçek kök

$$V_2 = V_1/3 \quad (6.20)$$

bulunur [1].

$$Pr_{maks} = (\rho. A/4). (V_1 + \frac{V_1}{3}). (V_1^2 - (\frac{V_1}{3})^2) \quad (6.21)$$

$$Pr_{maks} = \rho. \frac{A}{4}. 4. \frac{V_1}{3}. 8. \frac{V_1^2}{9} \quad (6.22)$$

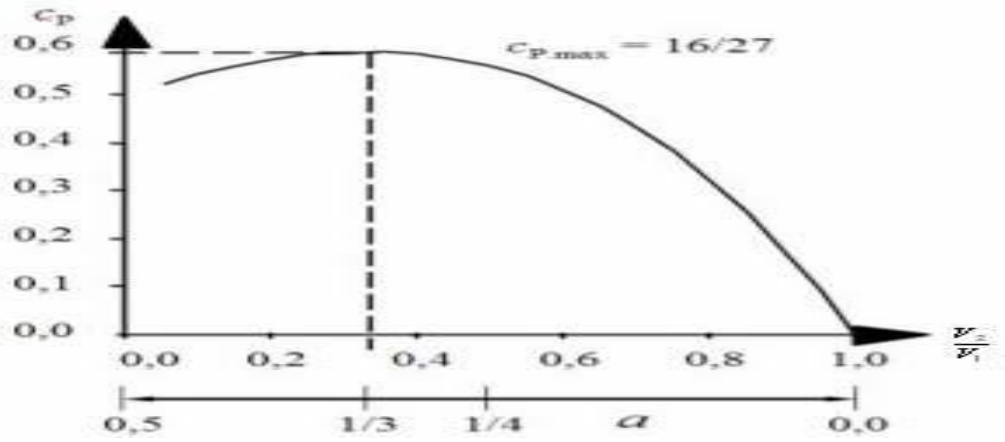
$$Pr_{maks} = \frac{8}{27} \cdot \rho. A. V_1^3 \text{ (Watt)} \quad (6.23)$$

Olarak bulunur [1].

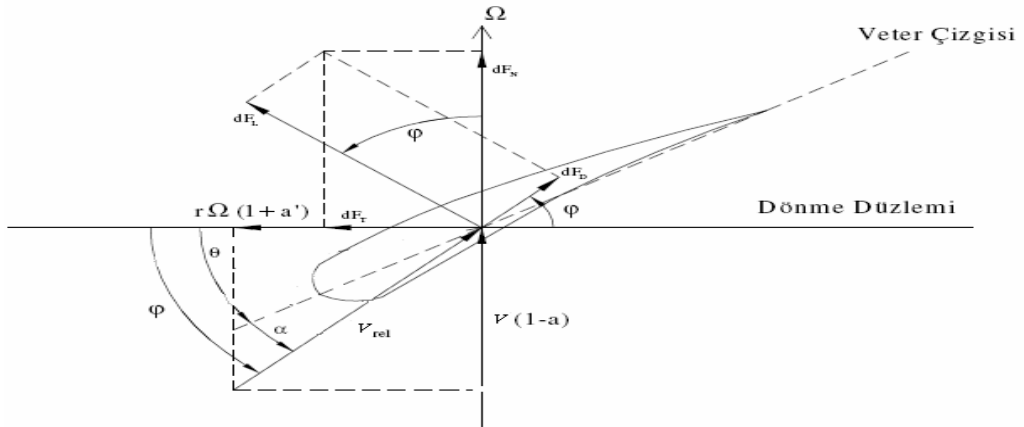
$$C_{p_{maks}} = \frac{Pr_{maks}}{P} = \frac{\frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1^3}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1^3} = \frac{16}{27} \quad (6.24)$$

$$C_{p_{maks}} = 0.593$$

İdeal koşullarda güç katsayısının alacağı maksimum değer % 59,3 olmaktadır [1]. Buna Betz Limiti denmektedir. Bu denklemden anlaşılacağı üzere rüzgâr türbini havada bulunan rüzgâr enerjisinin ancak % 59'unu kullanabilmektedir. Pratikte ise güç katsayısı 0,35-0,50 arasında olmakta, 0,5'i geçmemektedir [1].



Şekil 6.7: Hız oranı güç katsayısı ilişkisi [1].



Şekil 6.8: Yatay eksenli bir türbinin analizi için pala geometrisi ve hız-kuvvet diyagramı [1].

Kutta – Jukowski teoremine göre, bir kaldırma meydana gelebilmesi için, bir akış ve de bir sirkülasyona ihtiyaç vardır. Betz teoreminde kanat bölgesi bir disk şeklinde kabul edilerek işlem yapılmıştır. Gerçek kanat geometrisi ise radyal

aralıklarla yerleştirilmiş rijit kanatçıklardır. Şekil 6.8'de dr şeklinde alınan bir kanat elemanı üzerindeki hız – kuvvet diyagramı görülmektedir [1]. Burada :

a Eksenel indüksiyon katsayısı

a' Radyal indüksiyon katsayısı

V_{rel} Bağlı Hız

φ Dönme düzlemi ile bağlı hız arasındaki açı

θ Kanat açısı

α Hücum açısı

$$V_{rel} = [\gamma(1 + a^1)] + [V(1 + a)]^2]^{1/2} \quad (6.25)$$

$$\varphi = \arctg \frac{V(1-a)}{\gamma\Omega(1+a^1)} \quad (6.26)$$

Hava akımının kanat profiline etkisi, kaldırma (L) ve sürüklenme (D) kuvvetleri şeklinde kendini gösterir. Bu kuvvetlerin bileşkesi, dönme düzlemine dik dFn (normal) ve paralel dFt (teğetsel) olarak ayrıştırılabilir. dr kanat elemanı için

$$dL = 1/2 \cdot p \cdot V_{rel}^2 \cdot C_L(a) \cdot c \cdot Dr \quad (6.27)$$

$$dD = 1/2 \cdot p \cdot V_{rel}^2 \cdot C_D(a) \cdot c \cdot Dr \quad (6.28)$$

şeklinde yazılabilir. Burada C_L ve C_D hücum açısına bağlıdır [1].

$$dF_t = dL \cdot \sin \theta - dD \cdot \cos \theta \quad (6.29)$$

$$dF_n = dL \cdot \cos \theta + dD \sin \theta \quad (6.30)$$

Döndürme momenti oluşturan kuvvet Ft kuvvetidir [1].

7. RÜZGAR TÜRBİNİNİN TASARIMI

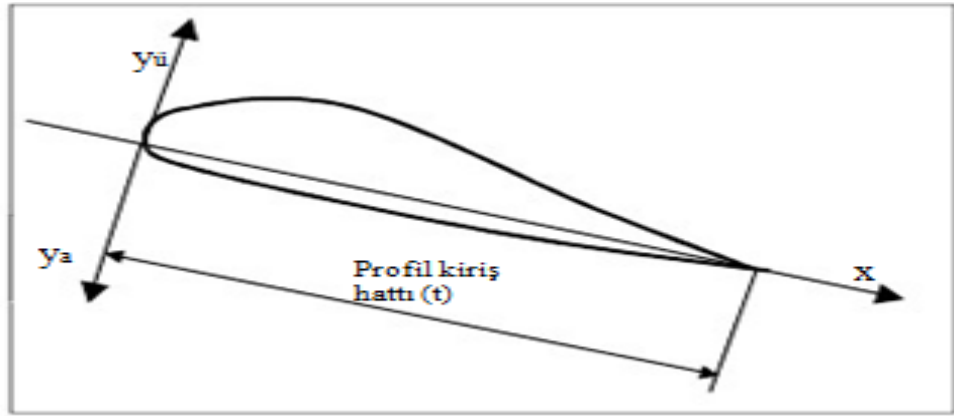
7.1 Kanat Tasarımı ve Hesaplamaları

Rüzgâr türbini tasarımında, enerji dönüşümü zincirinin ilk halkası olan rüzgâr pervanesi önemli bir rol oynamaktadır. Rüzgârdaki kinetik enerjinin pervane miline olabildiğince kayıpsız alınması, elde edilecek verimi önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple rüzgâr türbini pervanesinin rüzgârdan maksimum enerjiyi çekebilecek şekilde dizayn edilmesi gerekmektedir [8]. Rüzgâr türbini kanat dizaynında, öncelikle yapılması gereken, dizayn devirlilik sayısı seçimidir. Bu değer, şebeke bağlantılı üç kanatlı rüzgâr türbinleri için 7 olarak alınmakta ve 6 - 8 değerleri arasında seçilmesi önerilmektedir [8].

En genel halde optimum devirlilik sayısı, profil tipine ve kanat sayısına bağlıdır. Bu nedenle optimum devirlilik sayısının 6 - 8 arasında seçimi genel bir kural değildir. Rüzgâr türbini kanadı dizaynı için optimum profil boyunun, profil giriş hattı ile pervane dönme düzlemi arasındaki açı olan bağlama açısının ve profil boyuna bağlı olarak profil alt ve üst kalınlıkları hesaplanmalıdır [9].

Rüzgâr türbini rotorlarının üretiminde dikkate alınması gereken ve yeterince dikkate alınmadığı durumlarda sonuçlarının çok daha ağır olabileceği bir konu; yüksek rüzgâr hızlarında rotorun dayanımıdır. Önlem alınmaması durumunda, yüksek rüzgâr hızlarında türbin kulesinde ve özellikle kanatlarda mukavemet problemleri ortaya çıkmakta, sonuç olarak türbin elemanlarının deformasyonu ve hatta kırılması söz konusu olabilmektedir. Kuleyi zorlayan yük, kule ve özellikle pervaneye etki eden rüzgâr kuvvetinden kaynaklanmaktadır. Kanatlara ise, hem rüzgâr kuvveti hem de kanatların dönmesinden kaynaklanan atalet kuvvetlerinin teğetsel ve normal bileşenleri etki etmektedir. Bu kuvvetler, kule ve kanatlarda eğilme gerilmeleri ile normal gerilmeler oluşturmakta, bu gerilmelerin kullanılan malzemeye özgü güvenli gerilme sınırını aşması durumunda da kırılma oluşmaktadır [8].

Rüzgâr türbini pervane kanatlarında profil olarak daha çok NACA, LS ve LM profilleri kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinlerinde verimi kanat profilinin sağlayacağı kaldırma kuvvetinin direnç kuvvetine oranı (e) etkilemektedir. Bu oran ne kadar büyük olursa sistemin verimi o kadar iyi olur. Şekil 7.1'de bir rüzgâr türbini kanat profilinin temel parametreleri gösterilmiştir. Profillerin giriş ve çıkış uçlarını birleştiren doğruya profil kiriş hattı denir. Profil kataloglarında bu profillerin profil kiriş hattından itibaren ölçülen y_u (üst kalınlık) ve y_a (alt kalınlık) değerleri t profil boyuna bölünerek boyutsuz olarak verilmektedir [8].



Şekil 7.1: Kanat profilinin temel parametreleri [8].

R yarıçapında bir rüzgâr türbini rotoru kanadının katı modelini oluşturmak için öncelikle profil boyunu her bir r uzunluğu için hesaplamak gerekir. Optimum profil boyu; z kanat sayısı, C_L kaldırma kuvveti katsayısı ve λ_D dizayn devirlilik sayısı olmak üzere:

$$t_{opt}(r) = \frac{1}{z} \cdot \frac{16 \cdot \pi \cdot r}{c_L} \cdot \sin^2 \left[\frac{\arctg \left(\frac{R}{\lambda_D \cdot r} \right)}{3} \right] \quad (7.1)$$

bağıntısıyla hesaplanabilmektedir [9]. Bu çalışmada kullanılan NACA 4415 profillerine ait kaldırma kuvveti katsayıları, hücum açlarına bağlı olarak Tablo 7.1'de verilmektedir [9]. Türbin kanadı dizaynı için optimum profil boyunun yanı sıra, profil kiriş hattı ile pervane düzlemi arasındaki açı olan bağlama açısında

(abğl) bilinmesi gerekir. Bunun için a_{opt} , optimum hücum açısı, a_1 , relatif hız vektörü ile profil giriş hattı arasındaki açı olmak üzere,

$$a_{opt} = \frac{2}{3} a_1 \quad (7.2)$$

şeklindedir. R rotor yarıçapı, λ_D dizayn devirlilik sayısı olmak üzere,

$$tga_1 = \frac{R}{r \cdot \lambda_D} \quad (7.3)$$

ile verilmektedir. Buna göre optimum bağlama açısı $abğl = a_1 - \alpha_D$ bağıntısından hesaplanabilir. Dizayn aşamasında, hücum açısı α_D seçilir ve optimum bağlama açısı [8]:

$$\alpha_{opt.bağl} = \frac{2}{3} \cdot arctg\left(\frac{R}{\lambda_D \cdot r}\right) - \alpha_D \quad (7.4)$$

bağıntısıyla bulunarak, kanat profili her bir r için çizilir. Kanat profili çiziminde kanat eksenine, burulma zorlanmasını azaltabilmek için genellikle hücum kenarına daha yakın olacak şekilde t/4 ve t/3 aralığında yerleştirilir [9]. Her bir r için optimum profil boyu ve optimum bağlama açısı belirlendikten sonra her bir r için çizilecek olan kanat profillerinin alt ve üst kalınlıklarının (profil giriş hattı boyunca) belirlenmesi gerekir [8].

Bizim bu çalışmada yapılan incelemeler ve araştırmalar sonucunda NACA 4415 kanat profilinden kanat üretmeye karar verdik. Bunun için NACA 4415 profiline ait kalınlık değerleri Tablo 7.2'de verilmektedir [8].

Tablo 7.1: NACA 4415 profillerine ait kaldırma kuvveti katsayıları [8].

	$\alpha_D = 0^\circ$	$\alpha_D = 5^\circ$	$\alpha_D = 10^\circ$	$\alpha_D = 15^\circ$
NACA 4415	0.4	0.875	1.225	1.2

Tablo 7.2: NACA 4415 profillerine ait kalınlık değerleri [8].

$\frac{x}{t}$	$\frac{yü}{t}$	$\frac{ya}{t}$
0,2	0,1	0,04
0,4	0,11	0,03
0,6	0,09	0,015
0,8	0,05	0,008

7.2 Tasarımı Yapılacak Kanat ve Güç Hesabı

Bizim bu çalışmada 3000 watt yani saat'de 3 kW'lık elektrik enerjisini 12 m/s hızda rüzgardan karşılamak için gereken kanat yarı çapının bulmak için hesabı ve analizleri yapılacaktır .

Alternatörden 3 kW'lık çıkış gücü alınması öngörüldüğünden ve alternatör olarak senkron alternatör kullanılması planlandığından alternatör veriminin başlangıçta %89 olarak seçilmesi uygun görülmüştür. Alternatör Gücü: Alternatör Giriş Gücü / Alternatör Verimi=3 kW/0.89=3529 Watt biz burada standart 3.5 Kw'lık seçeceğiz. Sistem kanatları hariç verimi olarak $\eta = 0.9$ alınırsa alternatör giriş gücü $3529/0.9=3921$ watt üretmesi gerekmektedir havadan [9].

Hava akımındaki kinetik enerjiden kaynaklanan güç formülü

$$P_r = C_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_r^3 \quad (7.5)$$

olmaktadır. Burada $C_p = 0.38$ Güç Faktörü $\rho = 1.23$ Havanın Yoğunluğu [kg/m³] R : Pervane Kanadı yarı çapı (m) V_r : Rüzgar Hızı (m/s) olarak simgelenmektedir. Bu çalışma kapsamında rüzgar hızı rüzgar hızı V_r :12 m/s sabit olarak kabul edilecektir. $P \cdot \text{gücünün} \cdot \Delta t$ süresince etkimesi durumunda toplam enerji $E = P \cdot \Delta t$

olarak saptanır. Rüzgar türbininden saatte elde edilecek elektrik enerjisi miktarı da yukarıdaki denklemde yerine koyarsak ve buradan R çekersek

$$3921 [\text{w.h}] = 0,3 \cdot \frac{1,23}{2} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot 12^3 \cdot 1 \quad (7.6)$$

rüzgar türbini pervanesi kanadı R=1.97 m bulunur ve sonuç olarak R=2 m seçilir.

Rüzgar türbinlerinden elektrik enerjisi üretilmek istendiğinde en büyük güç 3 kanatlı pervanelerden elde edildiğinden kanat sayısı $z=3$ alınır. Optimum profil boyu, optimum bağlama açısı ve kanat profil tipine bağlı olarak kanadın alt ve üst kalınlık değerleri, yaptığım araştırmalara göre NACA 4415 profilinde $a_D = 5^\circ$ de maksimum enerji elde edilmektedir [8]. Bunun için hesaplar NACA 4415 profili için $a_D = 5^\circ$ dizayn hücum açısında yapılmıştır. NACA 4415 profili, $\lambda_D = 7$, $R = 2$, $a_D = 5^\circ$ için optimum profil boyu ve optimum bağlama açısı 3 kanatlı türbin için profil giriş hattı boyunca ayrı ayrı hesaplamaları aşağıda verilmektedir.

7.3 Optimum Profil Boyu Hesabı

NACA 4415 Profili, ($\lambda_D=7$, $R = 2$, $a_D = 5^\circ$, $Z=3$) için Optimum Profil Boyu hesabı şöyle yapılmaktadır. Öncelikle 2 metre kanatı 11 eşit parçaya ayırmaktayız.

Tablo7.3: Kanat düzlem sayısı ve mesafeleri.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
r_m	0,1 0	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2

$$t_{opt}(\mathbf{r}) = \frac{1}{z} \cdot \frac{16 \cdot \pi \cdot r}{c_L} \cdot \sin^2 \left[\frac{\arctg \left(\frac{R}{\lambda_D \cdot r} \right)}{3} \right] \quad (7.1)$$

Denklem 7.1'de verilen değerler yerine yazılırsa $Z=3$, $\lambda_D=7$, $C_L=0,875$, $R = 2$

$$t_{opt}(r_1) = \frac{1}{3} \cdot \frac{16\pi \cdot 0,1}{0,875} \cdot \sin^2 \left[\frac{\arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 0,1}\right)}{3} \right] = 0,3061 \text{ [m]} \quad (7.7)$$

$$t_{opt}(r_2) = \frac{1}{3} \cdot \frac{16\pi \cdot 0,30}{0,875} \cdot \sin^2 \left[\frac{\arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 0,30}\right)}{3} \right] = 0,3617 \text{ [m]} \quad (7.8)$$

$$t_{opt}(r_3) = \frac{1}{3} \cdot \frac{16\pi \cdot 0,50}{0,875} \cdot \sin^2 \left[\frac{\arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 0,50}\right)}{3} \right] = 0,2838 \text{ [m]} \quad (7.9)$$

$$t_{opt}(r_4) = \frac{1}{3} \cdot \frac{16\pi \cdot 0,70}{0,875} \cdot \sin^2 \left[\frac{\arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 0,70}\right)}{3} \right] = 0,2224 \text{ [m]} \quad (7.10)$$

$$t_{opt}(r_5) = \frac{1}{3} \cdot \frac{16\pi \cdot 0,90}{0,875} \cdot \sin^2 \left[\frac{\arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 0,90}\right)}{3} \right] = 0,1803 \text{ [m]} \quad (7.11)$$

$$t_{opt}(r_6) = \frac{1}{3} \cdot \frac{16\pi \cdot 1,10}{0,875} \cdot \sin^2 \left[\frac{\arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 1,10}\right)}{3} \right] = 0,1507 \text{ [m]} \quad (7.12)$$

$$t_{opt}(r_7) = \frac{1}{3} \cdot \frac{16\pi \cdot 1,30}{0,875} \cdot \sin^2 \left[\frac{\arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 1,30}\right)}{3} \right] = 0,1292 \text{ [m]} \quad (7.13)$$

$$t_{opt}(r_8) = \frac{1}{3} \cdot \frac{16\pi \cdot 1,50}{0,875} \cdot \sin^2 \left[\frac{\arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 1,50}\right)}{3} \right] = 0,1129 \text{ [m]} \quad (7.14)$$

$$t_{opt}(r_9) = \frac{1}{3} \cdot \frac{16\pi \cdot 1,70}{0,875} \cdot \sin^2 \left[\frac{\arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 1,70}\right)}{3} \right] = 0,1001 \text{ [m]} \quad (7.15)$$

$$t_{opt}(r_{10}) = \frac{1}{3} \cdot \frac{16\pi \cdot 1,90}{0,875} \cdot \sin^2 \left[\frac{\arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 1,90}\right)}{3} \right] = 0,0899 \text{ [m]} \quad (7.16)$$

$$t_{opt}(r_{11}) = \frac{1}{3} \cdot \frac{16\pi \cdot 2}{0,875} \cdot \sin^2 \left[\frac{\arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 2}\right)}{3} \right] = 0,0856 \text{ [m]} \quad (7.17)$$

NACA 4415 profil boyları tek tek hesaplanarak bulmuş bulunmaktayız.

7.4 Optimum Bağlama Açısı Hesabı

NACA 4415 Profili, ($\lambda_D=7$, $R=2$, $a_D=5^\circ$, $Z=3$) için Optimum bağlama açısı hesabı şöyle yapılmaktadır. Daha önce verilmiş olan denklem (7.4) $\lambda_D=7$, $a_D=5^\circ$, $R=2$ verilen değerleri yerine yazarak hesaplanacaktır.

$$\alpha_{opt.bagl} = \frac{2}{3} \cdot \arctg\left(\frac{R}{\lambda_D \cdot r}\right) - \alpha_D \quad (7.4)$$

$$\alpha_{opt.bagl}(1) = \frac{2}{3} \cdot \arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 0,1}\right) - 5^\circ = 42,139 \quad (7.18)$$

$$\alpha_{opt.bagl}(2) = \frac{2}{3} \cdot \arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 0,3}\right) - 5^\circ = 24,06 \quad (7.19)$$

$$\alpha_{opt.bagl}(3) = \frac{2}{3} \cdot \arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 0,5}\right) - 5^\circ = 14,829 \quad (7.20)$$

$$\alpha_{opt.bagl}(4) = \frac{2}{3} \cdot \arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 0,7}\right) - 5^\circ = 9,80 \quad (7.21)$$

$$\alpha_{opt.bagl}(5) = \frac{2}{3} \cdot \arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 0,9}\right) - 5^\circ = 6,74 \quad (7.22)$$

$$\alpha_{opt.bagl} (6) = \frac{2}{3} \cdot arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 1,1}\right) - 5^\circ = 4,70 \quad (7.23)$$

$$\alpha_{opt.bagl} (7) = \frac{2}{3} \cdot arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 1,3}\right) - 5^\circ = 3,26 \quad (7.24)$$

$$\alpha_{opt.bagl} (8) = \frac{2}{3} \cdot arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 1,5}\right) - 5^\circ = 2,18 \quad (7.25)$$

$$\alpha_{opt.bagl} (9) = \frac{2}{3} \cdot arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 1,7}\right) - 5^\circ = 1,36 \quad (7.26)$$

$$\alpha_{opt.bagl} (10) = \frac{2}{3} \cdot arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 1,9}\right) - 5^\circ = 0,70 \quad (7.27)$$

$$\alpha_{opt.bagl} (11) = \frac{2}{3} \cdot arctg\left(\frac{2}{7 \cdot 2}\right) - 5^\circ = 0,42 \quad (7.28)$$

NACA 4415 optimum bağlanma açıları her optimum profil boyu için tek tek hesaplanarak bulunmuş bulunmaktayız.

7.5 Damla Profilleri İçin Hesaplanacak Kalınlık ve Uzunluk Değerleri

NACA 4415 Profili, ($\lambda_D = 7$, $R = 2$, $a_D = 5^\circ$, $Z = 3$) bu değerler doğrultusunda, her düzlemdeki damla profilleri için kalınlık ve uzunluk noktaları hesaplanırken Tablo 7.4' de ki kalınlık değerleri kullanılarak hesaplanacaktır.

Tablo 7.4: NACA 4415 Profillerine ait kullanılan kalınlık değerleri.

$\frac{x}{t}$	$\frac{yü}{t}$	$\frac{ya}{t}$
0,2	0,1	0,04
0,4	0,11	0,03
0,6	0,09	0,015
0,8	0,05	0,008

$t_{opt}(1)=0,30617$ damla profili için hesaplanacak kalınlık ve uzunluk noktaları aşağıda verilmiştir.

$\frac{x_1}{t}=0,2$	$x_1=0,0612$	$\frac{y\ddot{u}_1}{t}=0,1$	$y\ddot{u}_1=0,0306$	$\frac{ya_1}{t}=0,04$	$ya_1=0,0122$
$\frac{x_2}{t}=0,4$	$x_2=0,1224$	$\frac{y\ddot{u}_2}{t}=0,11$	$y\ddot{u}_2=0,0336$	$\frac{ya_2}{t}=0,03$	$ya_2=9,185 \times 10^{-3}$
$\frac{x_3}{t}=0,6$	$x_3=0,1837$	$\frac{y\ddot{u}_3}{t}=0,09$	$y\ddot{u}_3=0,0275$	$\frac{ya_3}{t}=0,013$	$ya_3=4,592 \times 10^{-3}$
$\frac{x_4}{t}=0,8$	$x_4=0,2449$	$\frac{y\ddot{u}_4}{t}=0,05$	$y\ddot{u}_4=0,0153$	$\frac{ya_4}{t}=0,008$	$ya_4=2,449 \times 10^{-3}$

$t_{opt}(2)=0,3617$ damla profili için hesaplanacak kalınlık ve uzunluk noktaları aşağıda verilmiştir.

$\frac{x_1}{t}=0,2$	$x_1=0,0723$	$\frac{y\ddot{u}_1}{t}=0,1$	$y\ddot{u}_1=0,0361$	$\frac{ya_1}{t}=0,04$	$ya_1=0,0144$
$\frac{x_2}{t}=0,4$	$x_2=0,1446$	$\frac{y\ddot{u}_2}{t}=0,11$	$y\ddot{u}_2=0,0397$	$\frac{ya_2}{t}=0,03$	$ya_2=0,0108$
$\frac{x_3}{t}=0,6$	$x_3=0,217$	$\frac{y\ddot{u}_3}{t}=0,09$	$y\ddot{u}_3=0,0325$	$\frac{ya_3}{t}=0,013$	$ya_3=5,42 \times 10^{-3}$
$\frac{x_4}{t}=0,8$	$x_4=0,289$	$\frac{y\ddot{u}_4}{t}=0,05$	$y\ddot{u}_4=0,0180$	$\frac{ya_4}{t}=0,008$	$ya_4=2,89 \times 10^{-3}$

$t_{opt}(3)=0,2838$ damla profili için hesaplanacak kalınlık ve uzunluk noktaları aşağıda verilmiştir.

$\frac{x_1}{t}=0,2$	$x_1=0,0567$	$\frac{y\ddot{u}_1}{t}=0,1$	$y\ddot{u}_1=0,0283$	$\frac{ya_1}{t}=0,04$	$ya_1=0,0113$
$\frac{x_2}{t}=0,4$	$x_2=0,1135$	$\frac{y\ddot{u}_2}{t}=0,11$	$y\ddot{u}_2=0,0312$	$\frac{ya_2}{t}=0,03$	$ya_2=8,514 \times 10^{-3}$
$\frac{x_3}{t}=0,6$	$x_3=0,1702$	$\frac{y\ddot{u}_3}{t}=0,09$	$y\ddot{u}_3=0,0255$	$\frac{ya_3}{t}=0,013$	$ya_3=4,257 \times 10^{-3}$
$\frac{x_4}{t}=0,8$	$x_4=0,2270$	$\frac{y\ddot{u}_4}{t}=0,05$	$y\ddot{u}_4=0,01419$	$\frac{ya_4}{t}=0,008$	$ya_4=2,27 \times 10^{-3}$

$t_{opt}(4)=0,224$ damla profili için hesaplanacak kalınlık ve uzunluk

noktaları aşağıda verilmiştir.

$\frac{x_1}{t}=0,2$	$x_1=0,0448$	$\frac{y\ddot{u}_1}{t}=0,1$	$y\ddot{u}_1=0,0224$	$\frac{ya_1}{t}=0,04$	$ya_1=7,212 \times 10^{-3}$
$\frac{x_2}{t}=0,4$	$x_2=0,0896$	$\frac{y\ddot{u}_2}{t}=0,11$	$y\ddot{u}_2=0,02464$	$\frac{ya_2}{t}=0,03$	$ya_2=6,72 \times 10^{-3}$
$\frac{x_3}{t}=0,6$	$x_3=0,1344$	$\frac{y\ddot{u}_3}{t}=0,09$	$y\ddot{u}_3=0,02016$	$\frac{ya_3}{t}=0,013$	$ya_3=3,36 \times 10^{-3}$
$\frac{x_4}{t}=0,8$	$x_4=0,1792$	$\frac{y\ddot{u}_4}{t}=0,05$	$y\ddot{u}_4=0,0112$	$\frac{ya_4}{t}=0,008$	$ya_4=1,792 \times 10^{-3}$

$t_{opt}(5)=0,1803$ damla profili için hesaplanacak kalınlık ve uzunluk

noktaları aşağıda verilmiştir.

$\frac{x_1}{t}=0,2$	$x_1=0,036$	$\frac{y\ddot{u}_1}{t}=0,1$	$y\ddot{u}_1=0,0180$	$\frac{ya_1}{t}=0,04$	$ya_1=7,212 \times 10^{-3}$
$\frac{x_2}{t}=0,4$	$x_2=0,0721$	$\frac{y\ddot{u}_2}{t}=0,11$	$y\ddot{u}_2=0,0198$	$\frac{ya_2}{t}=0,03$	$ya_2=5,409 \times 10^{-3}$
$\frac{x_3}{t}=0,6$	$x_3=0,10818$	$\frac{y\ddot{u}_3}{t}=0,09$	$y\ddot{u}_3=0,0162$	$\frac{ya_3}{t}=0,013$	$ya_3=2,7045 \times 10^{-3}$
$\frac{x_4}{t}=0,8$	$x_4=0,1442$	$\frac{y\ddot{u}_4}{t}=0,05$	$y\ddot{u}_4=9,015 \times 10^{-3}$	$\frac{ya_4}{t}=0,008$	$ya_4=1,442 \times 10^{-3}$

$t_{opt}(6)=0,1507$ damla profili için hesaplanacak kalınlık ve uzunluk

noktaları aşağıda verilmiştir.

$\frac{x_1}{t}=0,2$	$x_1=0,0301$	$\frac{y\ddot{u}_1}{t}=0,1$	$y\ddot{u}_1=0,01507$	$\frac{ya_1}{t}=0,04$	$ya_1=6,028 \times 10^{-3}$
$\frac{x_2}{t}=0,4$	$x_2=0,0602$	$\frac{y\ddot{u}_2}{t}=0,11$	$y\ddot{u}_2=0,0165$	$\frac{ya_2}{t}=0,03$	$ya_2=4,52 \times 10^{-3}$
$\frac{x_3}{t}=0,6$	$x_3=0,0904$	$\frac{y\ddot{u}_3}{t}=0,09$	$y\ddot{u}_3=0,0135$	$\frac{ya_3}{t}=0,013$	$ya_3=2,26 \times 10^{-3}$
$\frac{x_4}{t}=0,8$	$x_4=0,1205$	$\frac{y\ddot{u}_4}{t}=0,05$	$y\ddot{u}_4=7,535 \times 10^{-3}$	$\frac{ya_4}{t}=0,008$	$ya_4=1,205 \times 10^{-3}$

$t_{opt}(7)=0,1292$ damla profili için hesaplanacak kalınlık ve uzunluk

noktaları aşağıda verilmiştir.

$\frac{x_1}{t}=0,2$	$x_1=0,0258$	$\frac{y\ddot{u}_1}{t}=0,1$	$y\ddot{u}_1=0,01292$	$\frac{ya_1}{t}=0,04$	$ya_1=5,16 \times 10^{-3}$
$\frac{x_2}{t}=0,4$	$x_2=0,0516$	$\frac{y\ddot{u}_2}{t}=0,11$	$y\ddot{u}_2=0,0142$	$\frac{ya_2}{t}=0,03$	$ya_2=3,876 \times 10^{-3}$
$\frac{x_3}{t}=0,6$	$x_3=0,0775$	$\frac{y\ddot{u}_3}{t}=0,09$	$y\ddot{u}_3=0,0116$	$\frac{ya_3}{t}=0,013$	$ya_3=1,938 \times 10^{-3}$
$\frac{x_4}{t}=0,8$	$x_4=0,1033$	$\frac{y\ddot{u}_4}{t}=0,05$	$y\ddot{u}_4=6,46 \times 10^{-3}$	$\frac{ya_4}{t}=0,008$	$ya_4=1,034 \times 10^{-3}$

$t_{opt}(8)=0,1129$ damla profili için hesaplanacak kalınlık ve uzunluk

noktaları aşağıda verilmiştir.

$\frac{x_1}{t}=0,2$	$x_1=0,0225$	$\frac{y\ddot{u}_1}{t}=0,1$	$y\ddot{u}_1=0,01129$	$\frac{ya_1}{t}=0,04$	$ya_1=4,516 \times 10^{-3}$
$\frac{x_2}{t}=0,4$	$x_2=0,0451$	$\frac{y\ddot{u}_2}{t}=0,11$	$y\ddot{u}_2=0,01241$	$\frac{ya_2}{t}=0,03$	$ya_2=3,387 \times 10^{-3}$
$\frac{x_3}{t}=0,6$	$x_3=0,0677$	$\frac{y\ddot{u}_3}{t}=0,09$	$y\ddot{u}_3=0,01016$	$\frac{ya_3}{t}=0,013$	$ya_3=1,6933 \times 10^{-3}$
$\frac{x_4}{t}=0,8$	$x_4=0,0903$	$\frac{y\ddot{u}_4}{t}=0,05$	$y\ddot{u}_4=5,645 \times 10^{-3}$	$\frac{ya_4}{t}=0,008$	$ya_4=9,032 \times 10^{-4}$

$t_{opt}(9)=0,1001$ damla profili için hesaplanacak kalınlık ve uzunluk

noktaları aşağıda verilmiştir.

$\frac{x_1}{t}=0,2$	$x_1=0,02002$	$\frac{y\ddot{u}_1}{t}=0,1$	$y\ddot{u}_1=0,01001$	$\frac{ya_1}{t}=0,04$	$ya_1=4,004 \times 10^{-3}$
$\frac{x_2}{t}=0,4$	$x_2=0,04004$	$\frac{y\ddot{u}_2}{t}=0,11$	$y\ddot{u}_2=0,01101$	$\frac{ya_2}{t}=0,03$	$ya_2=3,003 \times 10^{-3}$
$\frac{x_3}{t}=0,6$	$x_3=0,06006$	$\frac{y\ddot{u}_3}{t}=0,09$	$y\ddot{u}_3=9,009 \times 10^{-3}$	$\frac{ya_3}{t}=0,013$	$ya_3=1,5015 \times 10^{-3}$
$\frac{x_4}{t}=0,8$	$x_4=0,08008$	$\frac{y\ddot{u}_4}{t}=0,05$	$y\ddot{u}_4=5,005 \times 10^{-3}$	$\frac{ya_4}{t}=0,008$	$ya_4=8,008 \times 10^{-4}$

$t_{opt}(10)=0,0899$ damla profili için hesaplanacak kalınlık ve uzunluk

noktaları aşağıda verilmiştir.

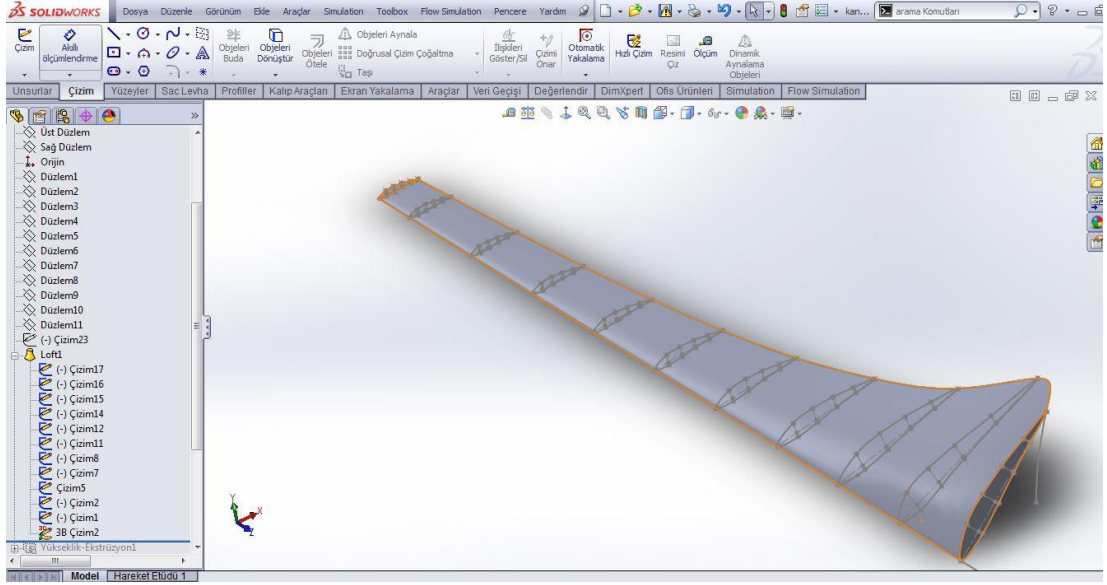
$\frac{x_1}{t}=0,2$	$x_1=0,0179$	$\frac{y\ddot{u}_1}{t}=0,1$	$y\ddot{u}_1=8,99 \times 10^{-3}$	$\frac{ya_1}{t}=0,04$	$ya_1=3,596 \times 10^{-3}$
$\frac{x_2}{t}=0,4$	$x_2=0,0359$	$\frac{y\ddot{u}_2}{t}=0,11$	$y\ddot{u}_2=9,889 \times 10^{-3}$	$\frac{ya_2}{t}=0,03$	$ya_2=2,697 \times 10^{-3}$
$\frac{x_3}{t}=0,6$	$x_3=0,0539$	$\frac{y\ddot{u}_3}{t}=0,09$	$y\ddot{u}_3=8,091 \times 10^{-3}$	$\frac{ya_3}{t}=0,013$	$ya_3=1,348 \times 10^{-3}$
$\frac{x_4}{t}=0,8$	$x_4=0,0719$	$\frac{y\ddot{u}_4}{t}=0,05$	$y\ddot{u}_4=4,495 \times 10^{-3}$	$\frac{ya_4}{t}=0,008$	$ya_4=7,192 \times 10^{-4}$

$t_{opt}(11)=0,0856$ damla profili için hesaplanacak kalınlık ve uzunluk

noktaları aşağıda verilmiştir.

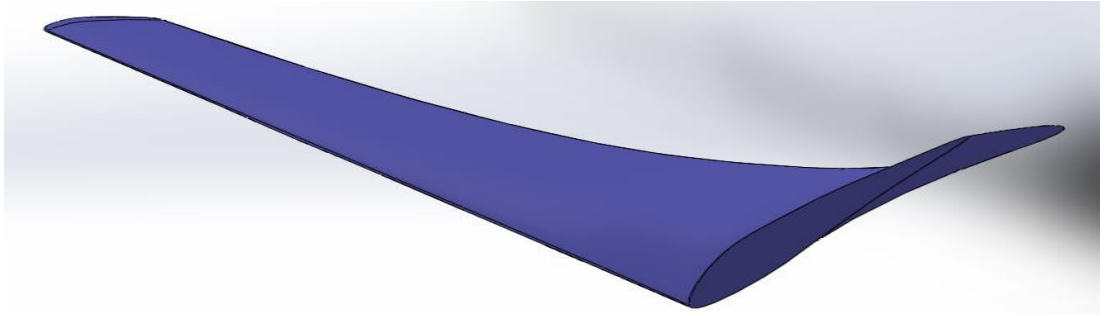
$\frac{x_1}{t}=0,2$	$x_1=0,0171$	$\frac{y\ddot{u}_1}{t}=0,1$	$y\ddot{u}_1=8,56 \times 10^{-3}$	$\frac{ya_1}{t}=0,04$	$ya_1=3,424 \times 10^{-3}$
$\frac{x_2}{t}=0,4$	$x_2=0,0342$	$\frac{y\ddot{u}_2}{t}=0,11$	$y\ddot{u}_2=9,416 \times 10^{-3}$	$\frac{ya_2}{t}=0,03$	$ya_2=2,568 \times 10^{-3}$
$\frac{x_3}{t}=0,6$	$x_3=0,0513$	$\frac{y\ddot{u}_3}{t}=0,09$	$y\ddot{u}_3=7,704 \times 10^{-3}$	$\frac{ya_3}{t}=0,013$	$ya_3=1,284 \times 10^{-3}$
$\frac{x_4}{t}=0,8$	$x_4=0,0684$	$\frac{y\ddot{u}_4}{t}=0,05$	$y\ddot{u}_4=4,28 \times 10^{-3}$	$\frac{ya_4}{t}=0,008$	$ya_4=6,848 \times 10^{-4}$

NACA 4415 Profili, ($\lambda_D=7$, $R=2$, $a_D=5^\circ$, $Z=3$) değerleri için her düzlemdeki damla profillerinin kalınlık ve uzunluk noktaları tek tek hesaplanarak bulunmuştur.



Şekil 7.2: NACA 4415 2 metrelik kanat şekli.

Şekil 7.2’de 2 m uzunluğunda NACA 4415 profilli, $\lambda_D=7$, $a_D = 5^\circ$, $Z=3$ dizayn şartlarında hesaplanan değerler sonucunda Solidworks bilgisayar programında yapılan modelin iki boyutlu damla profillerinin çizimleri katı modelin üzerinde gösterilmekte ve kök bağlantısız katı modeli görülmektedir.

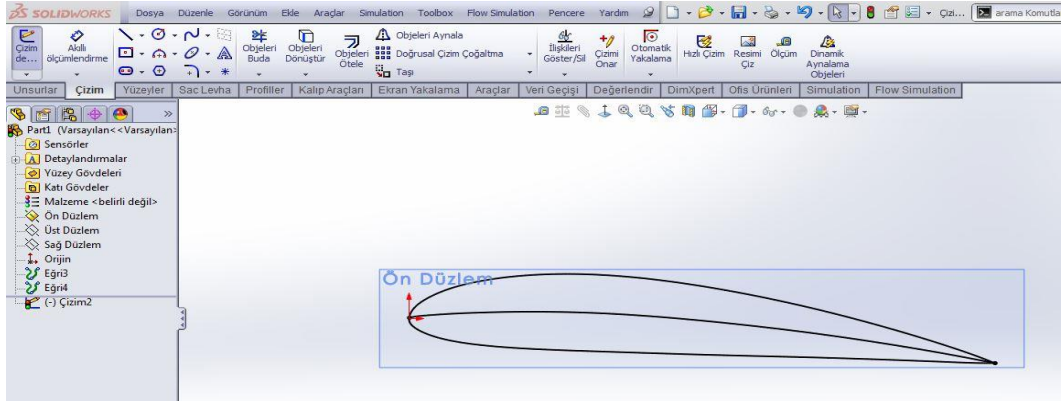


Şekil 7.3: NACA 4415 2 metrelik kanat katı şekli farklı görünüşü.

Şekil 7.3’de 2 m uzunluğunda NACA 4415 profilli, $\lambda_D=7$, $a_D = 5^\circ$, $Z=3$ dizayn şartlarında hesaplanan değerler sonucunda Solidworks bilgisayar programında yapılan katı modelin farklı açıdan görünüşü verilmektedir.

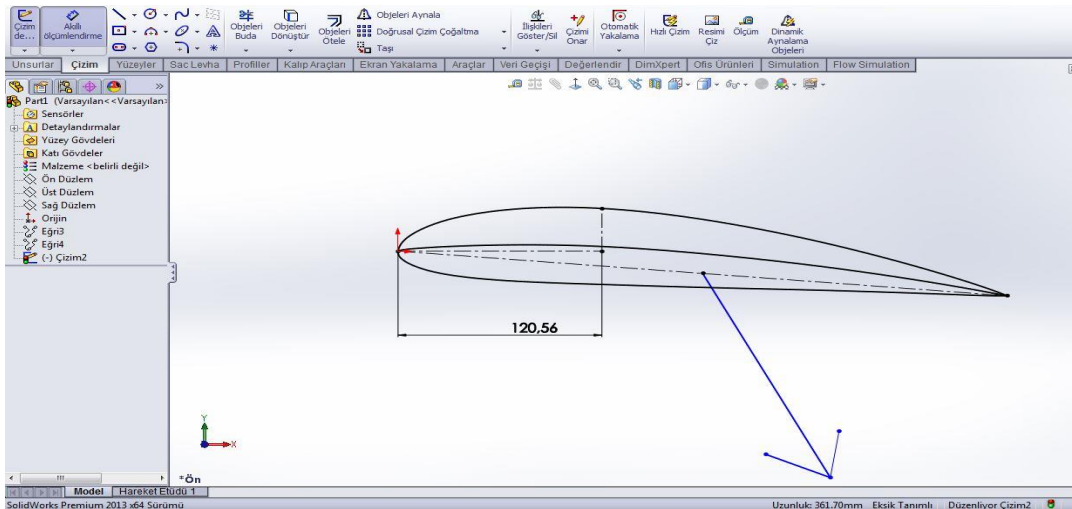
Teorik olarak hesaplanan değerler neticesinde kanat çizilerek katı formu oluşturulmuş bulunmaktadır. Bu kanatın farklı noktadaki değerlerini karşılaştırmak için airfoiltools internet sitesinden NACA 4415 kanat profilinin 5° derecelik hücum

Şekil 7.6’da edilen bu şekil şuanda herhangi bir düzlem üzerinde değildir. Bu yüzden bu profili “Objeleri Dönüştür” komutu ile profli çizmek istediğimiz düzlem üzerine aktarıyoruz. Aktardıktan sonra şeklin kendisini “Gizle” komutu ile gizleyebiliriz.



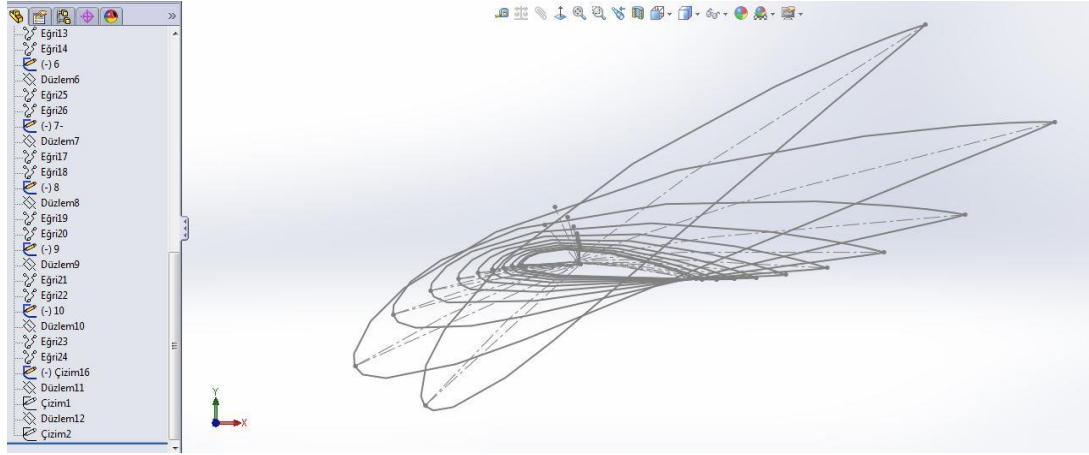
Şekil 7.7: Kanat damla profili.

Kanadın formunda eğer kıvrılma olacak ise düzlemlere çizilecek olan her profil, kendileri için belirlenen bir nokta etrafında belirlenen açı kadar döndürülürler ve bu nokta tüm düzlemler üzerinde doğru bir eksen olarak kalır. Bu eksene “twist axial” denir. NACA 4415 profili için yapılan literatür araştırması sonucunda bu eksenin chord uzunluğunun % 30’ u kadar olduğu belirlenmiştir. Şekil 7.8’de profil için bu değer 120.56 mm’ dir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta chord uzunluğunu belirten doğru ile twist axial noktasını belirlemek için çizilen diğer doğrunun birbirlerine dik olduklarıdır. Bu diklik devamlı olarak sağlanmalıdır.



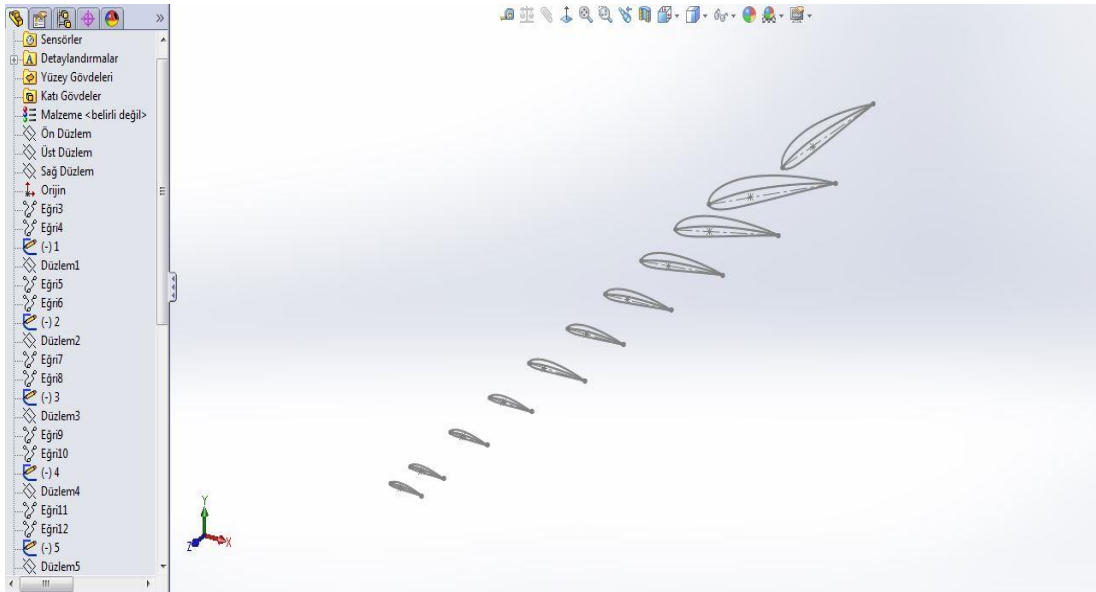
Şekil 7.8: Twist axial noktası.

Bir sonraki düzelem üzerine de hesaplanan boyutlardaki profil aktarılıp çizimi yapılır ve profillerin belirlenen twist açısında döndürülmesine geçilir. “ Taşı “ komutu altındaki “ Döndür “ komutu ile tüm düzlemler üzerine çizdiğimiz diğer çizgiler seçilerek döndürülür.

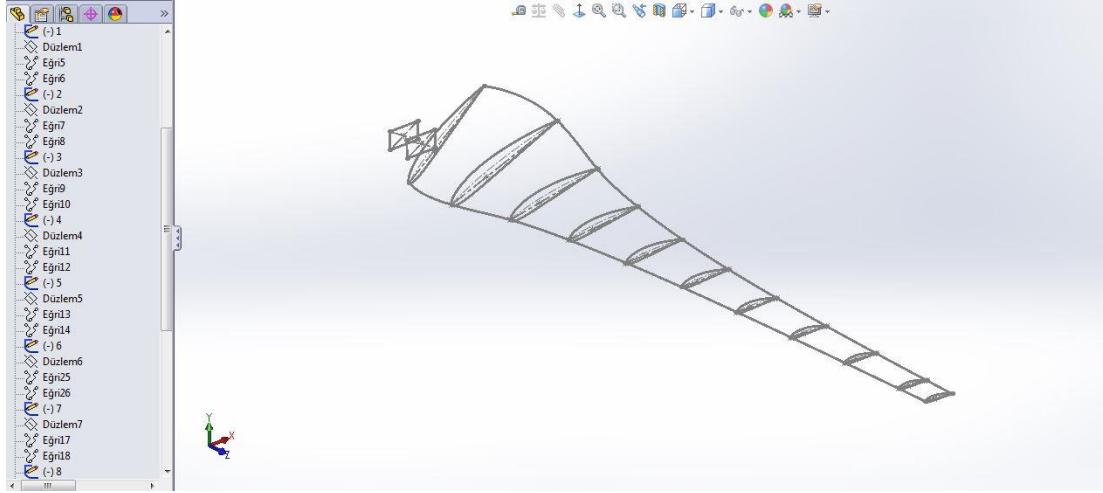


Şekil 7.9: Kanat damla profilinin döndürülmesi.

Döndürme işlemi tamamlandıktan sonra, döndürme işleminde kullandığımız dönme merkezi olan noktalar her profil için birbiri ile çakıştırılarak twist axial oluşturulur. Tüm profiller bu şekilde çizilip döndürüldükten sonra twist axial üzerinde konumlandırılıp kanat çizimi tamamlanır. Şekil 7.9’da kanat çizimi tamamlanmıştır.

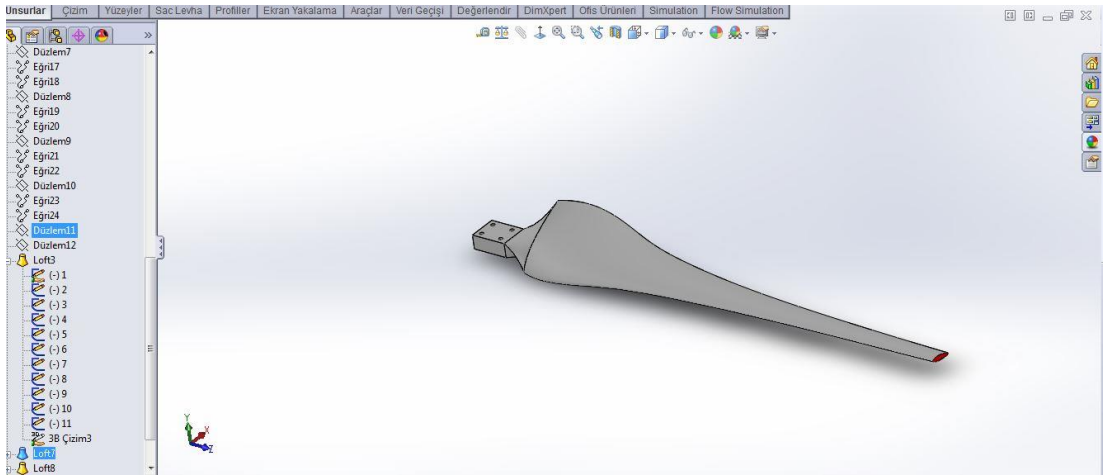


Şekil 7.10: Farklı açılarda kanat görünümü.



Şekil 7.11: Farklı açılarda kanat görünümü ve kök bağlantısı.

Daha sonra “ Loft ile Katı Oluştur “ komutu ile profillere sırayla tıklanmak suretiyle kanat yapısı oluşturulur. Şekil 7.12’de görüldüğü gibi kanat katı formu Solidworks programı kullanılarak 2 metre uzunluğundaki rüzgar türbini kanatı oluşturulmuştur.

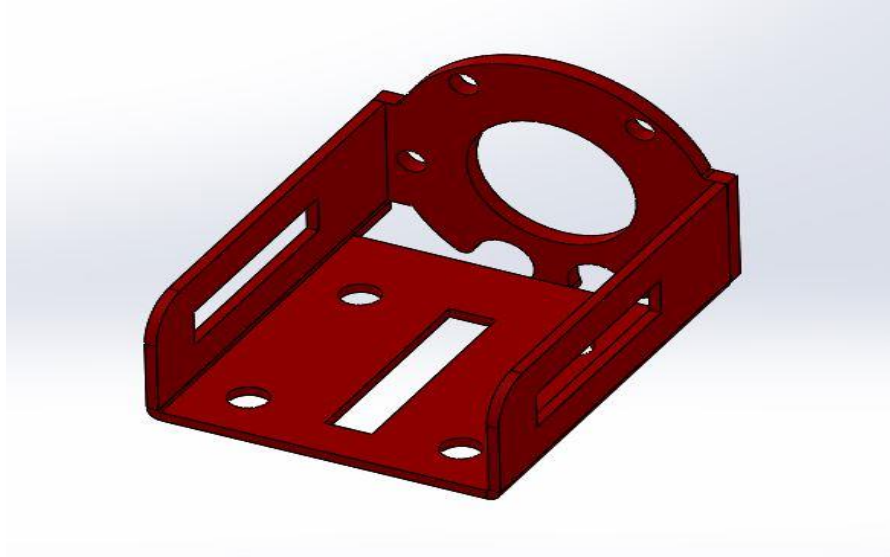


Şekil 7.12: Kanadın loft edilmiş hali.

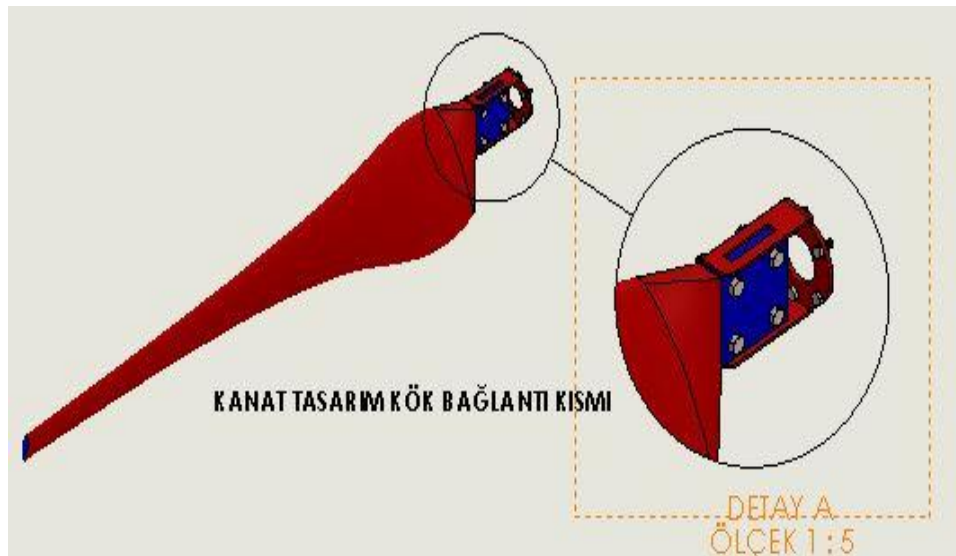
İki farklı yöntem kullanılarak 2 metre uzunluğunda NACA 4415 kanat tasarımı gerçekleştirilmiş bulunmaktadır. İki kanat tasarımının katı modellerinden değişik noktalarından alınan düzlemlerin ölçüleriyle teorik olarak hesaplanan ölçüleri karşılaştırıldığında sapmanın çok az olduğu görülmüştür. Bu işlem ile yapmış olduğumuz kanat tasarımının doğruluğunu kanıtlamaktadır.

7.6 Kanat Kök Bağlantı Montaj Sacı

Kanatın rüzgar türbini rotoru yani hup kısmına bağlanması için dizayn edilen parçadır 2 adet sac parçadan meydana gelmektedir. Şekil 7.13'de görülmektedir tasarlanan parça. Şekil 7.14'de ise kanat kök bağlantı sacı ile kanat montaj resmi verilmektedir.



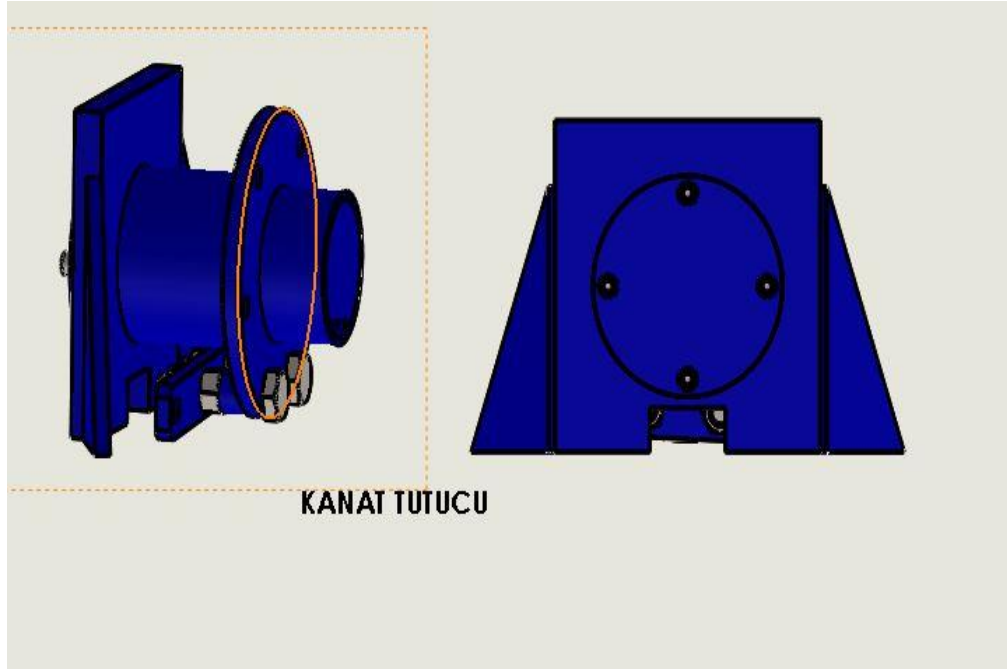
Şekil 7.13: Kanat kök bağlantı sacı.



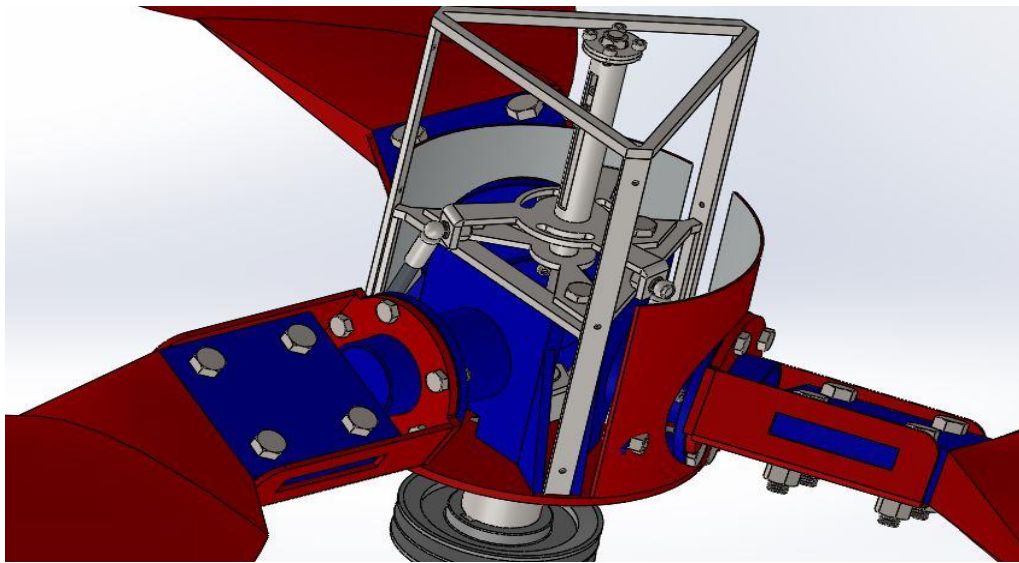
Şekil 7.14: Kanat kök bağlantı sacı ile kanat montajı.

7.7 Kanat Tutucu

Rüzgar türbini kanatının tasarlanan kanat kök bağlantı sacı parçası ile rotor kısmına bağlanmasını sağlayan parçadır. Bu parça Şekil 7.15’de iki farklı görünüş olarak verilmektedir. Şekil 7.16’da ise kanat kök bağlantısı ile birlikte rotora bağlandığı kanat tutucu montaj resmi verilmektedir.



Şekil 7.15: Kanat kök bağlantısı ile birlikte rotora bağlandığı kanat tutucusu.

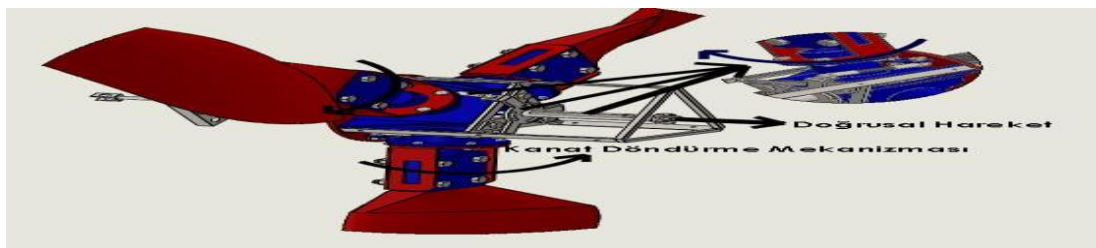


Şekil 7.16: Kanat kök bağlantısı ile rotora bağlandığı kanat tutucusu montajı.

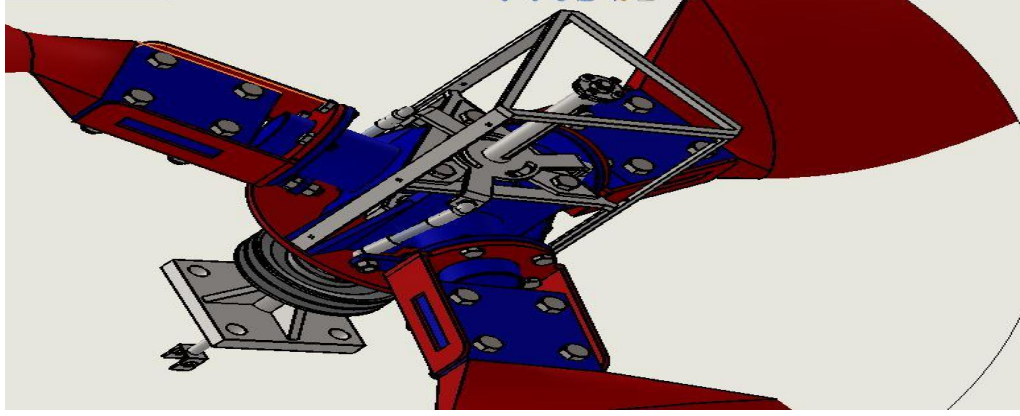
7.8 Kanat Döndürme Mekanizması

Rüzgar türbininin ve kanadının aşırı rüzgarlardan zarar görmemesini, rüzgar türbini bakım zamanlarında yani rotorun dönmesinin istenmediği zamanlarda ve aynı zamanda optimum verimi yakalamak için tasarlanmış kısımdır. 3 kW'lık rüzgar türbini için seçilen 3.5 kW'lık daimi mıknatıslı senkron alternatör etiket gücünü 400 rpm vermektedir. 12-13 m/s rüzgar hızında bu gücü elde edecek şekilde tasarlanan bu rüzgar türbini bu rüzgar şiddetlerin üzerinde olduğu zamanlarda kanat döndürme mekanizması devreye girerek kanatı programlanan açılarda döndürerek optimum verimi almaya aynı zamanda rüzgar türbinine herhangi bir zarar gelmemesi için tasarlanmış kısımdır. Bu döndürme mekanizması Elektrikli Linear Aktüatör Motor sayesinde çalışmaktadır. Bu Linear Aktüatör Motor programlanabilen bir üründür ve piyasada hazır satılmaktadır.

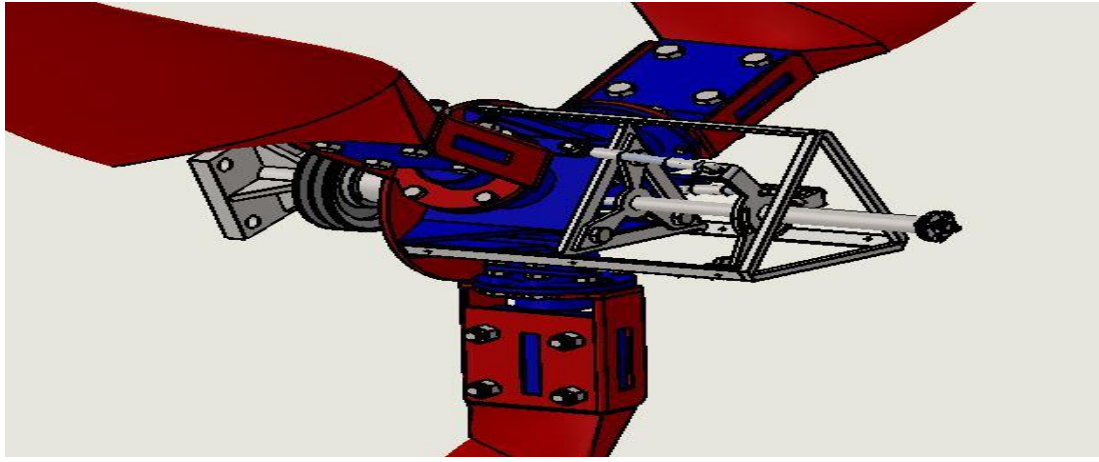
Biz bu ürünü rotor devri parametresi ile programlayarak uygulamayı seçmiş bulunmaktayız. Rotor devri programlanan değerinin üzerine çıktığı zaman Elektrikli Linear Aktüatör devreye girerek mil strokunu artırır bu doğrusal hareketi dizayn edilen döndürme mekanizması sayesinde dairesel harekete çevirerek kanatların döndürmesini sağlayacaktır. Bu uygulama ile birlikte küçük güçlü rüzgar türbinleride kanat açısı kontrol sistemlerine yeni bir uygulama kazandırılmış bulunmaktayızdır. Elektrikli linear aktüatör motor 2000-2250 N yükü kaldıracak şekilde kataloglardan seçilmiştir. 12 V ve 24 V ile çalışan modelleri mevcuttur biz buradan 12 V ile çalışana seçtik. Bizim bu çalışmada yaptığımız dizyanda Linear Aktüatör Motor mili 126.5 mm açıldığında kanatlar tam 90° dönmüş bulunmaktadır bu yüzden biz Linear Aktüatör Motor strokunu seçerken katalog değerlerinden 151-200 mm olanı seçmiş bulunmaktayızdır. Şekil 7.17'de kanat döndürme mekanizmasının montaj şeklini, doğrusal hareket ve dairesel hareket dönüş yönleri gösterilmektedir.



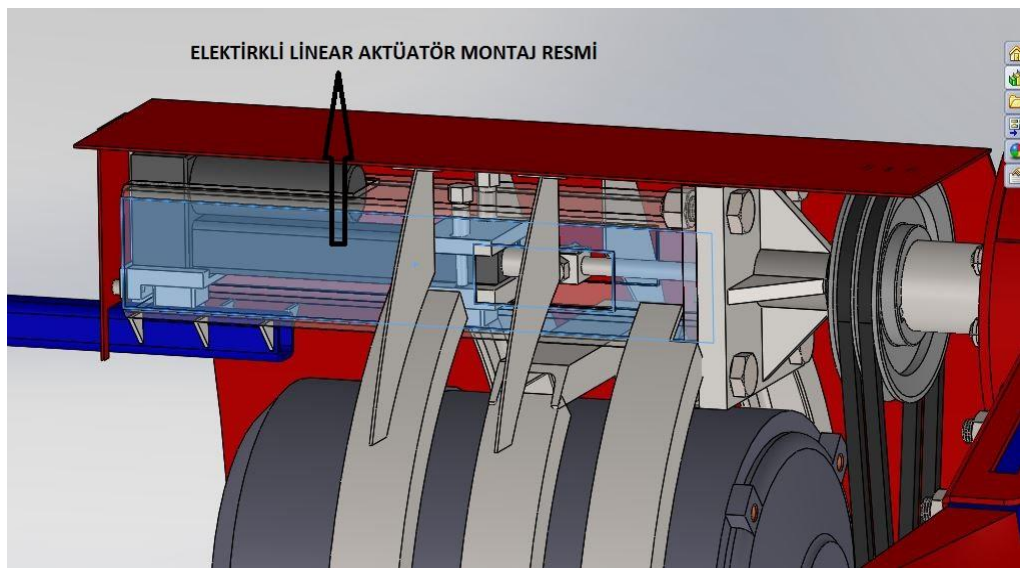
Şekil 7.17: Kanat döndürme mekanizması.



Şekil 7.18: Kanat döndürme mekanizması farklı açıdan görünüşü.



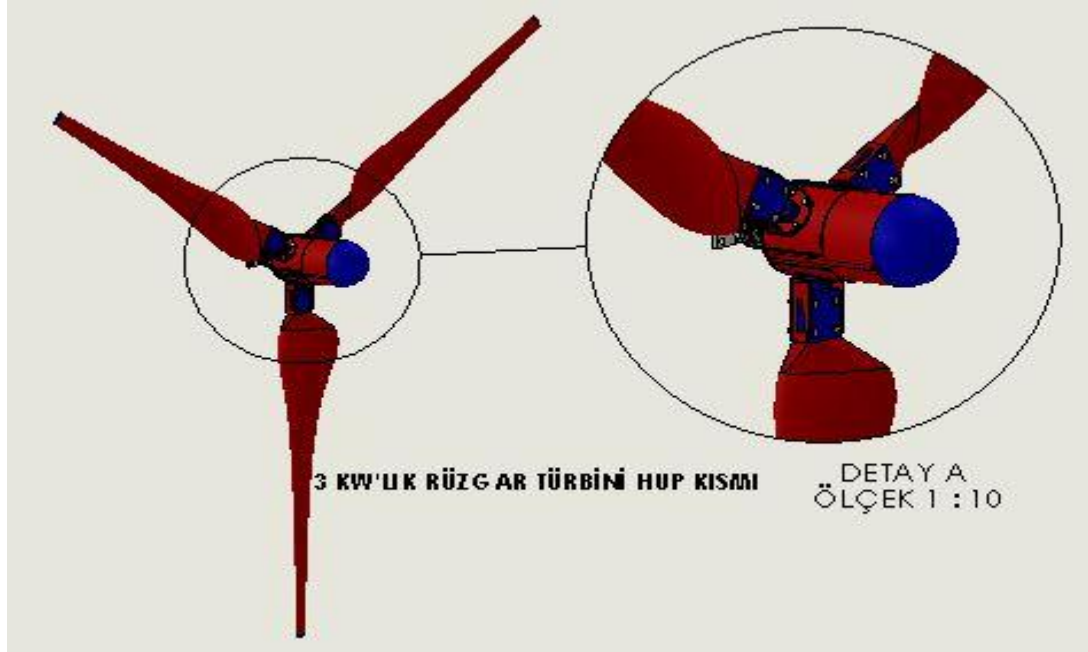
Şekil 7.19: Kanat döndürme mekanizması 90° dönmüş hali.



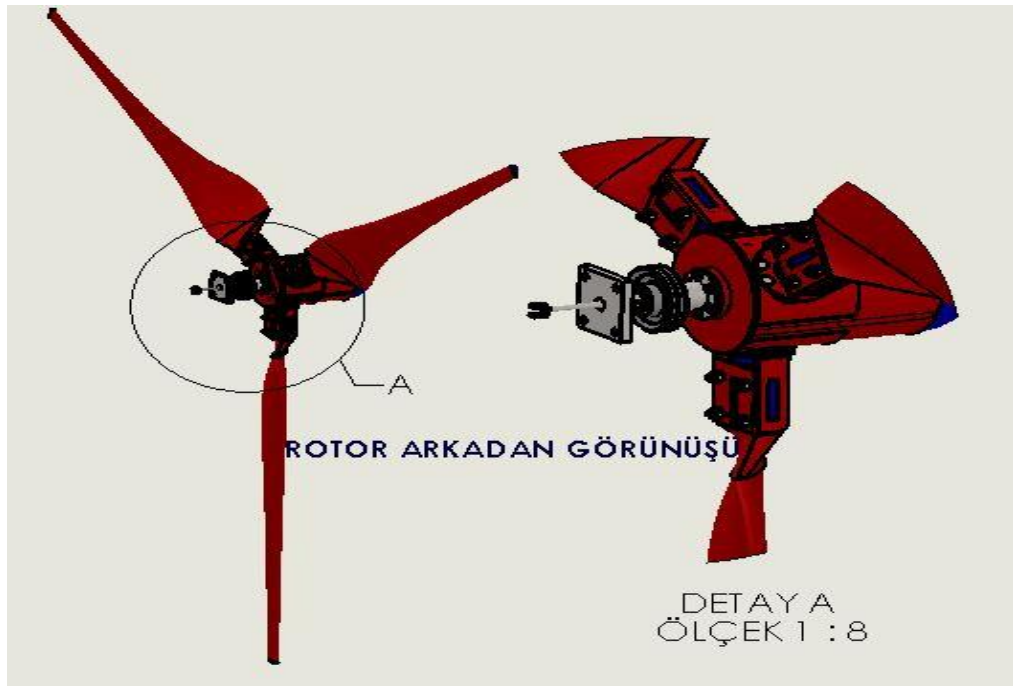
Şekil 7.20: Elketirikli linear aktüatör montajı.

7.9 Rotor (Hup) Montajı

Kanatlar rüzgârı yakalar ve onun gücünü rotora aktarır. Rotor şaft vasıtasıyla alternatöre gönderen en dış birimdir. Bizim tasarlamış olduğumuz 3 kW'lık küçük güçlü rüzgar türbininin hup montajı Şekil 7.21'de görülmektedir.



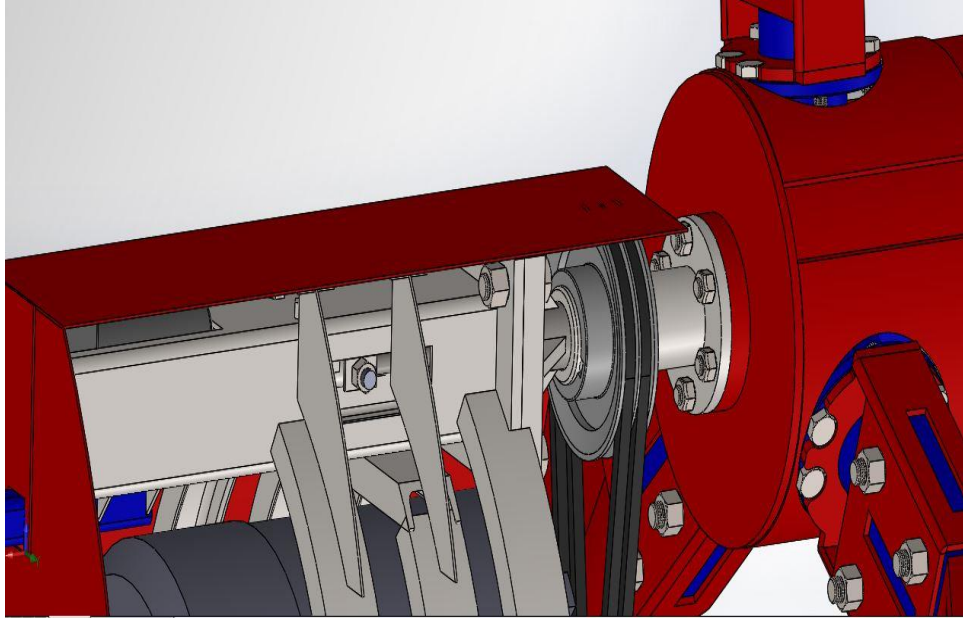
Şekil 7.21: Rotor önden görünüşü.



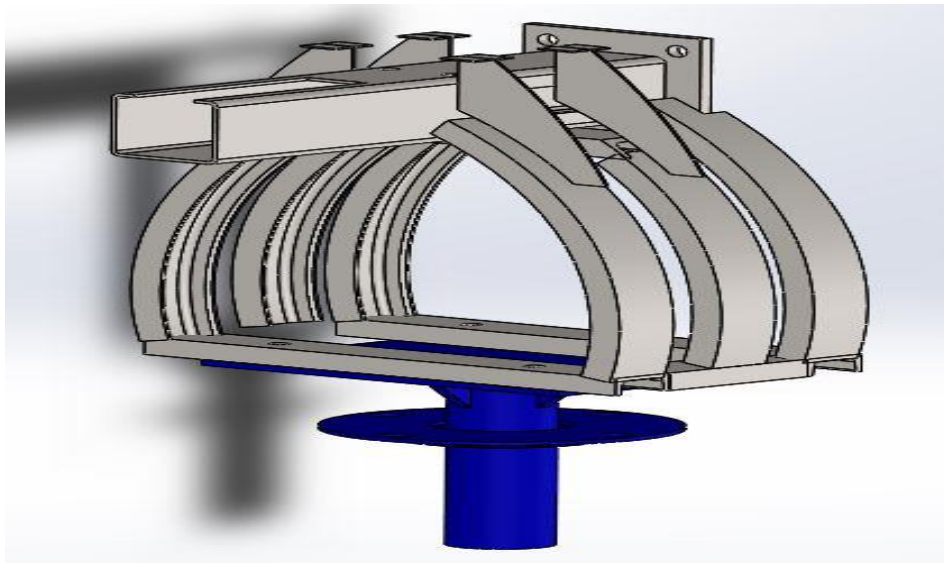
Şekil 7.22: Rotor arkadan görünüşü.

7.10 Rüzgar Türbini Gövde Montajı

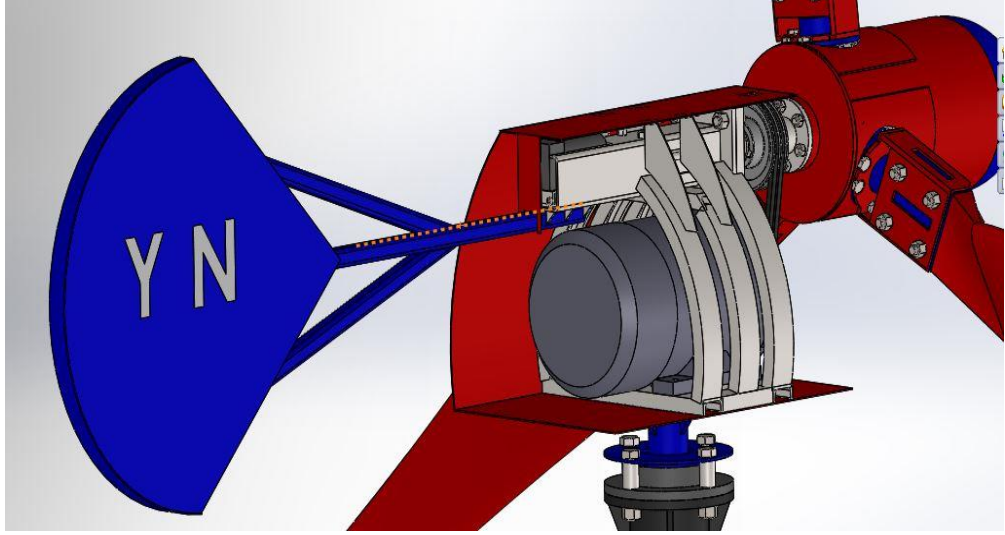
Solidworks bilgisayarlı tasarım programı kullanılarak tasarlanan rüzgar türbini bileşenlerinin rotor, alternatör, linear aktüatör, yan gövdeler, kuyruk, direk montajı parçalarının ve direğin Solidworks programının montaj kısmı kullanılarak 3 kW'lık küçük güçlü rüzgar türbininin montajı yapılmış olarak resimleri Şekil 7.23 ve Şekil 7.31 arasında tek tek verilmektedir .



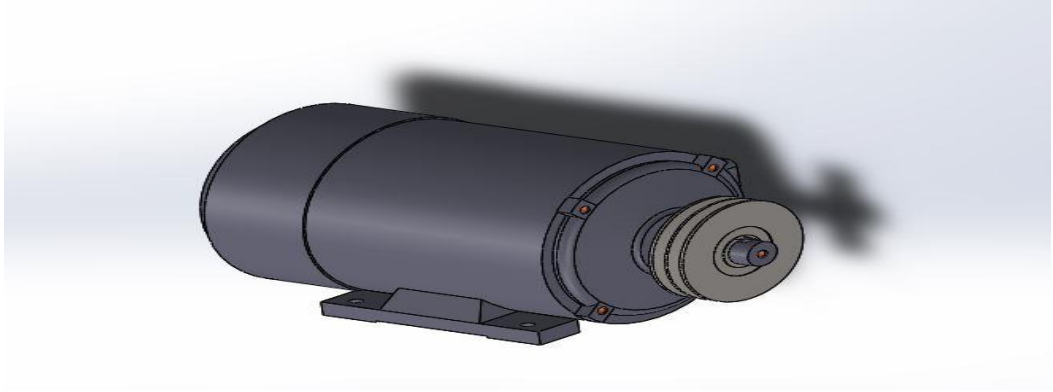
Şekil 7.23: Rotor gövde montajı.



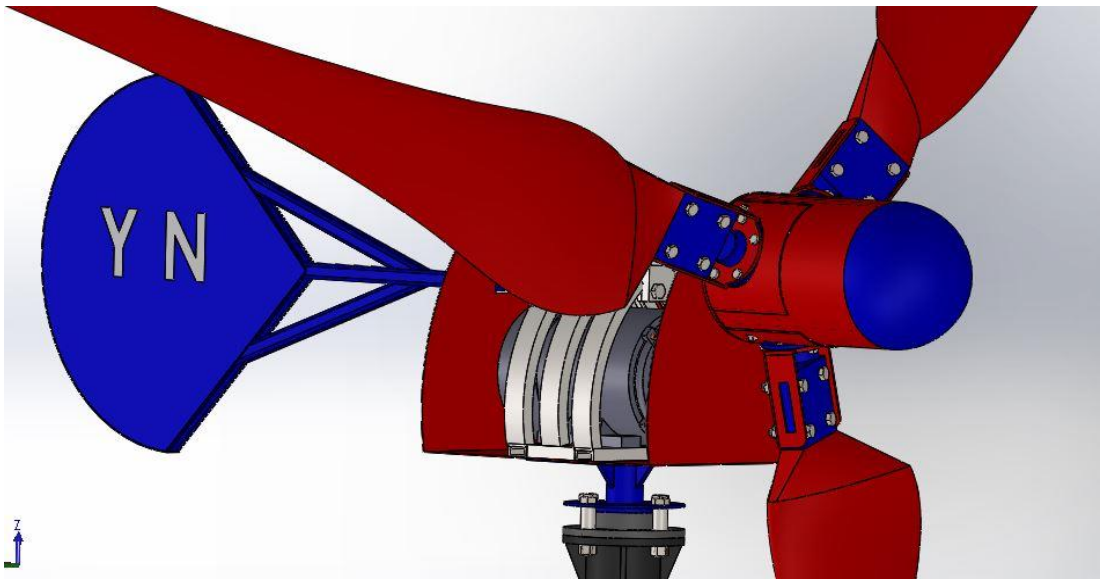
Şekil 7.24: Gövde iskelet montajı.



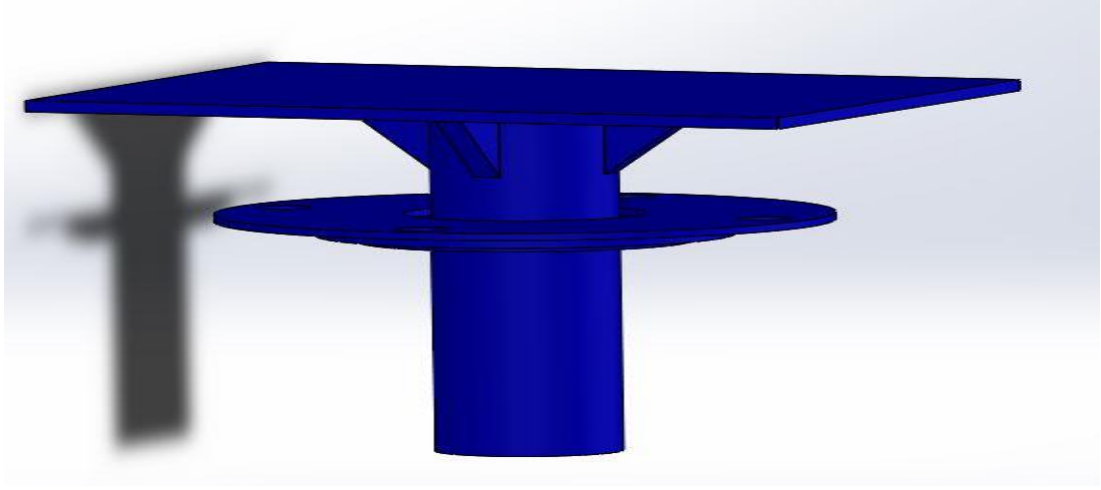
Şekil 7.25: Alternatör ve kuyruk gövde montajı.



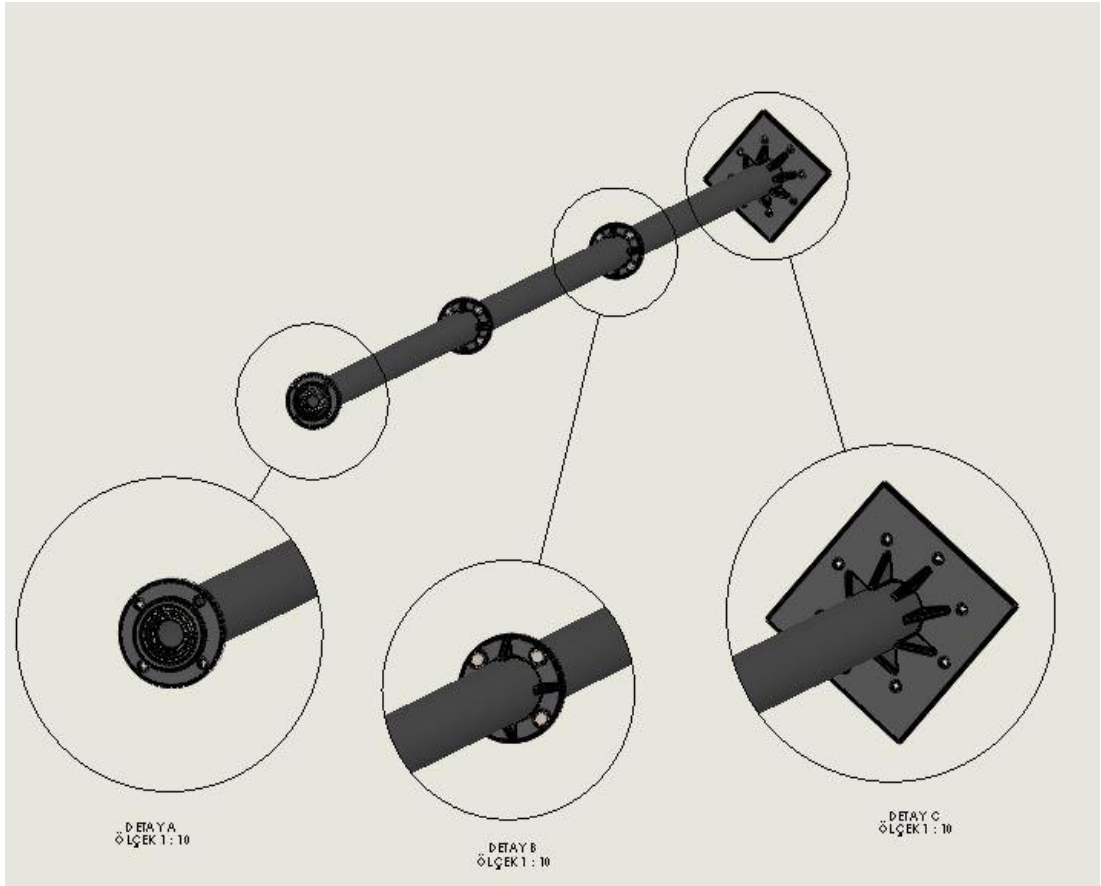
Şekil 7.26: 3.5 kW'lık Daimi mıknatıslı senkron alternatör kasnak montajı.



Şekil 7.27: Gövdenin direk ile montajı.



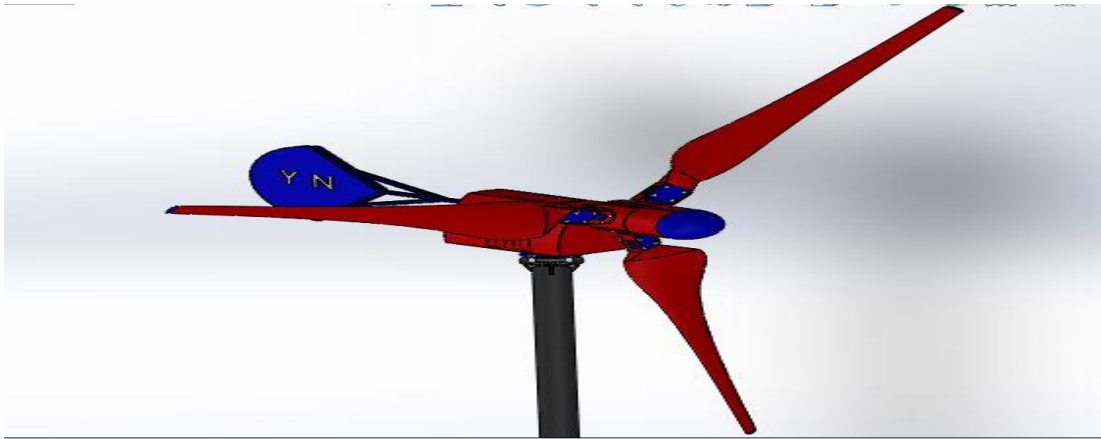
Şekil 7.28: Gövdenin direk ile montaj ara parçası.



Şekil 7.29: 5'' Siyah borudan oluşan 12 metrelik direk montajı.



Şekil 7.30: 3 kW'lık rüzgar türbini montajı.



Şekil 7.31: 3 kW'lık rüzgar türbini montajının farklı görünüşü.

Yatay eksenli küçük güçlü rüzgar türbinin temel öğeleri yukarıda tek tek detay resimleri ile birlikte verilerek montajı gösterilmiştir. Bunları tekrardan sayacak olursak kanatlar, alternatör, rotor, gövde, kayış kasnak sistemi, fren, kuyruk ve direk olarak en genel halde sayabiliriz. Frenler sistemin gerek acil durumlarda, gerek aşırı

hızlarda durdurulması veya tanımlanan aralıklarda olan rüzgar hız ve sürelerinde sistemin devrinin tam yük altında azaltılması amacıyla kullanılmaktadır. Biz burada fren sistemi olarak kanat döndürme mekanizmasını ve alternatör uç gerilim ile frenleme olarak düşünmüş bulunmaktayızdır.

Dişli kutusu yerine kayış kasnak mekanizması seçilerek tasarlanan bu rüzgar türbini bu kasnak mekanizmasını boyutlandırmasını şu şekilde yapmıştır. Sistemimizde kullanılan daimi mıknatıslı senkron alternatör 400 d/d ulaştığında etiket gücü olarak 3.5 kW'lık bir güce sahip olduğunu ve uygun rüzgar şartlarında bu rüzgar türbininden 3 kW'lık enerji alınması planlandığını daha önce belirtilmişti. . Diğer taraftan türbinin kanat uzunluğu 2 metre olarak hesaplanmış idi. Üç kanatlı rüzgar türbinleri için kanat uç hızı oranı (tip-speed ratio) diye tanımlanan parametre λ :

$$\lambda = \frac{\omega.R}{V} \quad (7.29)$$

eşitliği ile verilir. Burada R kanat uzunluğu (yarı çapını), V rüzgar hızını göstermektedir.

$$\omega = \frac{2.\pi.n}{60} \quad (7.30)$$

Bu değeri denklem (7.29) yerine yazarsak

$$\lambda = \frac{2.\pi.n.R}{60.V} \quad (7.31)$$

şeklinde yazabiliriz. λ parametresi üç kanatlı türbinler için 6-8 arasında verilmektedir demiştik daha önce biz bunu 7 seçmiştik. Diğer taraftan sistemden beklentimiz yaklaşık 12-13 m/s civarlarında rüzgar türbininden 3 kW'lık güç elde etmektir. Burada devir parametresini çekilirse:

$$n = \frac{\lambda.60.v}{2.\pi.R} \quad (7.32)$$

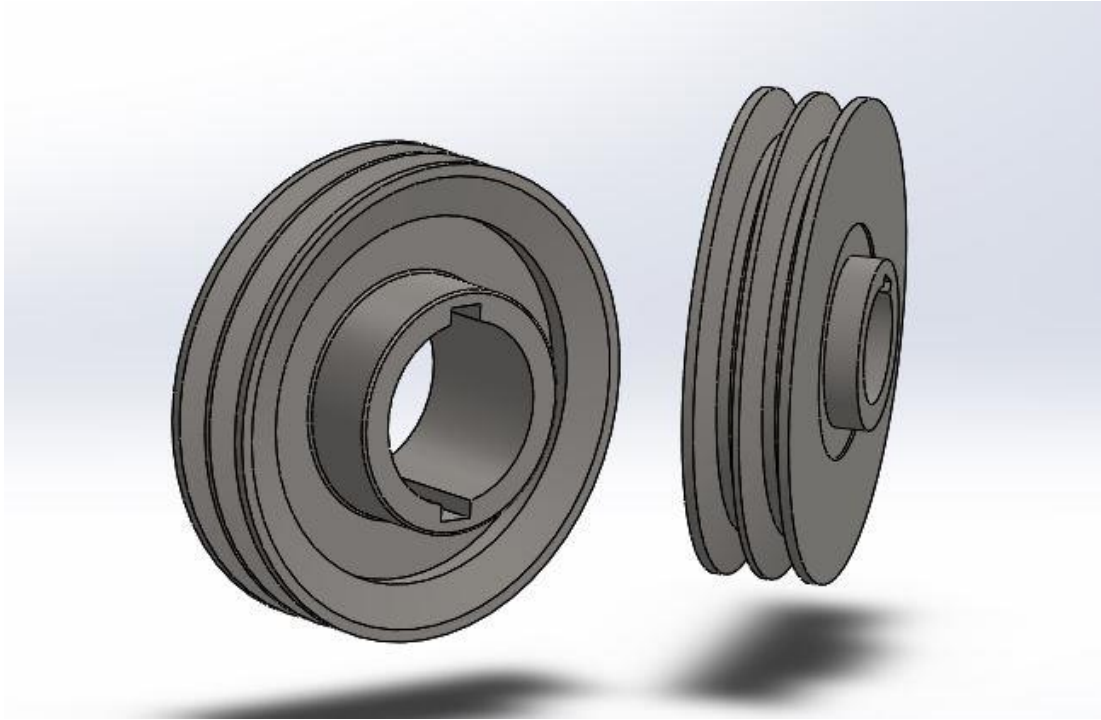
$$n = \frac{7.60.12}{2.\pi.2} = 401.07 \text{ d/d sonucu çıkar.}$$

$$n = \frac{7.60.13}{2.\pi.2} = 434.4 \text{ d/d sonucu çıkar. Buradan kasnak oranı}$$

$$k_o = \frac{400}{401.07} = 0.997$$

$$k_o = \frac{400}{434.4} = 0.920$$

Biz bu değerlere kıyasla 1 seçmiş bulunmaktayız kasnak oranı. Bu hesaplamalar sonucunda 3 kW'lık küçük güçlü rüzgar türbininin teorik hesaplamaları bitmiş bulunmaktadır. Şekil 7.32 3 Kw'lık küçük güçlü rüzgar türbininde kullanılan kasnaklar verilmiştir.

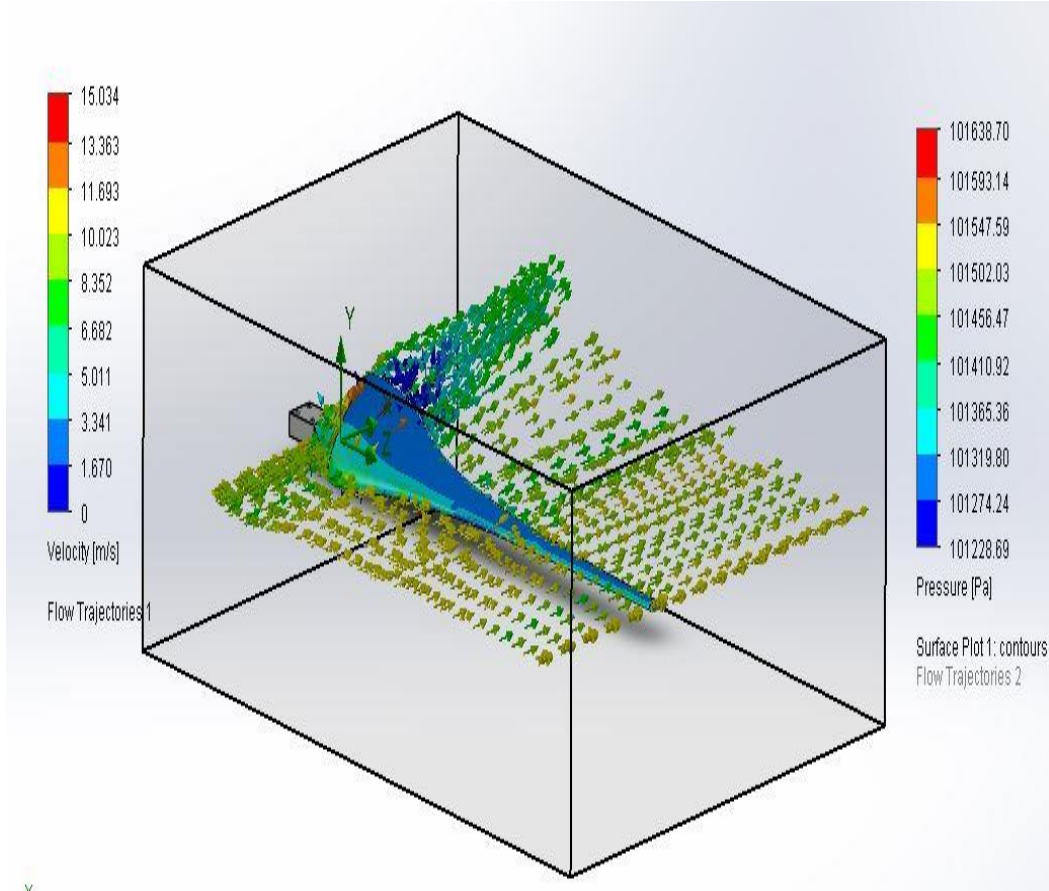


Şekil 7.32: 3 kW'lık küçük güçlü rüzgar türbininde kullanılan kasnaklar.

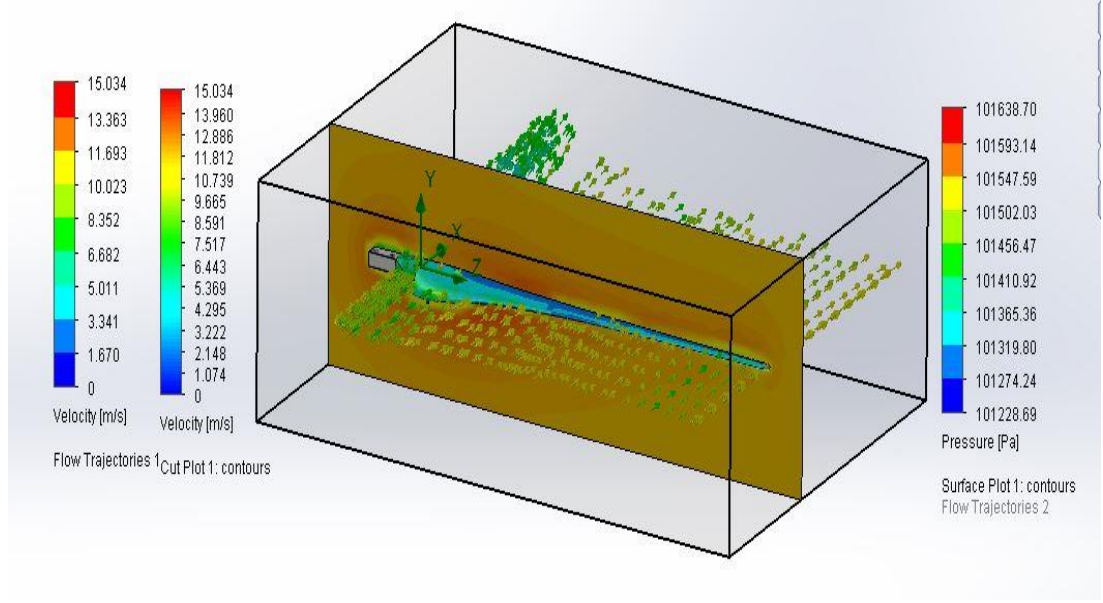
8. AKIŞ, STATİK, TİTREŞİM VE BURKULMA ANALİZİ

8.1 Tek Kanatın Akış ve Statik Analizi

Solidworks'de Flow Simulation modülünü kullanarak kanat üzerinde akış analizi yapılmıştır. Solidworks programında Akış ve statik analiz nasıl yapılır ve bu analizlerin adımları nelerdir rotor analizinde tek tek anlatılacaktır. Tek kanat üzerinde yapılan 12 m/s rüzgar şiddetinde yapılan akış analizi sonucunda en yüksek basınç 101638.70 Pa olarak çıktı ve en yüksek hız 15.034 m/s olarak bulundu. Şekil 8.1 ve Şekil 8.2'de tek kanat üzerinde 12 m/s rüzgar şiddetinde hız ve basınç dağılımı görsel olarak verilmektedir.

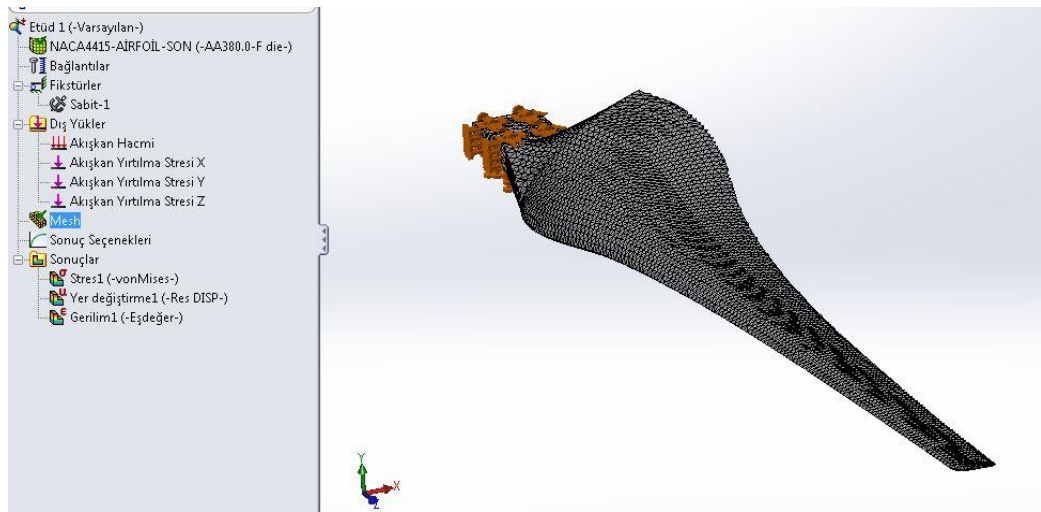


Şekil 8.1: Tek kanat üzerinde 12 m/s rüzgar şiddetinde hız ve basınç dağılımı.

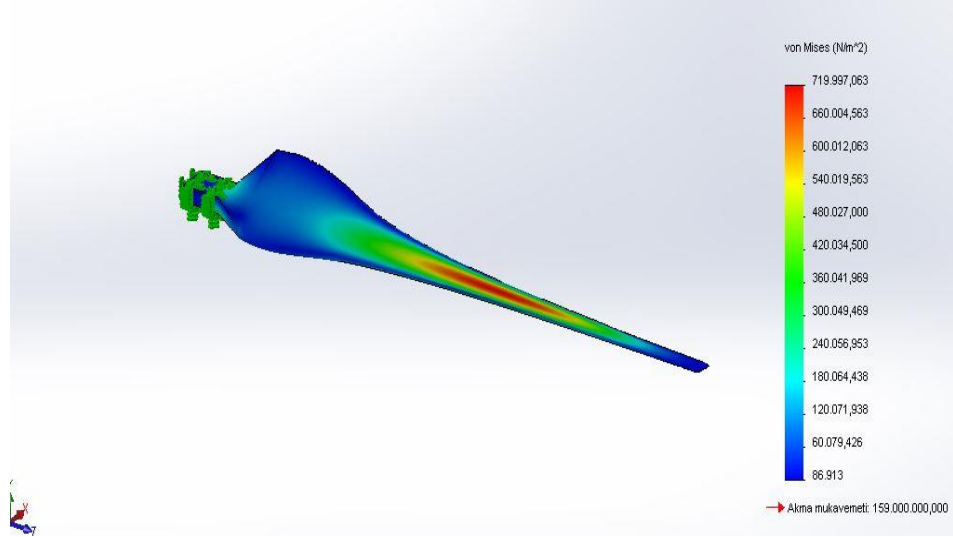


Şekil 8.2: Tek kanat üzerinde 12 m/s rüzgar şiddetinde hız ve basınç dağılımını düzlem üzerinde ve kanat üzerinde görünüşü.

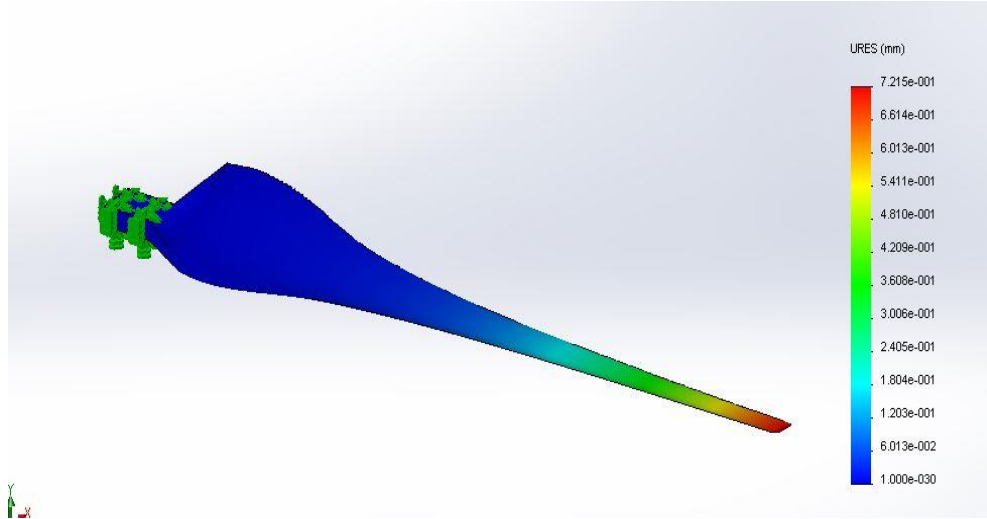
Akış analizi sonucu elde edilen veriler yani basınçlar ile kanadın statik analizi yapıldı. Solidworks simulation komutu kullanılarak yapılmıştır bu statik analiz. Burada çıkan sonuçlar Şekil 8.4, Şekil 8.5 ve Şekil 8.6’ta görsel olarak verilmektedir. Analiz yapılmadan önce kanat malzemesi olarak Alüminyum alaşımlarından AA 380.0-F die seçildi. Daha sonra mesh edildi kanat Şekil 8.3’de görüldüğü gibi. Bu statik analizi neticesinde 3 farklı sonucu görsel olarak vermiş bulunmaktayız. Bu sonuçlar Gerilim, Gerinim ve Yer değiştirmedir.



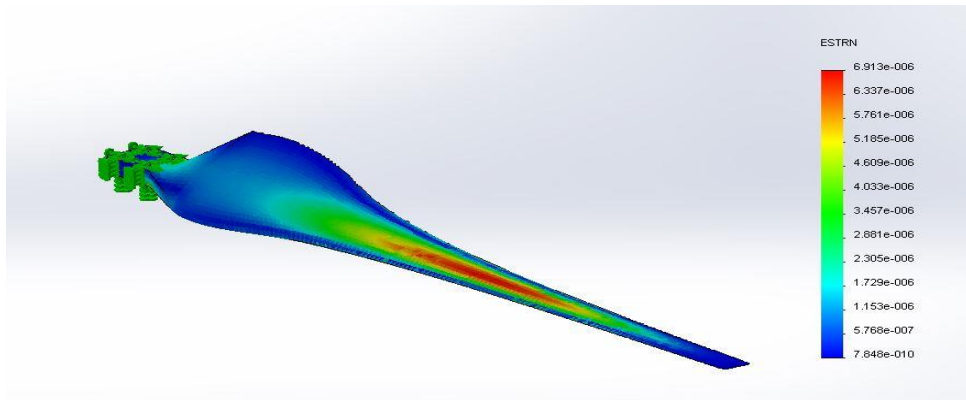
Şekil 8.3: Tek kanat üzerinde yapılan mesh işlemi.



Şekil 8.4: Kanat üzerinde gerilim sonuçları.

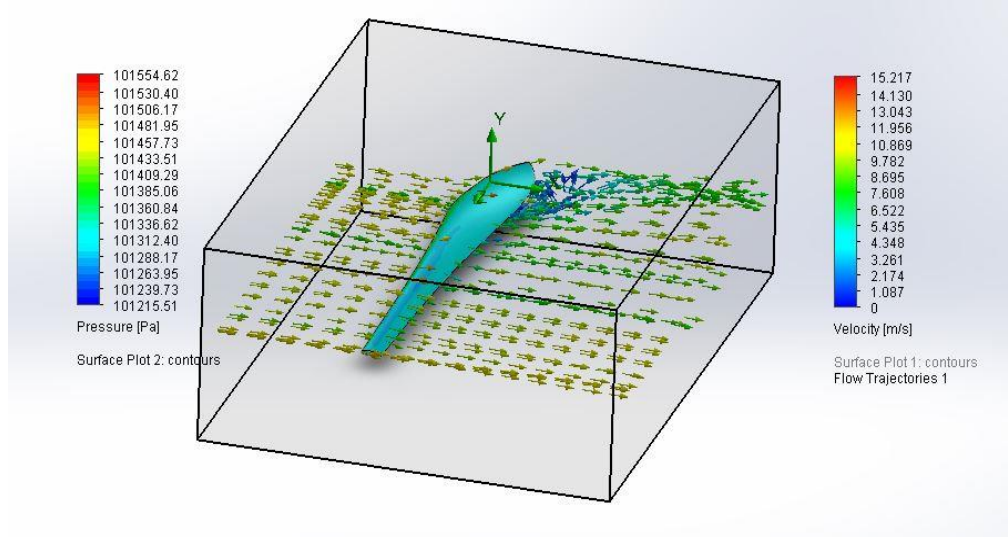


Şekil 8.5: Kanat üzerinde yer değiştirme sonuçları.

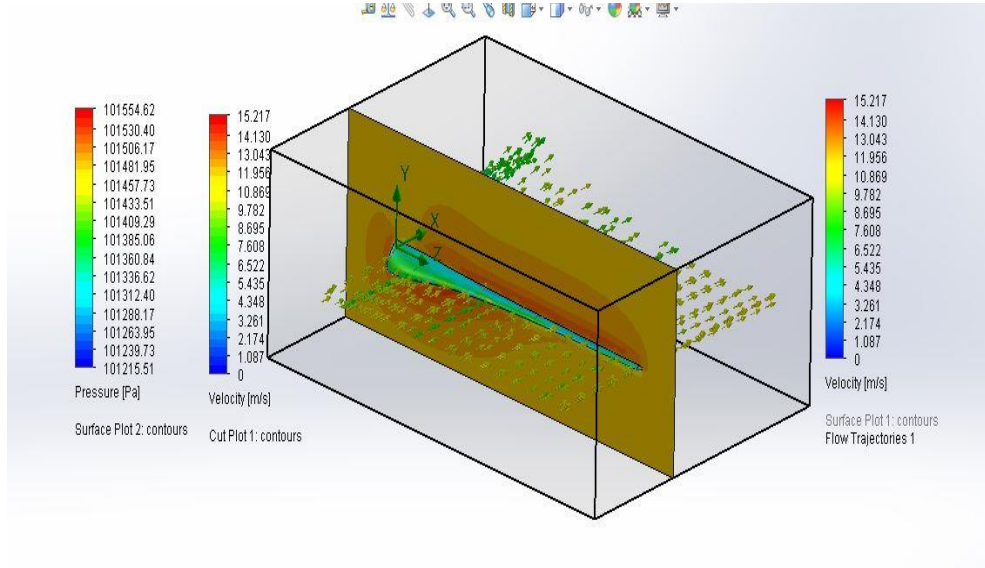


Şekil 8.6: Kanat üzerinde gerinim sonuçları.

Solidworks'de Flow Simulation modülünü kullanarak kanat üzerinde tekrardan akış analizi yapıldı. Fakat bu sefer kanat kök bağlantısını içermemektedir. Kök bağlantısız tek kanat üzerinde yapılan 12 m/s rüzgar şiddetinde yapılan akış analizi sonuçları Şekil 8.7 ve Şekil 8.8'de görülmektedir. Burada en yüksek basınç 101554.62 Pa olarak çıktı ve en yüksek hız 15.21 m/s olarak bulundu.

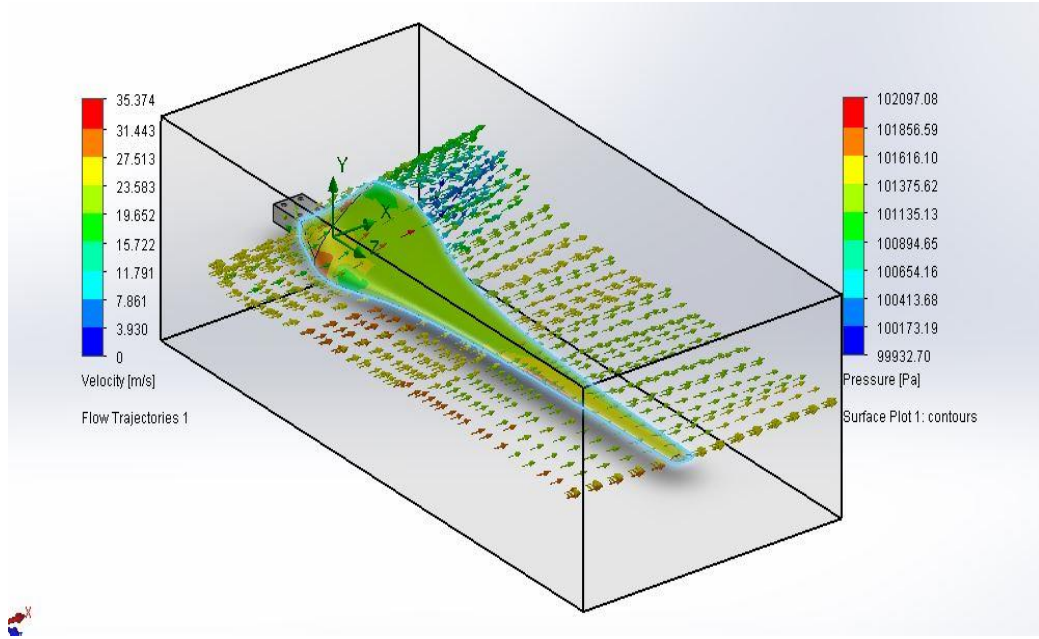


Şekil 8.7: Kök bağlantısız tek kanat üzerinde 12 m/s rüzgar şiddetinde hız ve basınç dağılımı.



Şekil 8.8: Kök bağlantısız tek kanat üzerinde 12 m/s rüzgar şiddetinde hız ve basınç dağılımını düzlem üzerinde ve kanat üzerinde görünüşü.

Solidworks'de Flow Simulation modülünü kullanarak kanat üzerinde tekrardan akış analizi yapıldı. Kök bağlantılı tek kanat üzerinde yapılan 30 m/s rüzgar şiddetinde yapılan akış analizi sonuçları Şekil 8.9'da görülmektedir. Burada en yüksek basınç 102097.08 Pa olarak çıktı ve en yüksek hız 35.374 m/s olarak bulundu.

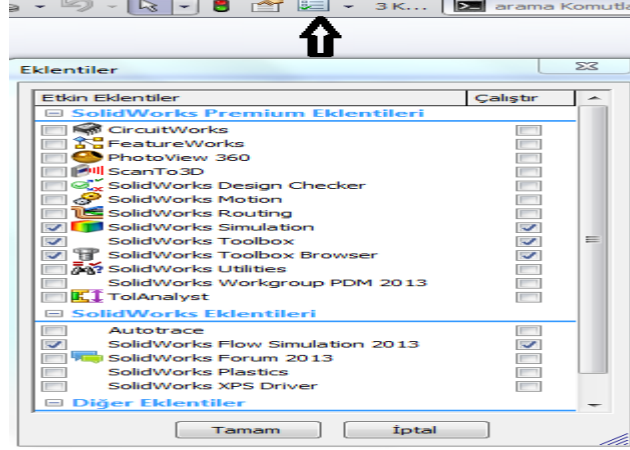


Şekil 8.9: Tek kanat üzerinde 30 m/s rüzgar şiddetinde hız ve basınç dağılımı.

8.2 Hup Akış ve Statik Analizi

Solidworks Flow Simulation modülünü kullanarak rüzgar türbini hup kısmının üzerinde akış analizi yapıldı. Hup üzerinde yapılan 200 rpm ve 12 m/s rüzgar şiddetinde yapılan akış analizi sonuçları Şekil 8.23 ve Şekil 8.24 görsel olarak görülmektedir. Burada en yüksek basınç 102883.82 Pa olarak çıktı ve en yüksek hız 49.519 m/s olarak bulundu. Analiz sonuçlarını göstermeye başlamadan önce burada analiz adımlarını sıra ile göstermek istiyorum. Akış analizi adımları Şekil 8.10 ve Şekil 8.22 arasında görsel olarak anlatılmaktadır. Daha sonra bu akış analizinden elde edilen sonuçları Solidworks simulation aktararak kanatların statik analizi gerçekleştirilecektir aynı şekilde bu analizinde adımlarını Şekil 8.25 ve Şekil 8.32 arasında görsel olarak anlatılmaktadır. Bu statik analizin sonuçları ise Şekil 8.33, Şekil 8.34 ve Şekil 8.35'de görsel olarak verilmektedir.

1 Adım: Eklentilerden Solidworks Flow Simulation 2013 eklentisini aktif hale getirilmesi gerekmektedir.



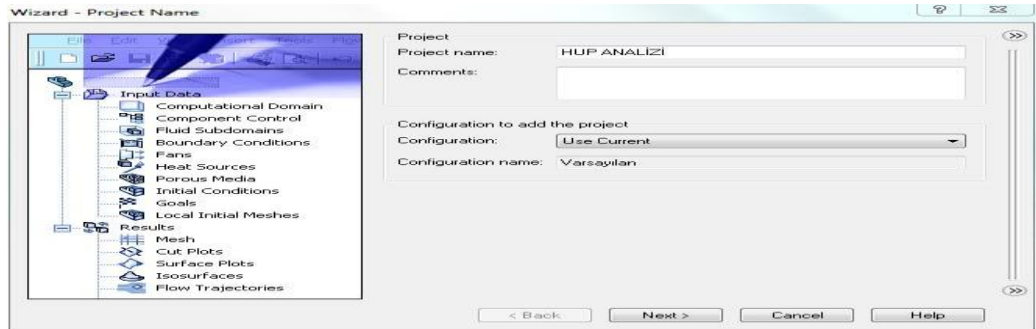
Şekil 8.10: Eklenti aktifleştirme.

2 Adım: Flow simulation bölümüne tıklayarak oradan sol üstteki wizard tıklayarak analiz sihibazını çalıştırılması gerekmektedir.



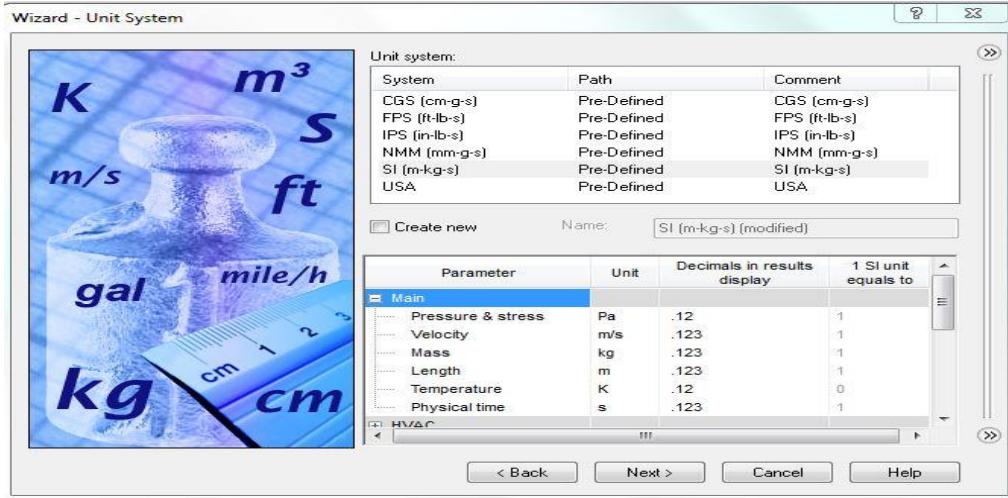
Şekil 8.11: Analiz sihibazı çalıştırılması.

3 Adım: Gelen pencereden Project name kısmına analiz adının girilmesi gerekmektedir.



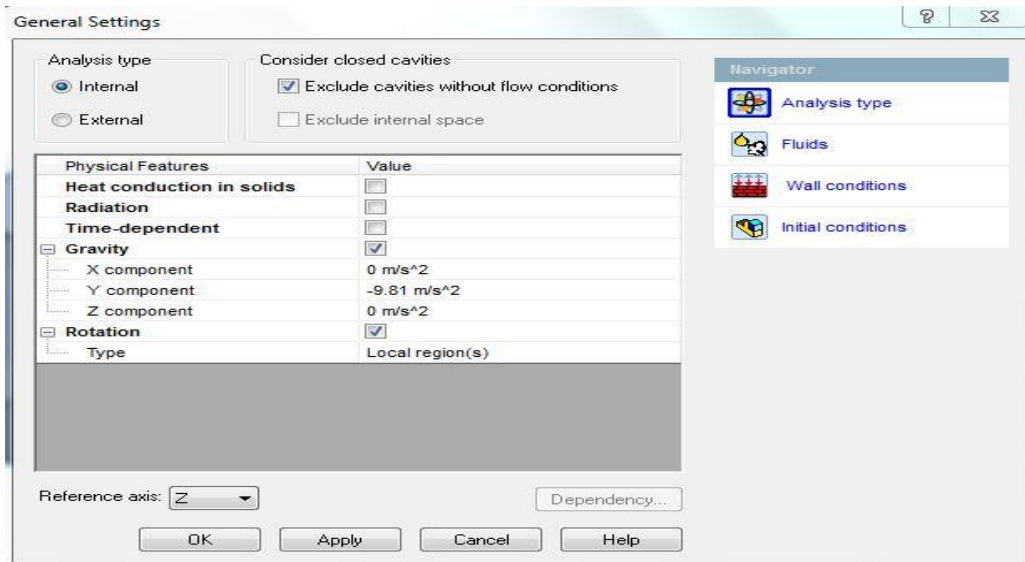
Şekil 8.12: Analiz adının girilmesi.

4 Adım: Kullanmak istediğiniz birim sistemi seçimi yapılacaktır bu pencereden daha sonar ileri tıklayarak bir sonraki adıma geçilecektir.



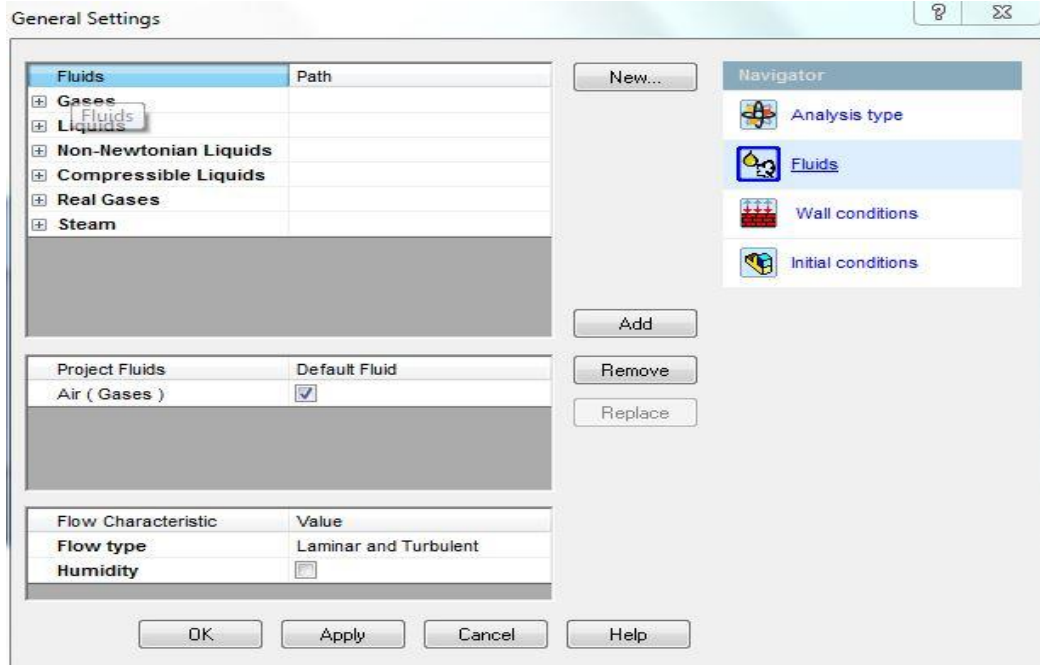
Şekil 8.13: Analiz'de kullanılacak birim sistemi seçimi.

5 Adım: Analiz'de yapılacak akış tipi yani iç akış veya dış akış ve diğer parametreleri bu adımda yapılacaktır. Biz bu analizde yer çekimini ve kanatları 200 rpm döndürmesini modellemek için rotation segmesini aktif hale getirdik seçerek. Burada önemli olan akışı hangi eksende göndereceğimizi belirtmek için referans eksenimizi belirtiyoruz biz burada z olarak seçtik.



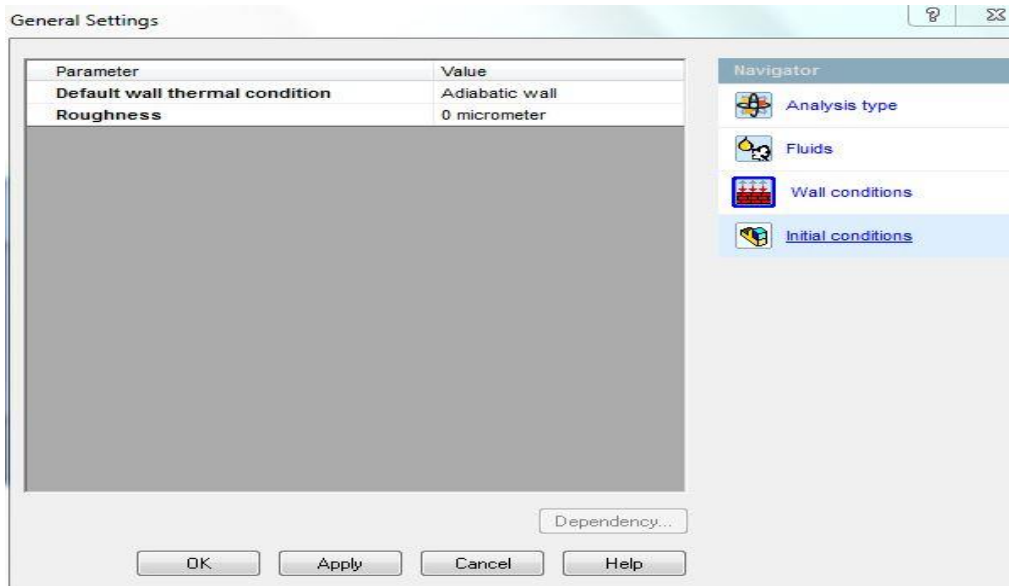
Şekil 8.14: Akışkan tipi seçimi ve diğer parametrelerin ayarlanması.

6 Adım: Analizde hangi akışkan kullanılarak gerçekleştirilecek olduğunu bu adımda seçiyoruz biz buradan gazlardan hava seçtik.



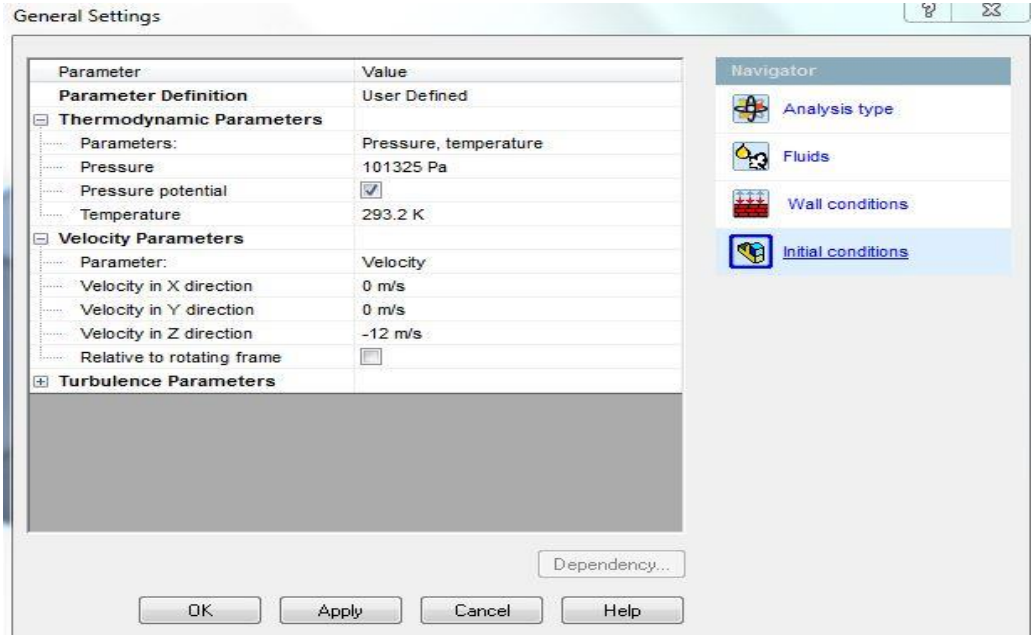
Şekil 8.15: Akışkan seçimi.

7 Adım: Analizde olması istediğiniz sınır koşulları ve pürüzlülük değerleri ayarlarının yapıldığı bölümdür.



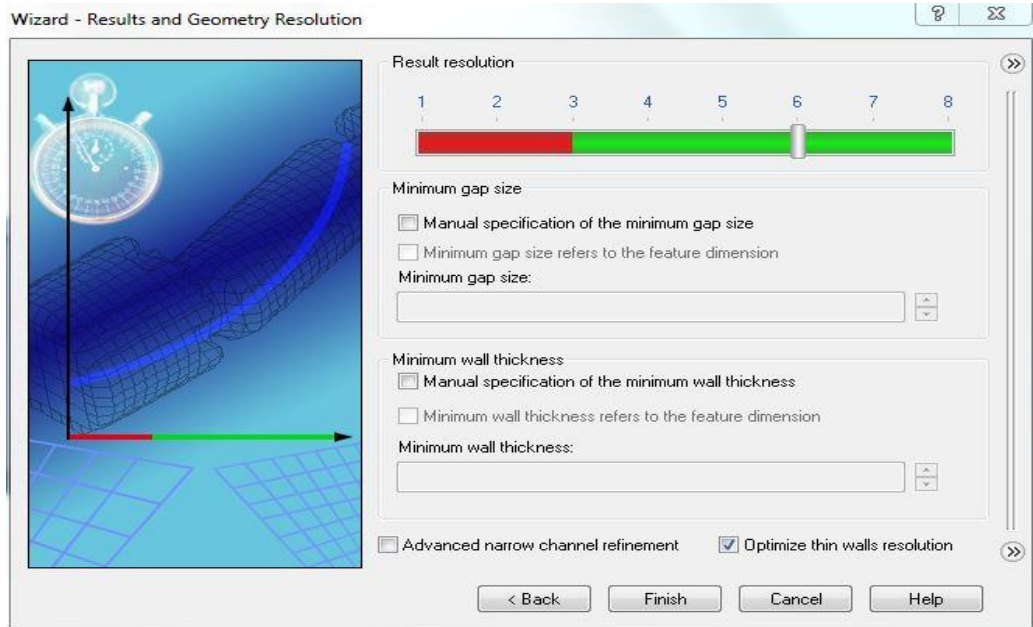
Şekil 8.16: Sınır şartları ve pürüzlülük değerlerinin seçimi.

8 Adım: Analizde kullanacağınız termodinamik parametrelerini, seçmiş olduğunuz akışkanın giriş hız değerlerini ve türbülans değerlerini belirlediğiniz kısımdır.



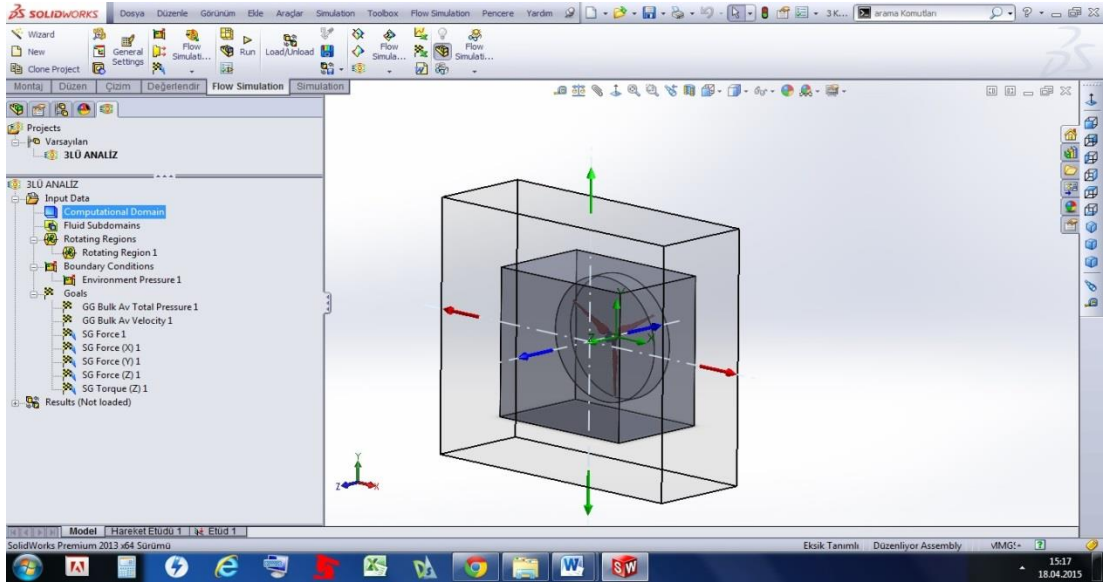
Şekil 8.17: Analiz girdi değerleri.

9 Adım: Yapılacak olan analizin mesh kalitesinin belirlenecek olan kısımdır.



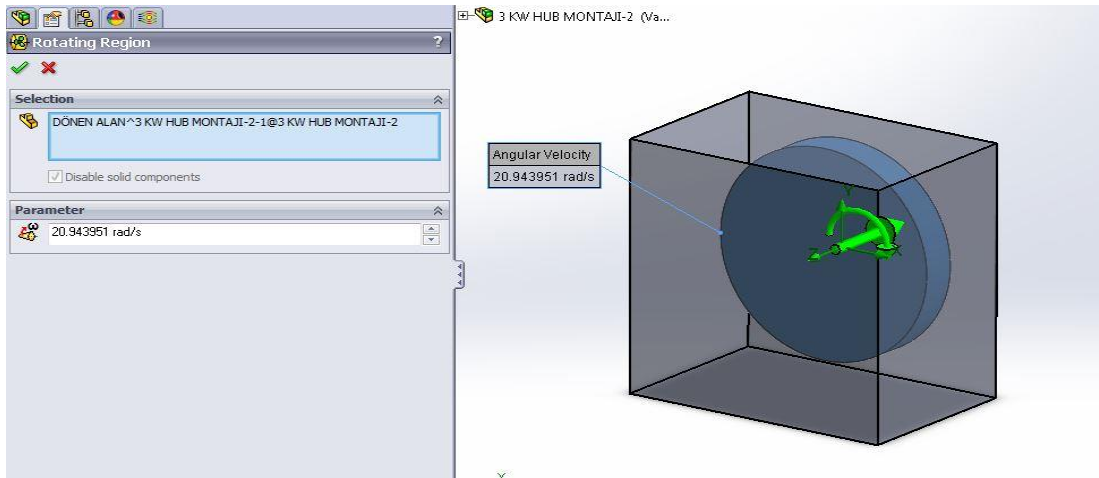
Şekil 8.18: Mesh ayarı.

10 Adım: Kontrol hacminin ayar yapılarak istenilen alan içinde analiz çalıştırılması ayarının yapıldığı kısımdır. Biz bu çalışmada iç akış seçtiğimiz için iç akışın gerçekleşeceği alanı daha önce dikdörtgen bir alan olarak çizilmiş olarak Şekil 8.19'da da görülmektedir. Bu nedenden dolayı bizim kontrol hacmi ayarı yapmamıza gerek kalmamıştır.



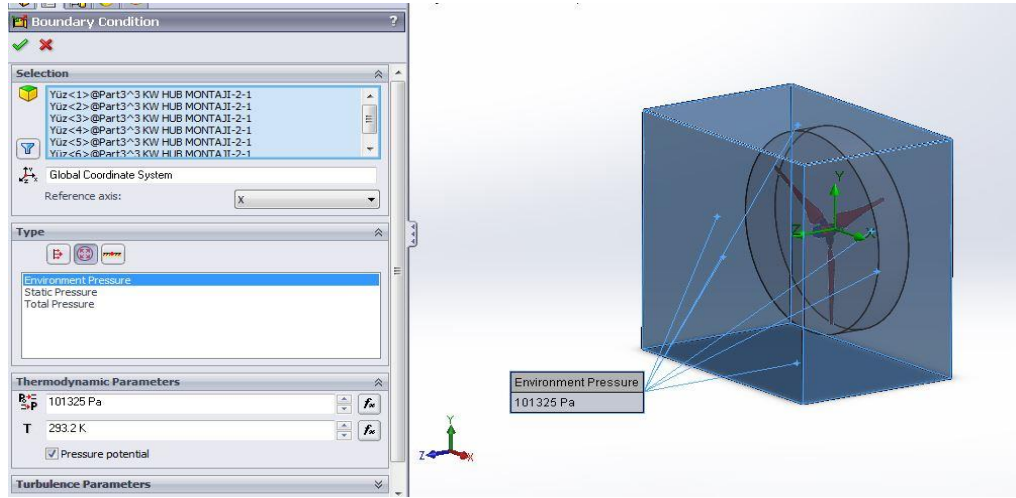
Şekil 8.19: Kontrol hacmi ayarı.

11 Adım: Rüzgar türbini hup kısmının 200 rpm dönüşünü ve dönüş yönünün ayarının yapıldığı kısımdır. Burada rpm olarak değilde açısal hız olarak girdi yapılacaktır bu noktaya dikkat edilmesi gerekmektedir.



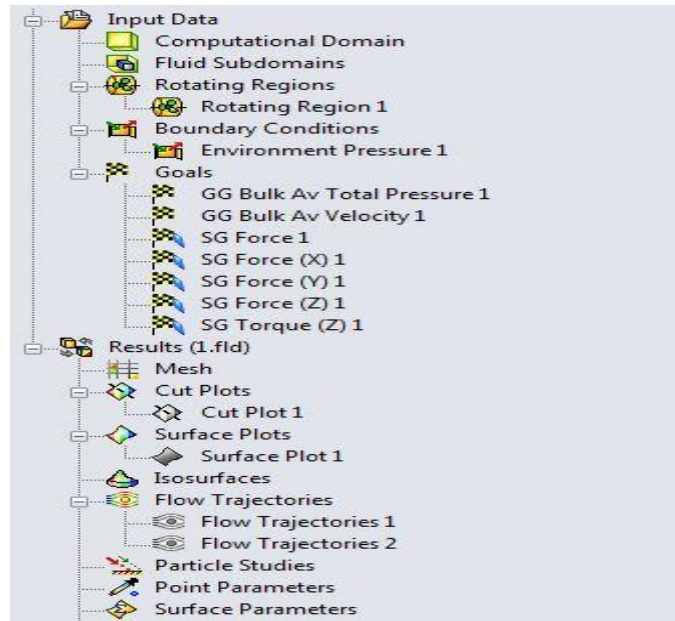
Şekil 8.20: Rotasyon ayarı.

12 Adım: Rotasyon ayarından sonra giren akışkanın nasıl bir çevreye çıkacağını ve çevre parametrelerinin girdiğimiz kısımdır.



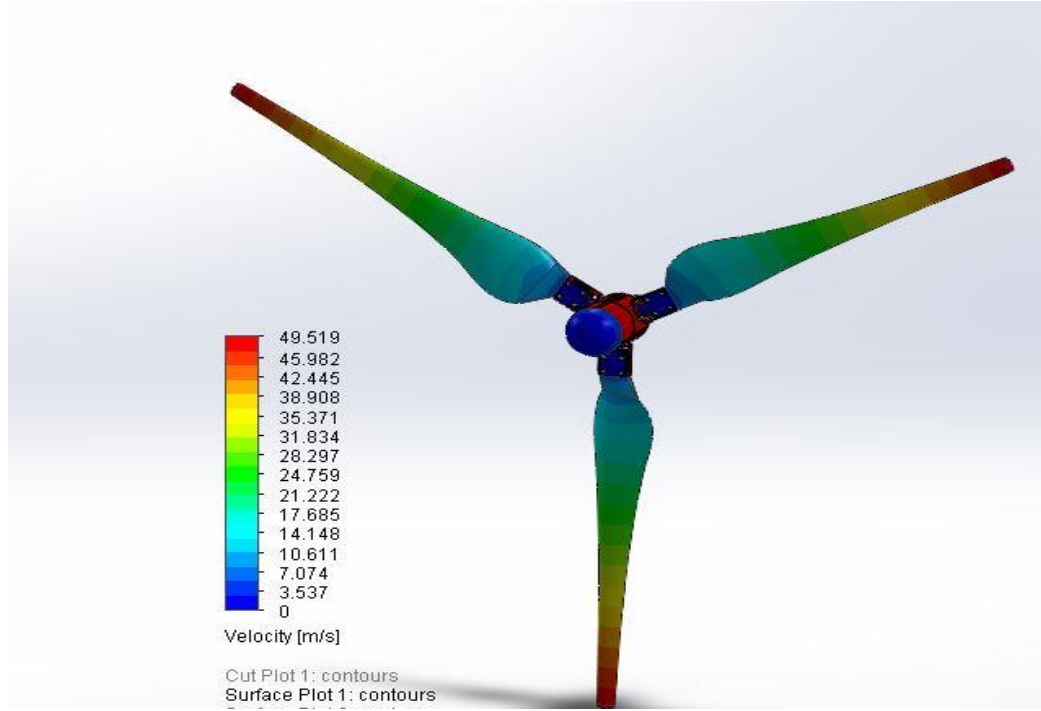
Şekil 8.21: Sınır koşulları ayarı.

13 Adım: Gerekli ayarları yapıldıktan sonra analizin çalıştırılarak sonuçlanması beklenir. Bitmiş analizde aşağıdaki gibi results kısmı aktif hale gelmiş bulunmaktadır. Analiz çalıştırılmadan önce istenilen kuvvetleri, torkları, hız değerleri gibi ayarları goals segmesinde yapılması gerekmektedir. İstenilen sonuçları results segmesinin altından ayarlayarak görsel hale getirilmesi gerçekleştirilecektir.



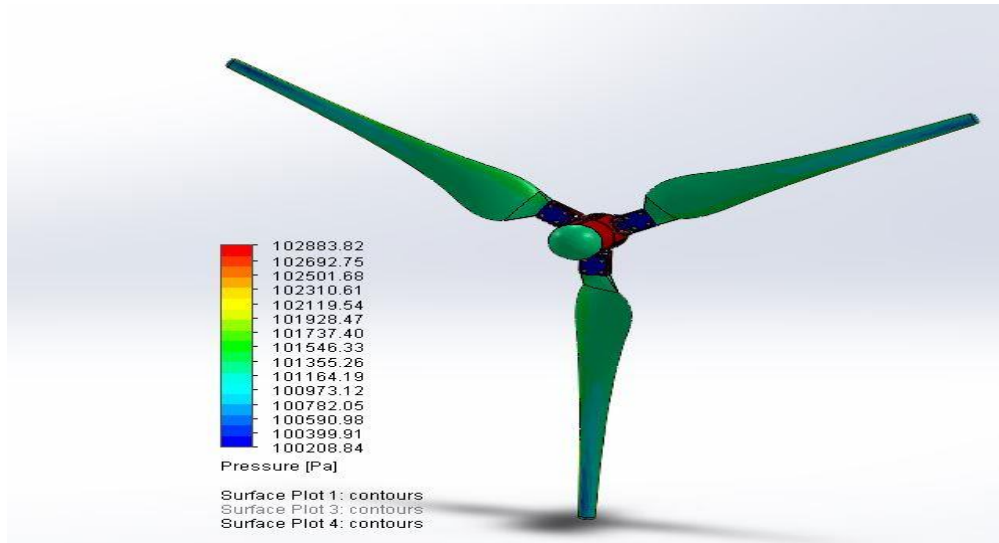
Şekil 8.22: Sonuç segmesi.

Surface Plots segmesi kullanılarak yapılan ayarlar sonuçunda kanatlar üzerinde hız dağılımı gösterilmiştir şekil 8.23'de.



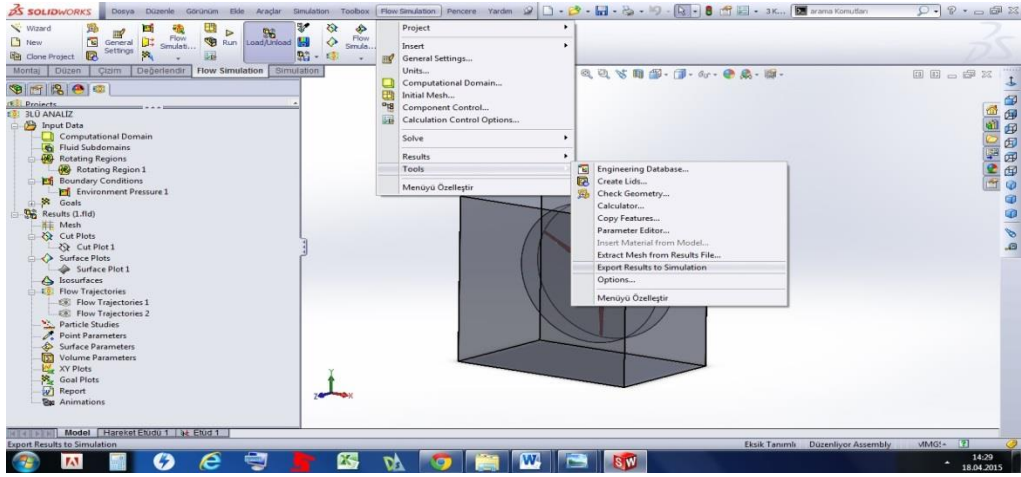
şekil 8.23: 3 kanat üzerinde hız dağılımı.

Aynı şekilde Surface Plots segmesi kullanılarak yapılan ayarlar sonuçunda kanatlar üzerinde basınç dağılımı gösterilmiştir şekil 8.24'de.



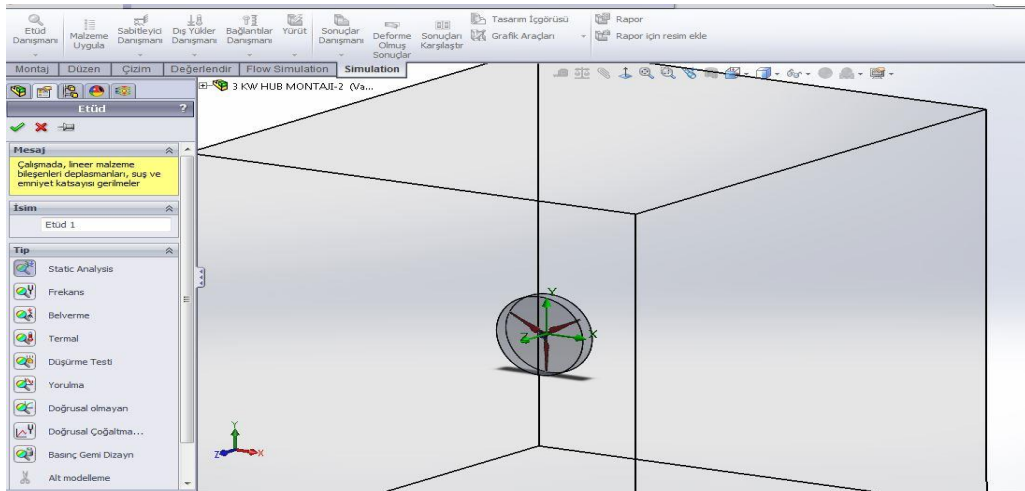
şekil 8.24: 3 kanat üzerinde basınç dağılımı.

14 Adım: Gerçekleştirilmiş olan akış analizini basınç değerlerini statik analize aktararak bu değerler sonucunda kanatlar üzerinde nasıl bir gerilim dağılımı oluyor ne kadarlık bir defermasyona uğruyor gibi sorularımızın cevaplarını bu bölümde sonuçlandıracağız. Öncelik ile yapılmış olan akış analizimizi kaydediyoruz daha sonra Solidworks hızlı araç segmesinden flow simulation kısmına tıklıyoruz buradan tools tıklayarak sağda açılan pencereden export results to simulation tıklamamız yeterli olacaktır. Şekil 8.25’de görsel olarak gösterilmiştir.



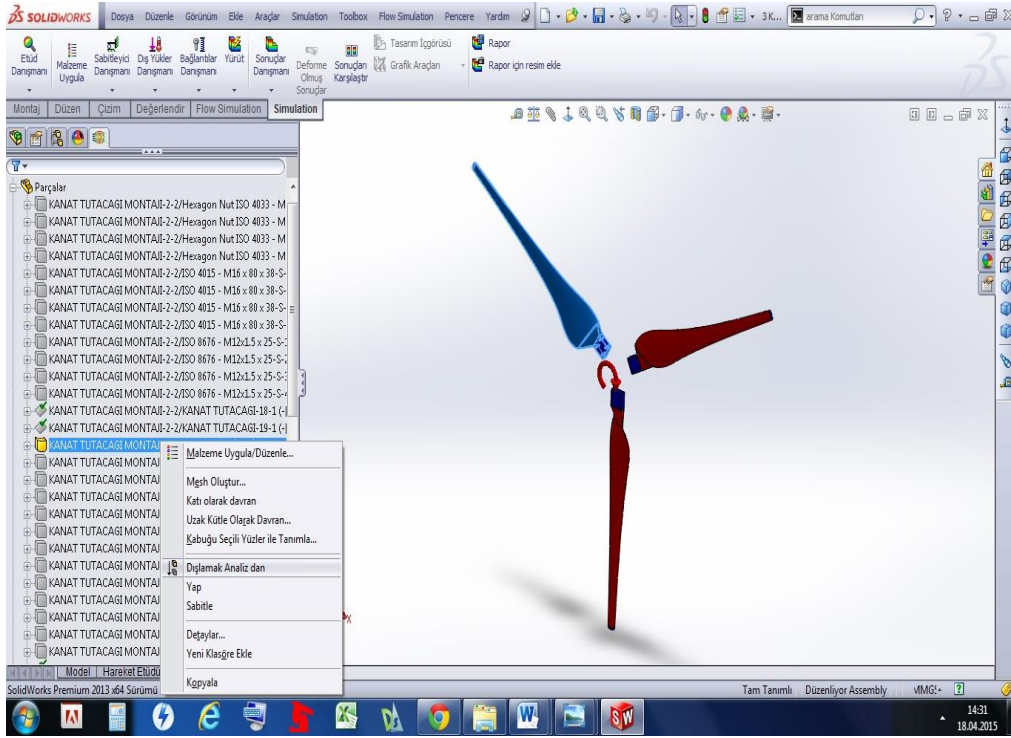
Şekil 8.25: Statik analize basınç sonuçlarını aktarma.

15 Adım: Simulation segmesinden etüt danışmanına tıklayarak oradan yeni etüt tıklayarak açılan pencereden Static Analysis tıklamamız yeterli olacaktır. Artık Solidworks simulation bölümüne geçmiş bulunmaktayız ve burada bir statik analiz çalışmasına başlamış bulunmaktayız.



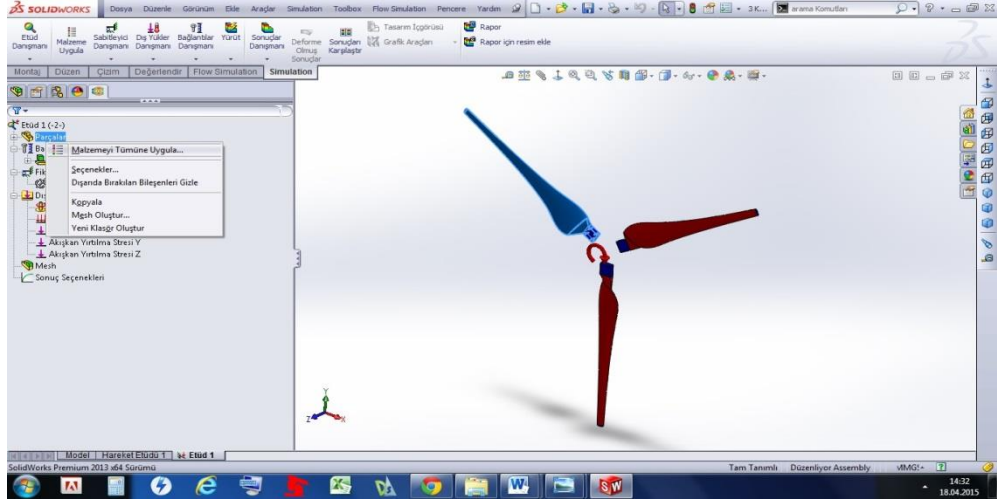
Şekil 8.26: Statik analize geçiş.

16 Adım: Burada öncelik ile analiz yapacağımız parçaları diğer parçalardan ayırmamız ve gereksiz parçaları analizden dışlamak olacaktır. Bunu yapmamızın sebebi ise eleman ve kontak sayılarının çok olmaması ve çözüm süresinin uzamaması ve analizin yanlış kontak durumlarından dolayı hatalı sonuç vermemesi nedeni ile bu işlemi yapmaktayızdır. Parçalar analizden şöyle dışlanıyor istemediğimiz parça üzerine sağ tıklayarak açılan pencerede analizden dışla komutunu tıklayarak yapılmaktadır. Şekil 8.27’de biz kanatlar haric tüm parçaları analizden dışlamış bulunmaktayızdır. Eğer bir parçayı yanlışlıkla analizden dışlamış iseniz tekrardan parçayı analize dahil ederseniz parça üzerine tekrardan sağ tıklayarak açılan pencerede analize dahil komutuna tıklamanız yeterli olacaktır.



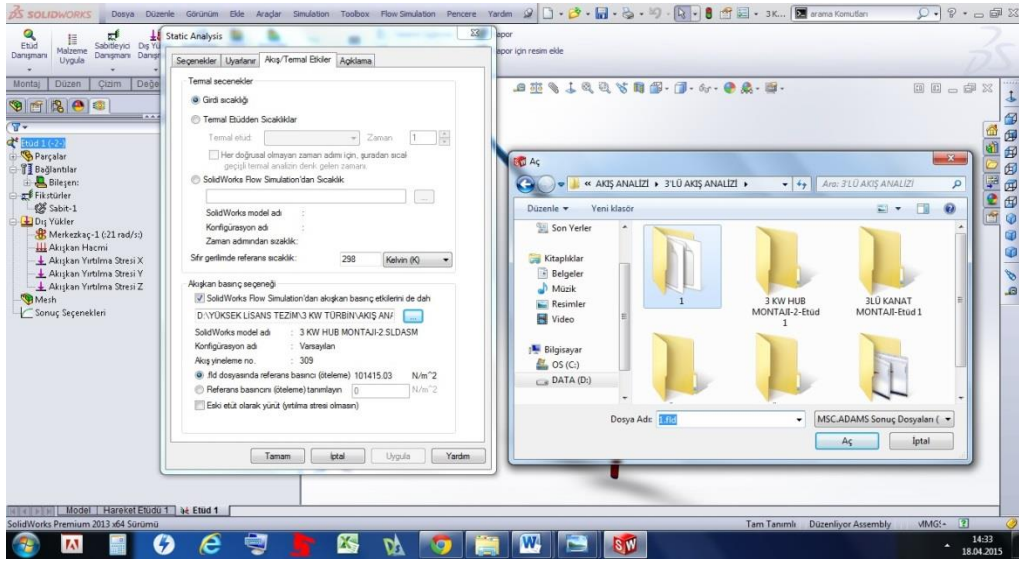
Şekil 8.27: Statik analiz basitleştirmesi

17 Adım: Analizdeki parçalara malzeme ataması yapılacaktır bu adımda. Eğer parçaların hepsine aynı malzeme atanacaksa parçalar üzerine sağ tıklayarak malzemeyi tümüne uygula tıklayarak istediğimiz malzemeyi ataya biliriz bu şekilde. Şekil 8.28’de analize dahil olan parçaların tümüne malzeme atam işlemi gösterilmiştir.



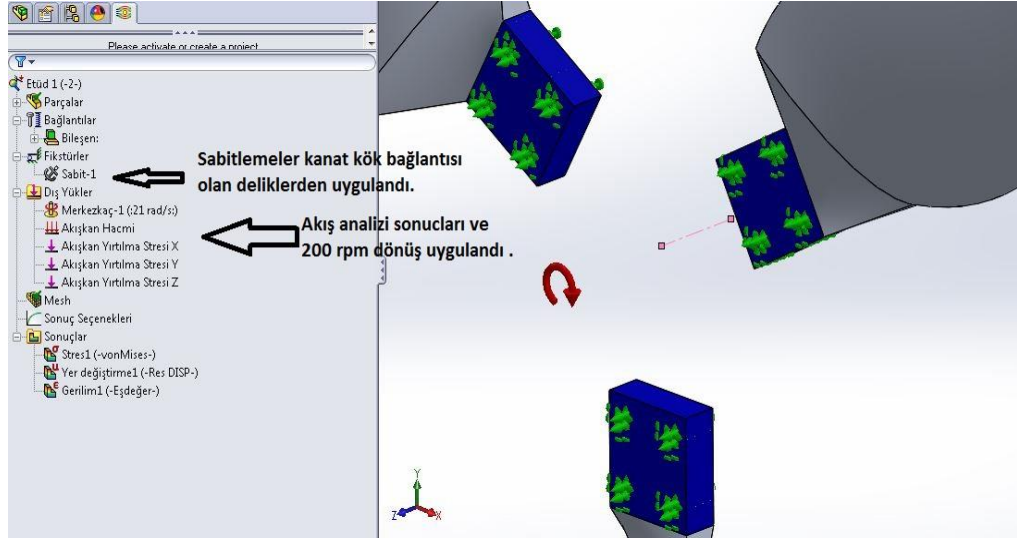
Şekil 8.28: Statik analiz malzeme atama.

18 Adım: Akış analiz sonuçlarını statik analize tanıtmaya çalışılacaktır bu adımda. Etüt üzerine sağ tıklayarak özellikler tıklanacak oradan da gelen pencereden Akış/Termal Etkiler komutuna tıklanarak en alt sekmeye akışkan basınç seçeneği aktif hale getirilerek yapılan akış analiz .fld uzantılı dosyasını seçmemiz yeterli olacaktır.



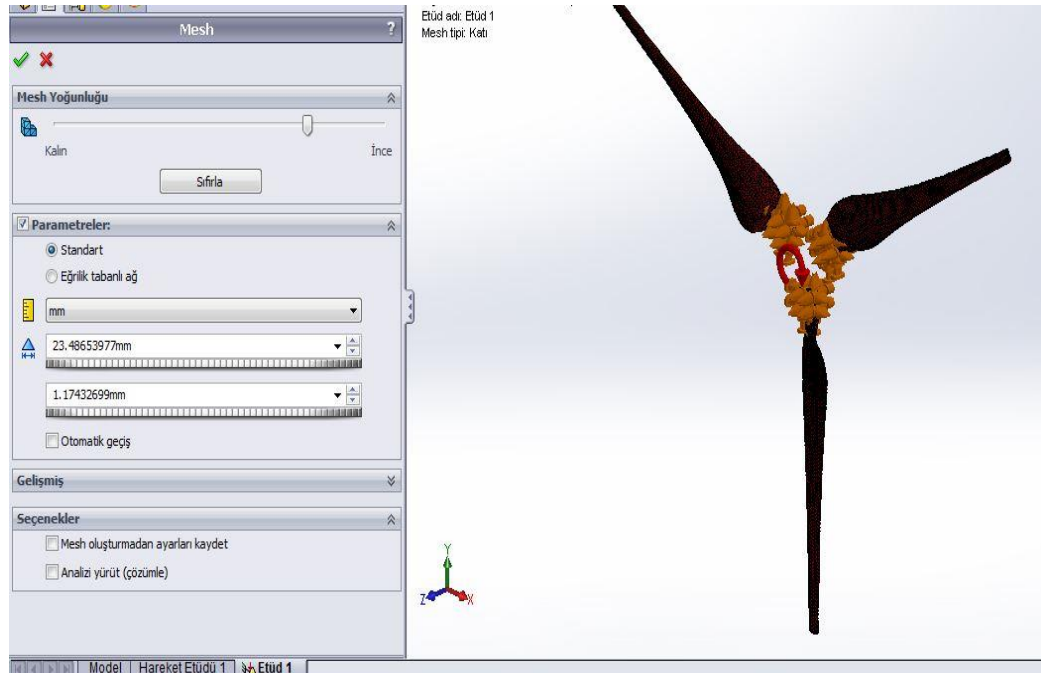
Şekil 8.29: Akış analizini statik analize tanıtmaya.

19 Adım: Akış analizi sonuçları ilave olarak 200 rpm dönüş verildi kanatlara. Daha sonra kanatları sabitleneceği kısımlardan sabitleme işlemi gerçekleştirildi. Bu işlemden sonra kanatlar mesh işlemine hazır hale getirilmiş bulunmaktadır. Şekil 8.30'da kanatları sabitleme işlemi bitmiş olarak görülmektedir.



Şekil 8.30: Akış analizini statik analize tanıma ve kanatları sabitleme.

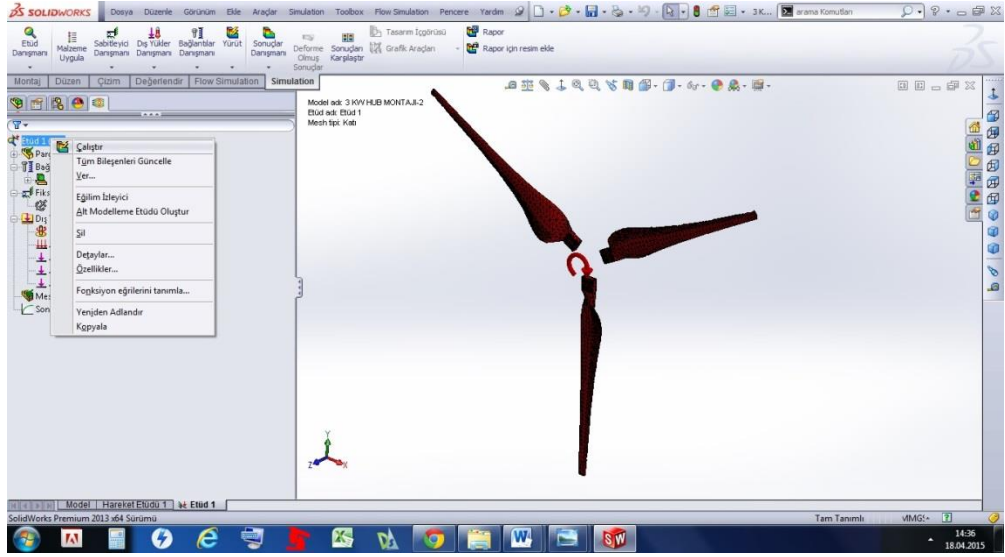
20 Adım: Mesh üzerine sağ tıklayarak açılan pencereden mesh oluşturma tıklanarak mesh kalitesini istediğimiz ayara getirerek mesh işlemini başlarız. Şekil 8.31’de mesh işlemi bitmiş kanatları görülmektedir.



Şekil 8.31: Mesh atama.

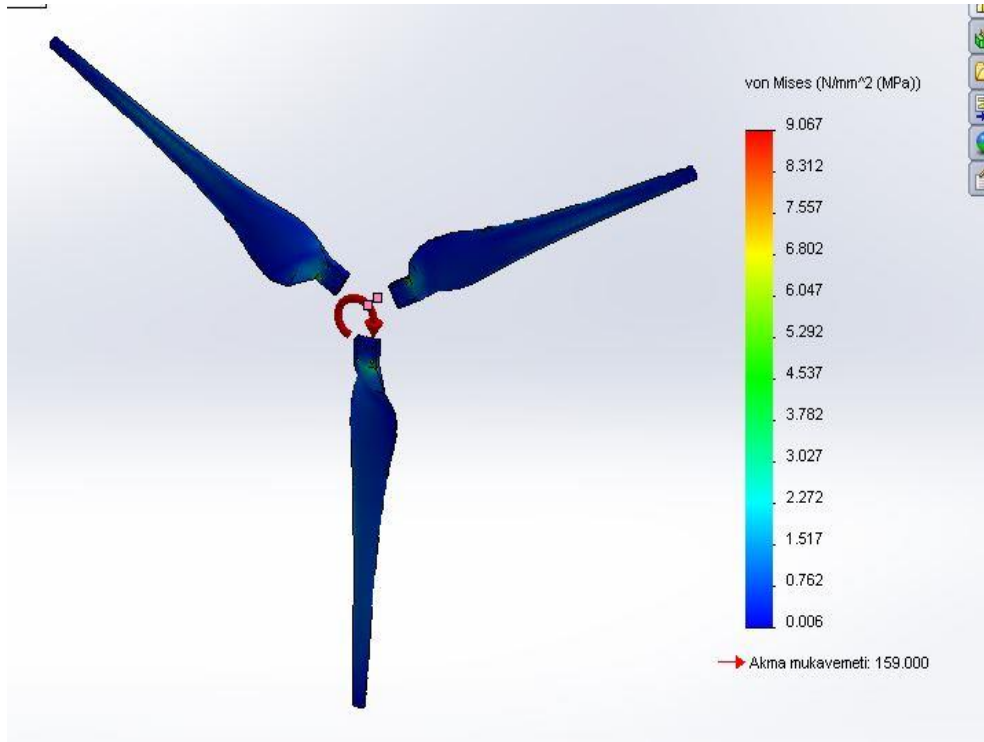
21 Adım: Tüm bu aşamaları yaptıktan sonra etüd üzerine sağ tıklayarak çalıştır dememiz gerekmektedir bu şekilde statik analizi çözümlenmeye başlayacaktır bilgisayar. Çözümleme bittikten sonra sonuçlar kısmı aktif hale gelecektir. Buradan

istediğimiz sonuca çift tıklayarak sonuçları görsel hale getirebiliriz. Şekil 8.32’de analizi çalıştırma işlemi görsel olarak gösterilmiştir.

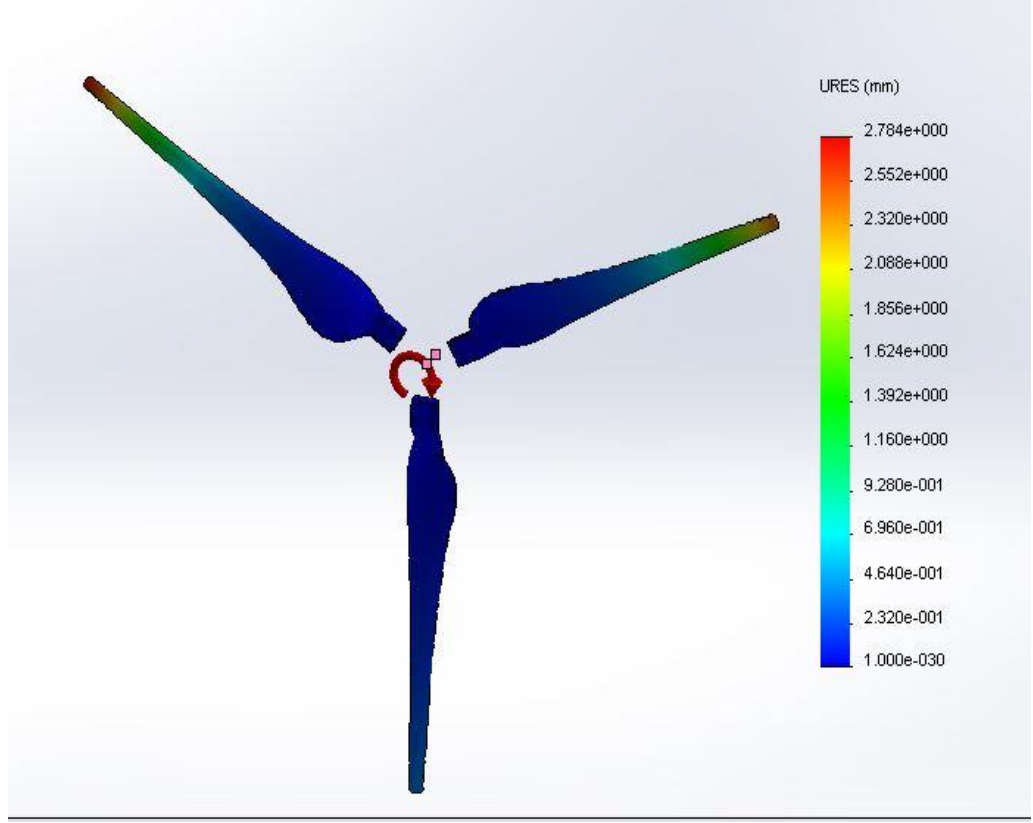


Şekil 8.32: Statik analiz çalıştırma.

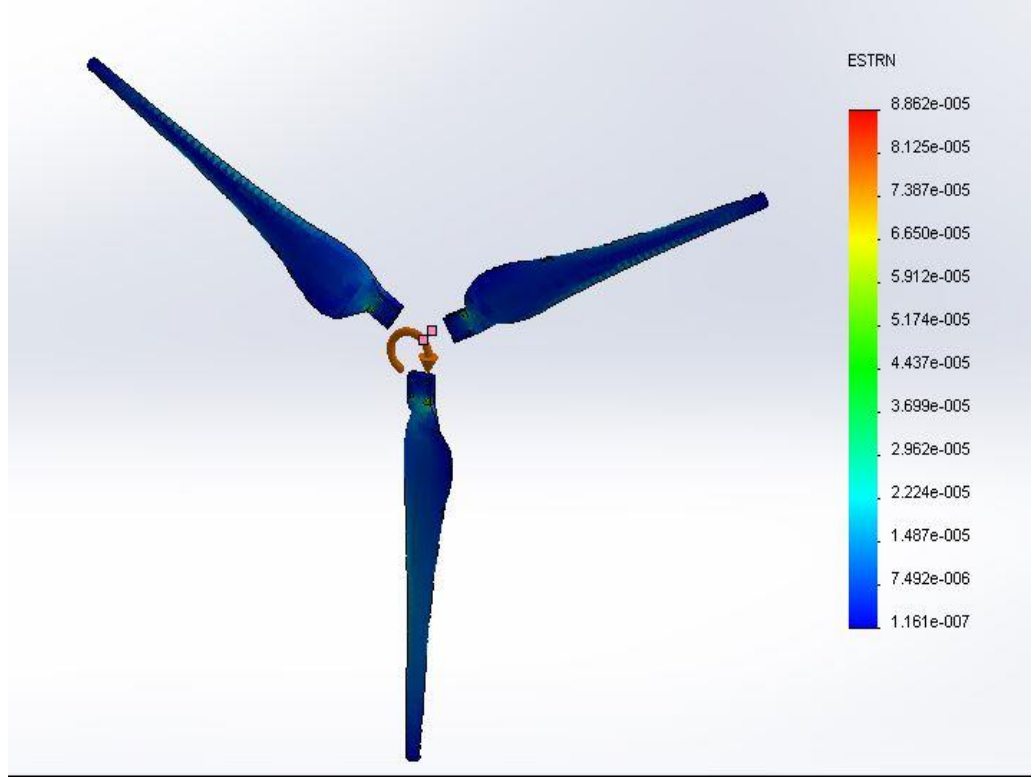
Şekil 8.33, Şekil 8.34 ve Şekil 8.35’de yapmış olduğumuz statik analiz sonuçları görsel olarak gösterilmektedir.



Şekil 8.33: Statik analiz von-mises gerilim sonuçları.



Şekil 8.34: Statik analiz yer değiştirme sonuçları.



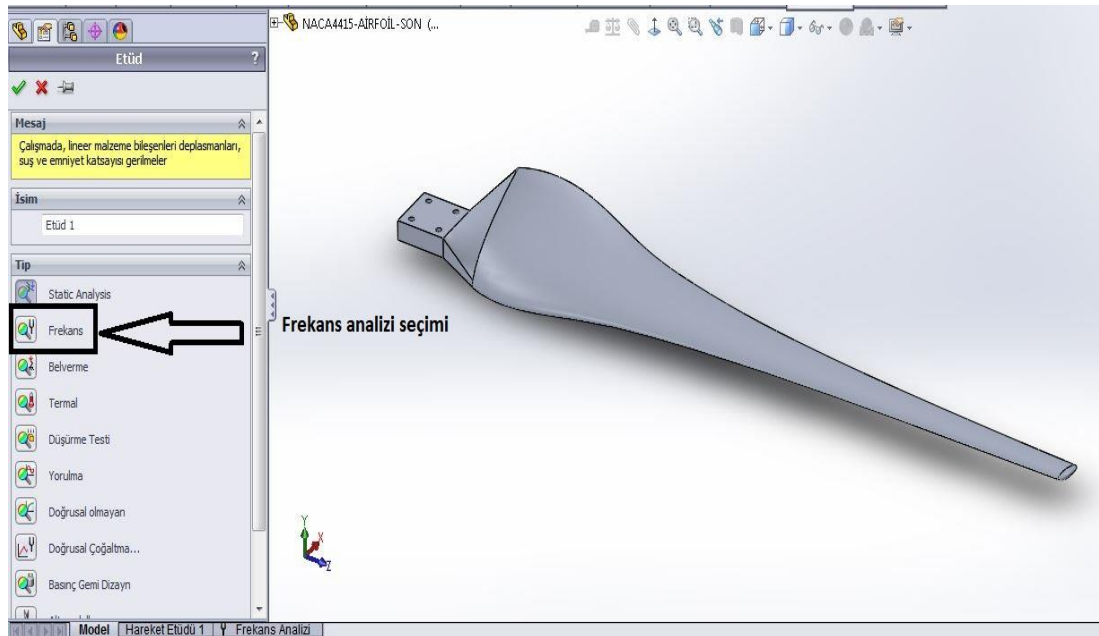
Şekil 8.35: Statik analiz gerinim sonuçları.

8.3 Kanat Titreşim Analizi

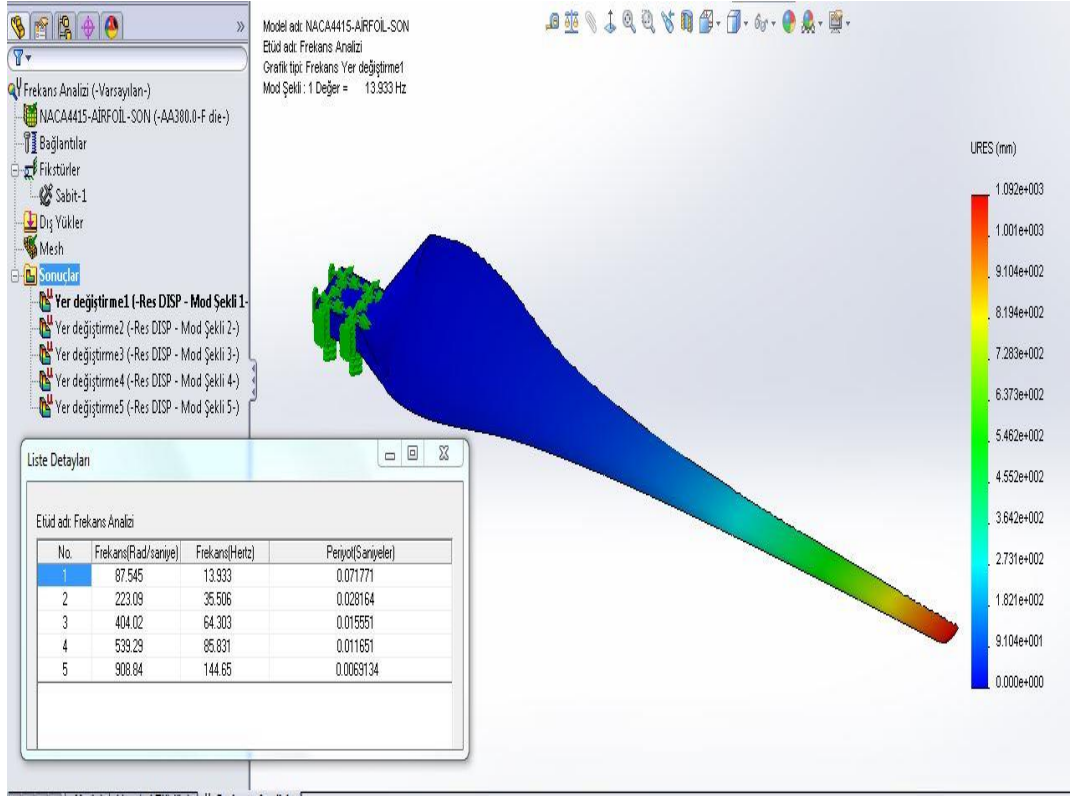
Tüm mühendislik yapılarında olduğu gibi, rüzgar türbinlerinde de dizayn aşamasında titreşimler dikkate alınır ve rezonanstan kaçınılır. Sistemin doğal dairesel frekansı ile zorlayıcının dairesel frekansının çakışması ve bunun sonucunda kabul edilemeyecek genliklerin oluşması anlamına gelen rezonanstan kaçınmanın ilk adımı, ilgili sistemin doğal dairesel frekansının saptanmasıdır [11].

Bu çalışmada, tasarlanmış olduğumuz rüzgar türbinine ait türbin kanadının doğal dairesel frekansı hesaplanmıştır. Solidworks simulation frekans analizi seçilerek sonlu elemanlar yöntemi ile doğal dairesel frekansları ve bu frekanslara ait titreşim türleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, rüzgar türbinine etkiyen dış etkenlerin zorlayıcı frekansı saptanarak, rezonans analizi yapılmıştır.

Solidworks programında frekans analizi gerçekleştirebilmek için önce analiz tipi seçilerek çizilen kanatın frekans analizine aktarılması gerekmektedir. Daha sonra kanatı ağlara bölerek yani mesh atamak gerekir. Gerekli sabitleme ve malzeme atamayı yaptıktan sonra analizi çalıştırarak sonuçlara ulaşabiliriz. Titreşimler nedeniyle oluşan gerilme değerleri saptanarak, Şekil 8.37’de verildiği gibi görsel hale getirilir. Sonuç olarak, istenilen sayıda titreşim modu ve türü Şekil 8.38’de gibi elde edilir.



Şekil 8.36: Frekans analizi seçimi.



Şekil 8.37: Frekans analizi sonuçları.

Etüd adı: Frekans Analizi			
No.	Frekans(Rad/saniye)	Frekans(Hertz)	Periyot(Saniyeler)
1	87.545	13.933	0.071771
2	223.09	35.506	0.028164
3	404.02	64.303	0.015551
4	539.29	85.831	0.011651
5	908.84	144.65	0.0069134

Şekil 8.38: Frekans titreşimleri değerleri ve periyotları.

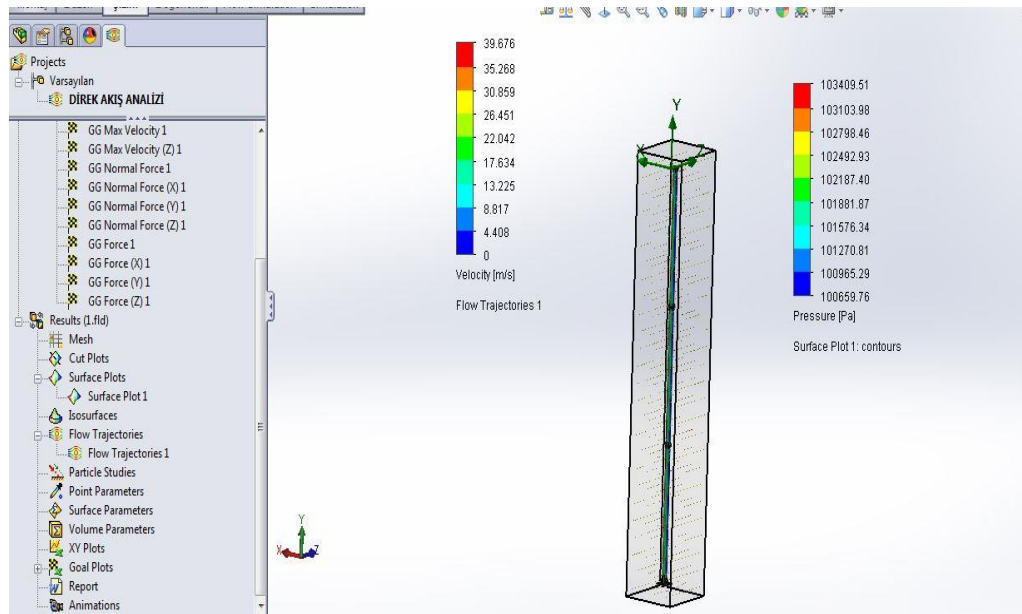
Şekil 8.38’de rüzgar türbini kanadına ait 1, 2, 3, 4, 5. mod doğal frekanslarla, zorlayıcı kuvvete ait frekans değerleri ve periyotları verilmektedir. Rezonans frekanslarının $n1 = 836$ dev/dak ve $n2 = 2131$ dev/dak gibi çok yüksek devir sayılarında ortaya çıkması söz konusu olduğundan, kanatlar için herhangi bir rezonans tehlikesi bulunmamaktadır.

8.4 Direk Akış, Statik ve Burkulma Analizi

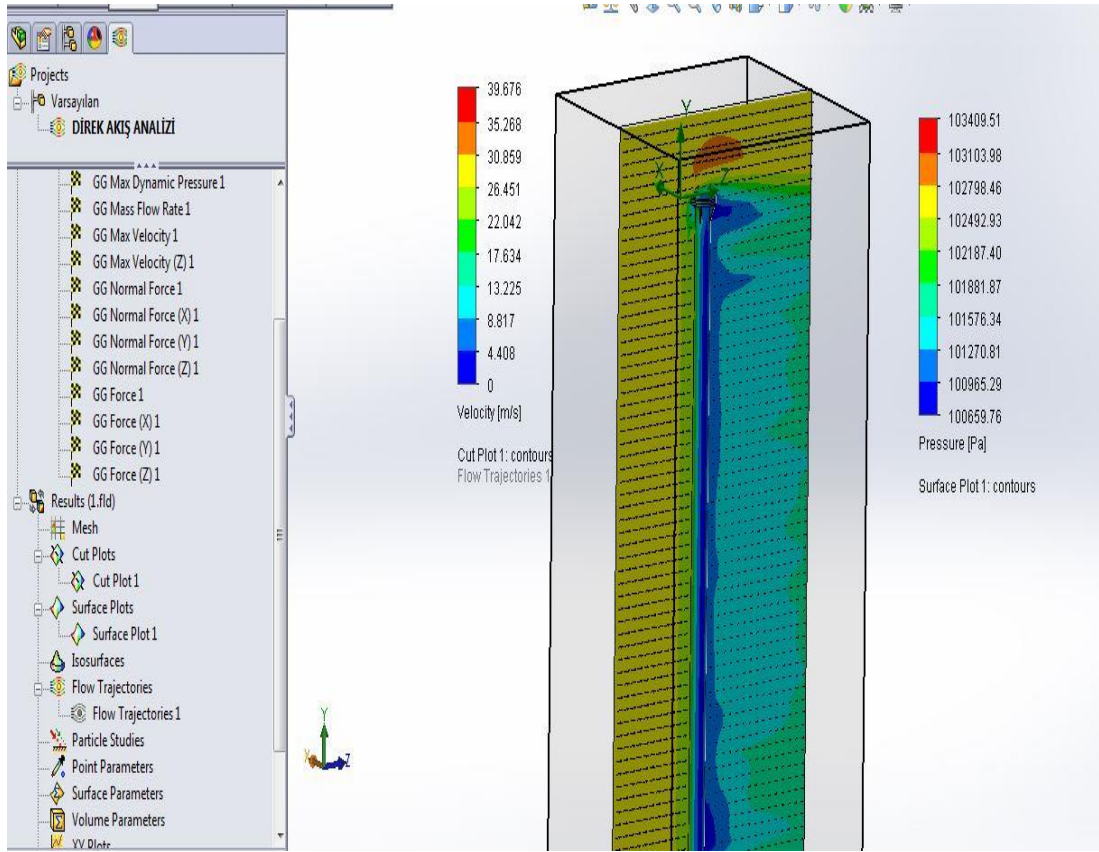
3 kW'lık küçük güçlü rüzgar türbini için tasarlanan direğin bu tasarım için uygunluğunu ve dayanımını bu aşamada kontrol edilecektir. Öncelik ile direğin akış analizi gerçekleştirilecektir buradan elde edilen sonuçları statik analize aktarılacaktır. Bu işlemlerden sonra rüzgar türbininin gövde ve hup kısmınının rüzgara karşı oluşturduğu kuvvetler direğin üzerine uygulanarak analizler yapılacaktır. Sonunda akışdan kaynaklanan, gövde ve hup kısmından kaynaklanan kuvvetler ikisi birleştirilerek statik analiz gerçekleştirilecektir. Bu analiz sonucunda deformasyonlar, gerilmeler ve güvenlik faktörü incelenecektir direk için.

12 metre uzunluğunda tasarlanan direğin burkulma analizi de bu aşamada yapılacaktır. Bu analizden kritik yük katsayısı elde edilmeye çalışılacak ve burkulmadan dolayı ne kadarlık bir yerdeğiştirme meydana geldiğini incelenecektir. Burkulma analizinde girdi kuvvetleri olarak rüzgar türbinini gövde kısmının ağırlığı, rüzgardan kaynaklanan kuvvetler ve direğin kendi ağırlığı alınarak gerçekleştirilecektir.

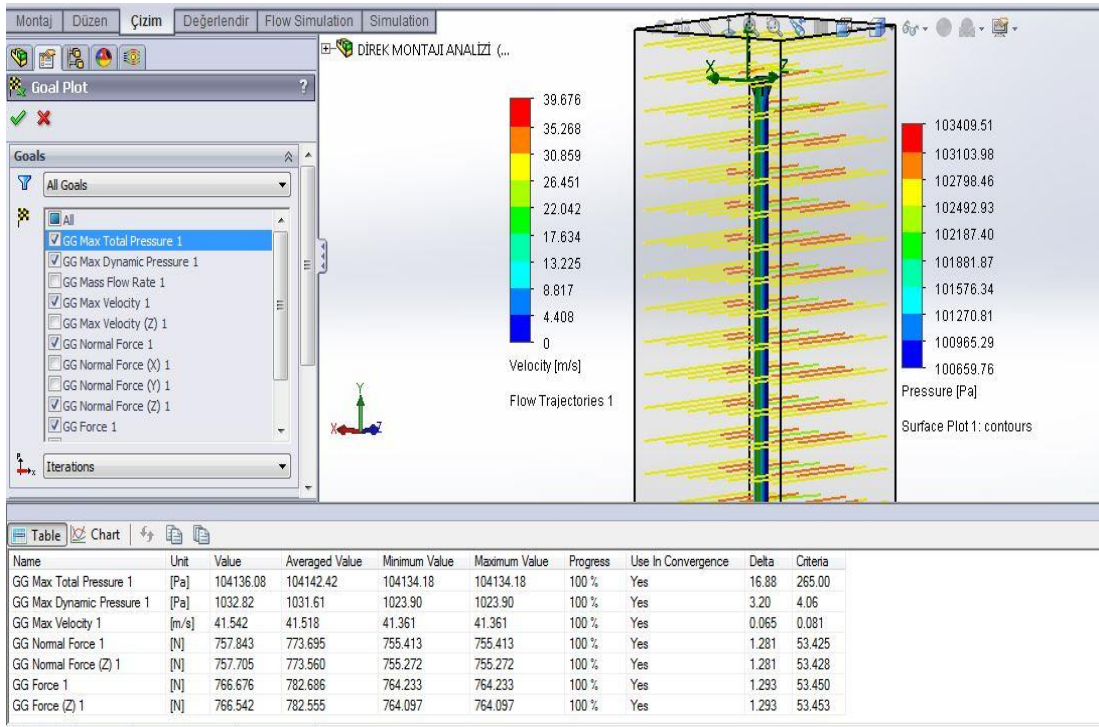
30 m/s rüzgar hızı uygulanarak gerçekleştirilen akış analizi sonuçları Şekil 8.39, Şekil 8.40 ve Şekil 8.41'de görülmektedir. Burada en yüksek hız 39.67 m/s çıkmıştır en yüksek basınç ise 103409.51 Pa çıkmıştır.



Şekil 8.39: Direk akış analizi sonucunda basınç ve hız dağılımı.

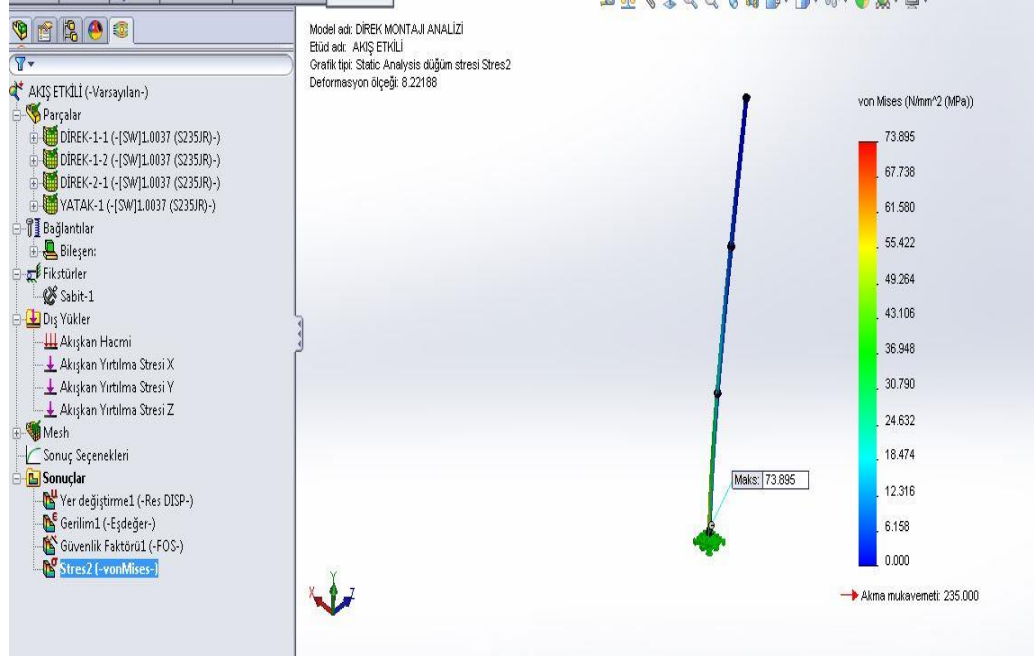


Şekil 8.40: Direk akış analizi sonucunda basınç ve hız dağılımı farklı görünüşü.

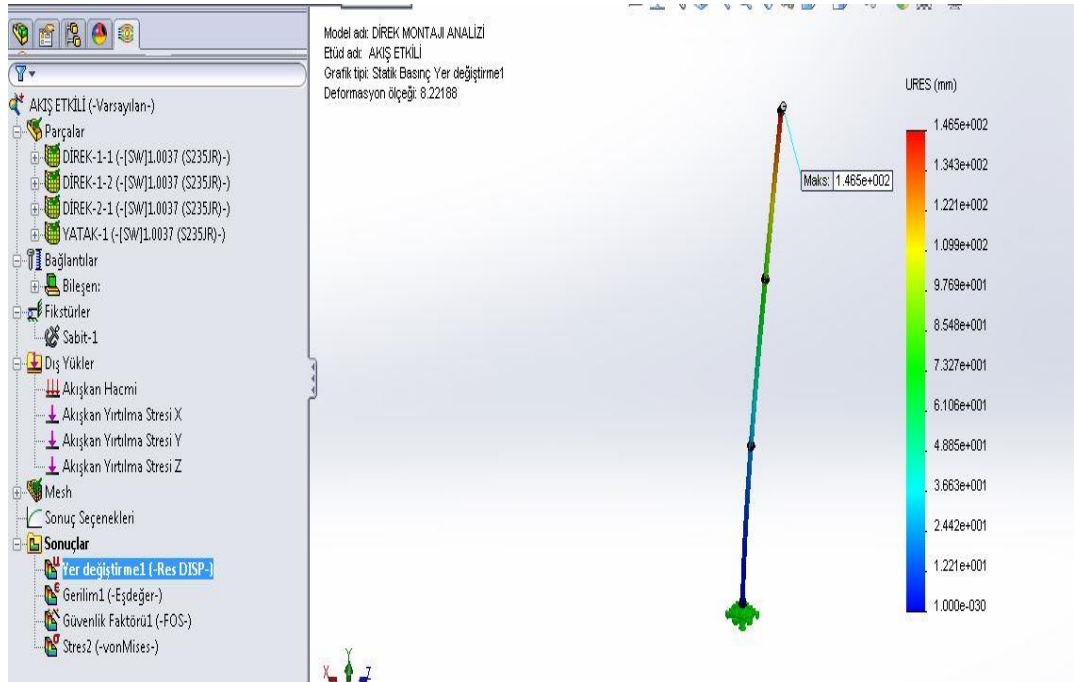


Şekil 8.41: Direk akış analizi sonucunda basınç ve hız dağılımı ve oluşan kuvvetlerin sonuçları.

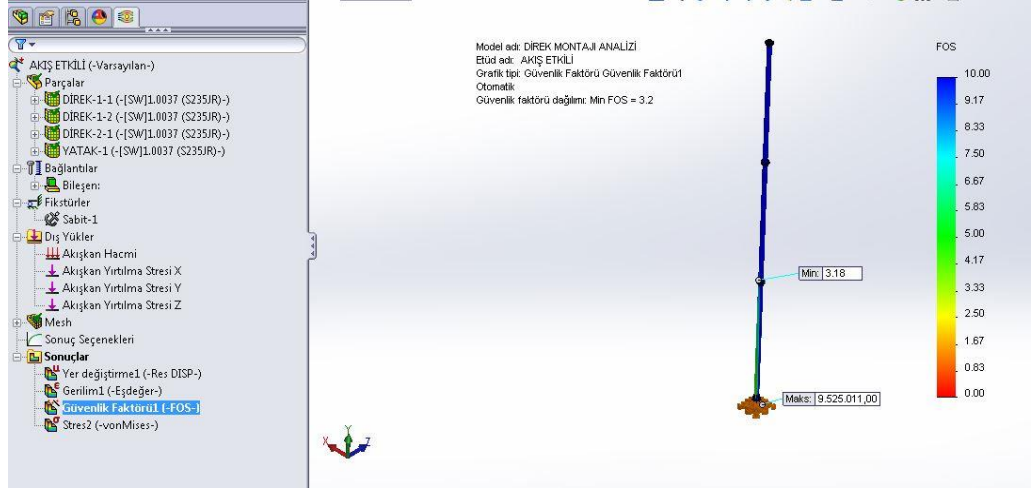
Akış analizi sonucunda oluşan basınçları statik analize aktararak gerçekleştirilen çalışmada en yüksek gerilme 73.895 MPA en yüksek yerdeğiştirme 146.5 mm ve güvenlik faktörü direk için en düşük 3.2 çıkmıştır.



Şekil 8.42: Akış analiz sonucunda oluşan basınçların etkisi ile yapılan statik analizinin gerilme sonuçları.

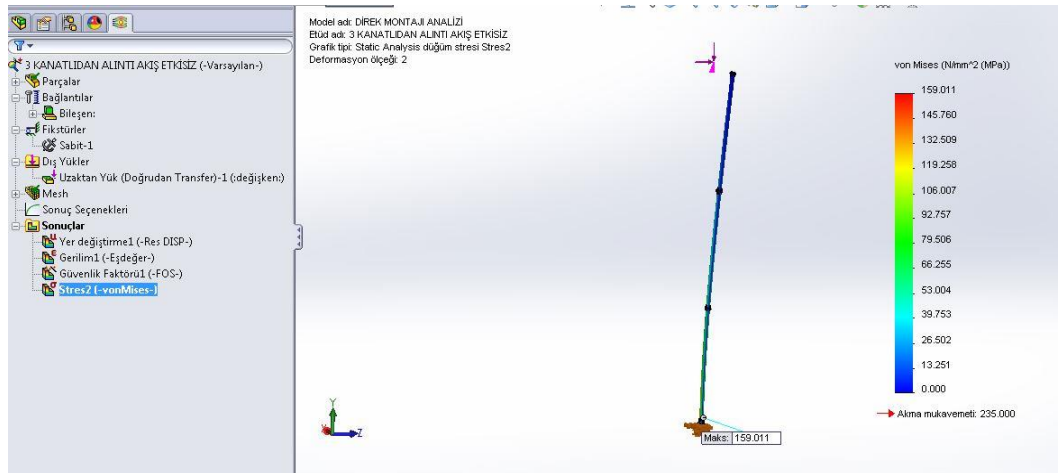


Şekil 8.43: Akış analiz sonucunda oluşan basınçların etkisi ile yapılan statik analizinin yer değiştirme sonuçları.

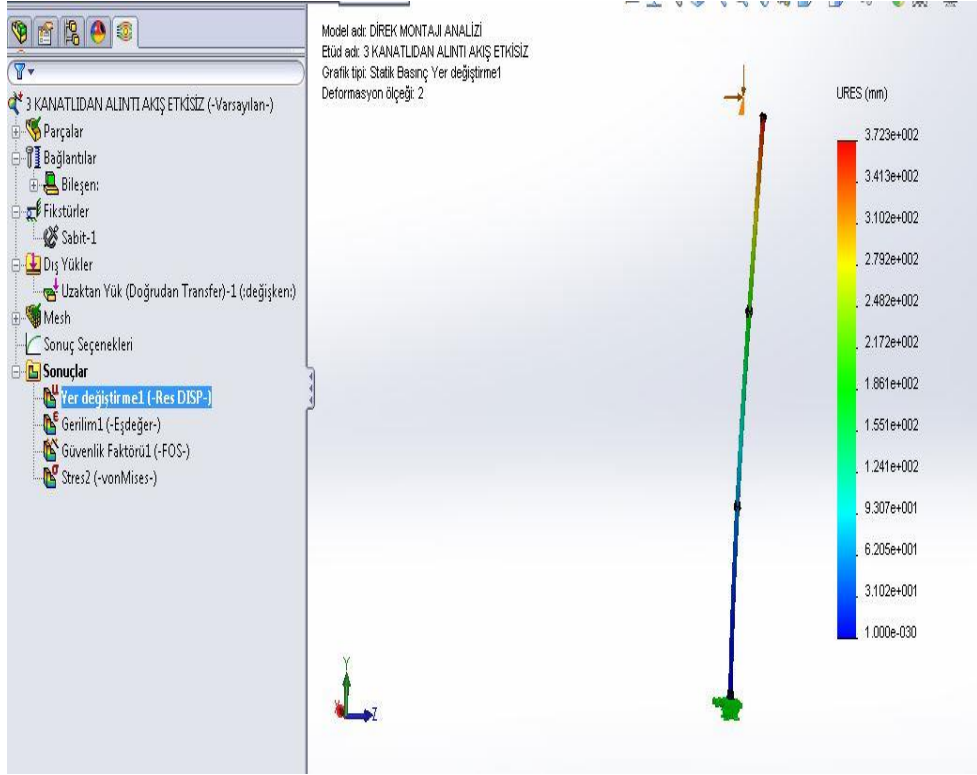


Şekil 8.44: Akış analiz sonucunda oluşan basınçların etkisi ile yapılan statik analizinin güvenlik faktörü sonuçları.

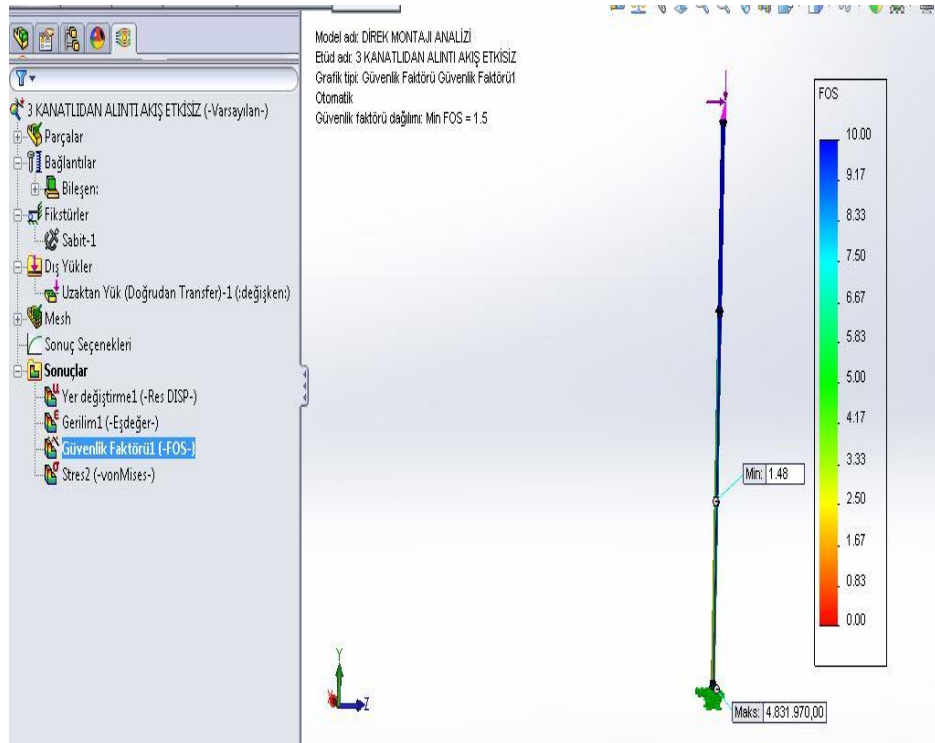
Rüzgar türbinin gövde ve hup kısmınının 30 m/s rüzgar hızında yapılan akış analizi sonucunda rüzgar nedeni ile oluşan kuvvetleri statik analize aktararak gerçekleştirilen çalışmada en yüksek gerilme 159.011 MPA en yüksek yerdeğiştirme 372.3 mm ve güvenlik faktörü direk için en düşük 1.5 çıkmıştır. Bu sonuçlar Şekil 8.45, Şekil 8.46 ve Şekil 8.47’de görsel olarak verilmektedir. Bu kuvvetleri statik analizinde modellerken rüzgar türbini gövde ve hup kısmınının kütle merkezine bir kordinat atandı ve buradan kuvvetler Solidworks simulation da bulunan uzaktan yük komutu ile uygulanmış böylelikle gereksiz parçaları analize dahil etmemiş bulunuyoruz, daha kısa sürede analizi gerçekleştiriyoruz, daha doğru kontak tanımlamaları gerçekleştiriyoruz ve daha doğru sonuçlar elde ediyoruz.



Şekil 8.45: Rüzgar türbinin gövde ve hup kısmınının akış analizi sonucunda oluşan kuvvetleri statik analize aktararak yapılan analiz gerilme sonucu.

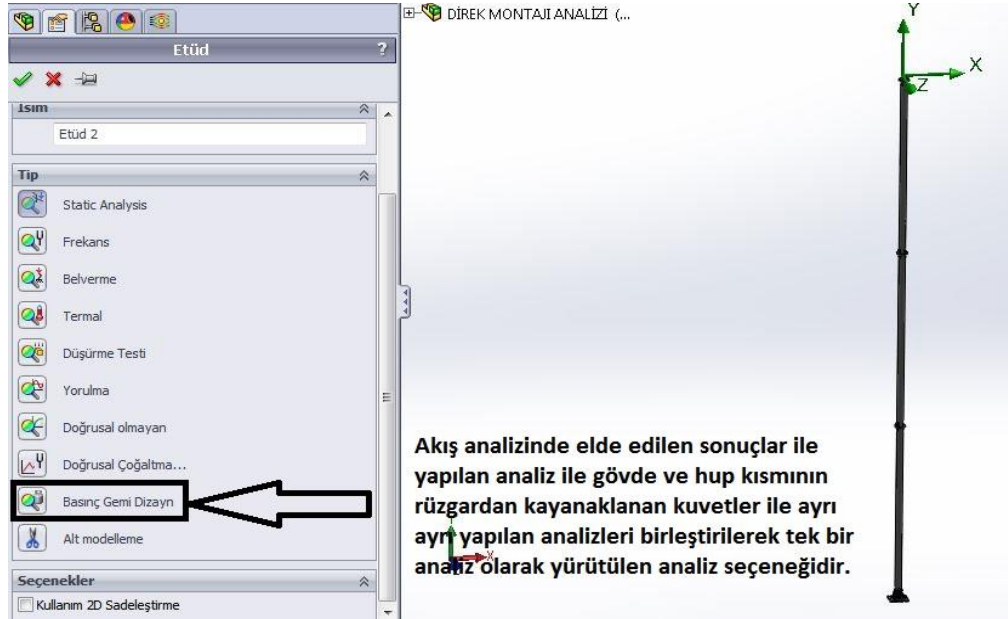


Şekil 8.46: Rüzgar türbinin gövde ve hup kısmınının akış analizi sonucunda oluşan kuvvetleri statik analize akatarılarak yapılan analiz yer değıştirme sonucu.

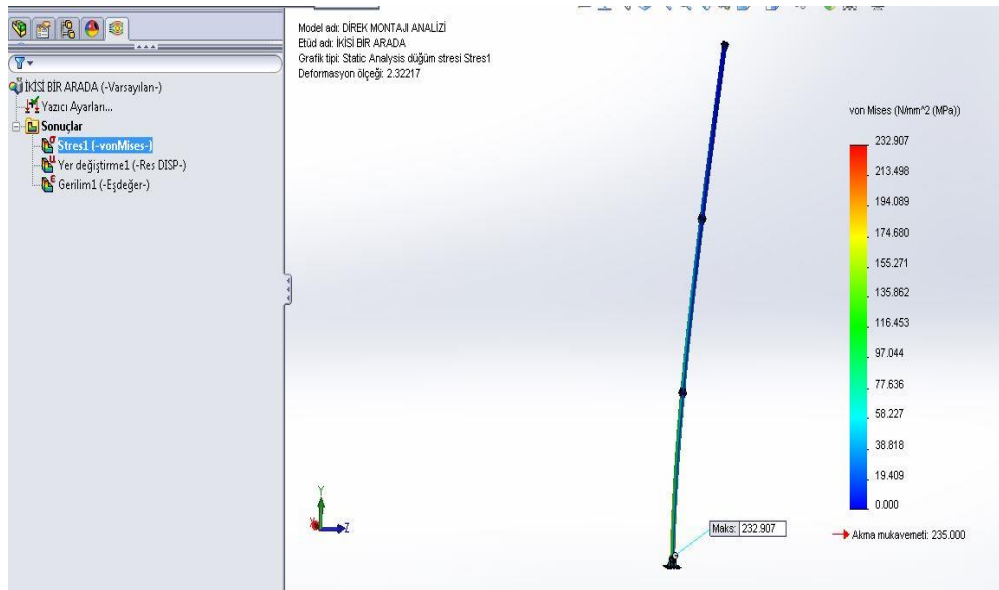


Şekil 8.47: Rüzgar türbinin gövde ve hup kısmınının akış analizi sonucunda oluşan kuvvetleri statik analize akatarılarak yapılan analiz güvenlik faktörü sonucu.

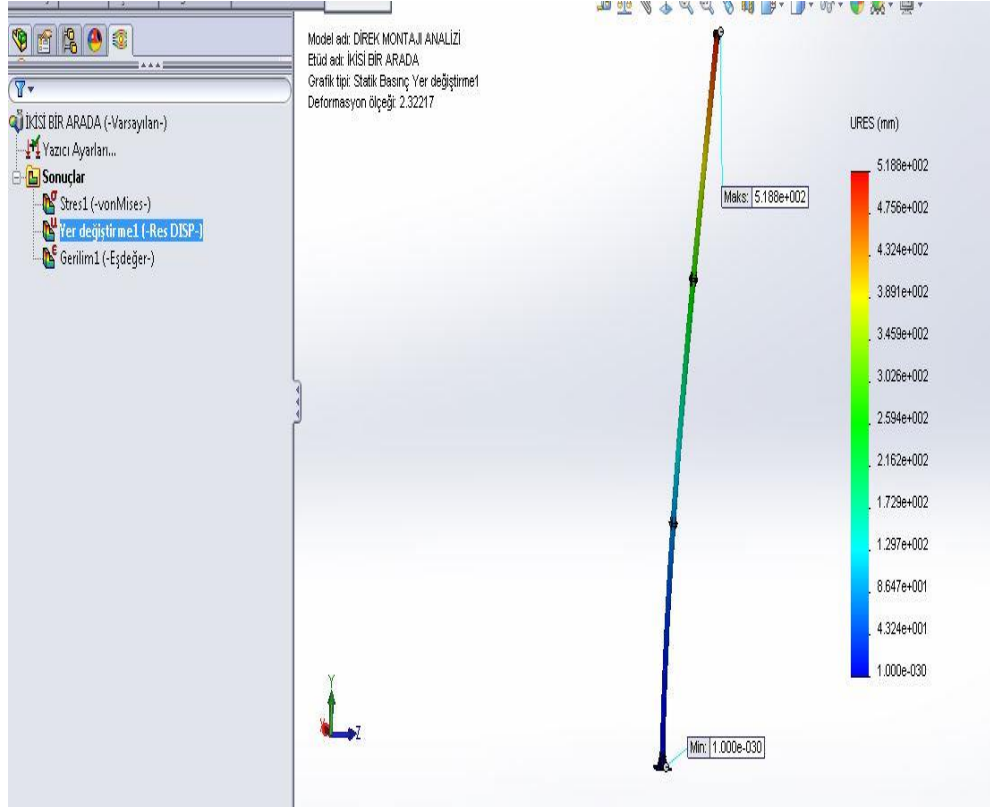
Akış analizinde elde edilen sonuçlar ile yapılan statik analiz ile gövde ve hup kısmının rüzgardan kaynaklanan kuvvetler ile ayrı ayrı yapılan statik analiz sonuçlarını birleştirilerek tek bir analiz olarak yürütülen analiz seçeneği kullanılarak yapılan çalışma sonuçları Şekil 8.49, Şekil 8.50 ve Şekil 8.51’de görsel olarak görülmektedir. Burada en yüksek gerilme 232.907 MPA en yüksek yer değiştirme 518.8 mm ve minimum güvenlik faktörü 1 çıkmıştır.



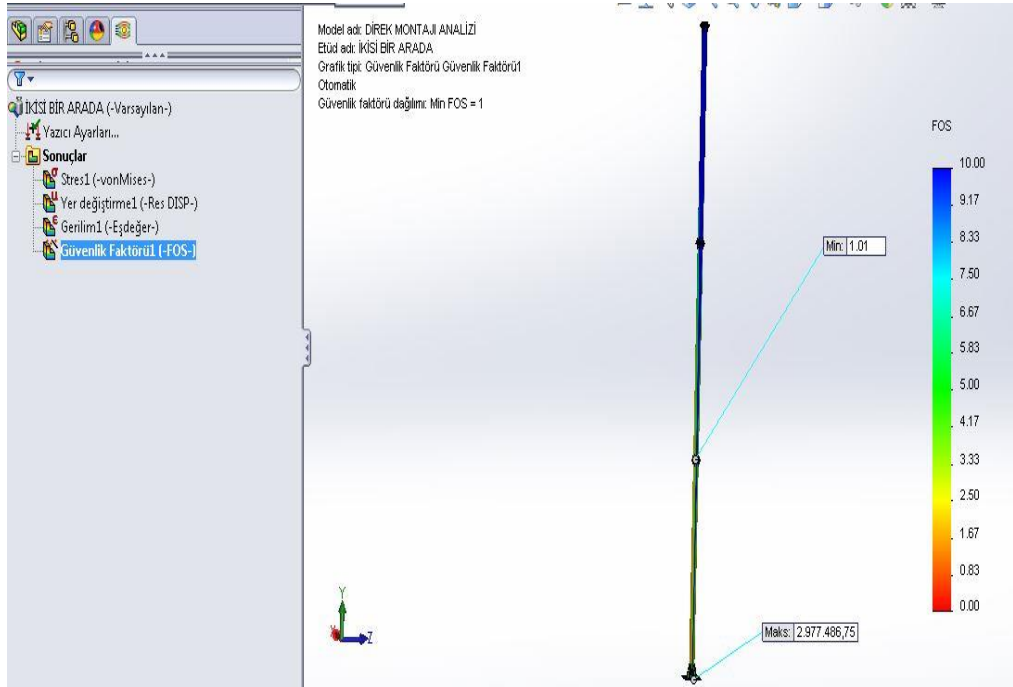
Şekil 8.48: Basınç gemi dizayn analiz seçimi.



Şekil 8.49: İki analiz bir arada yapılan statik analiz çalışması sonucunda oluşan gerilme dağılımı sonuçları.

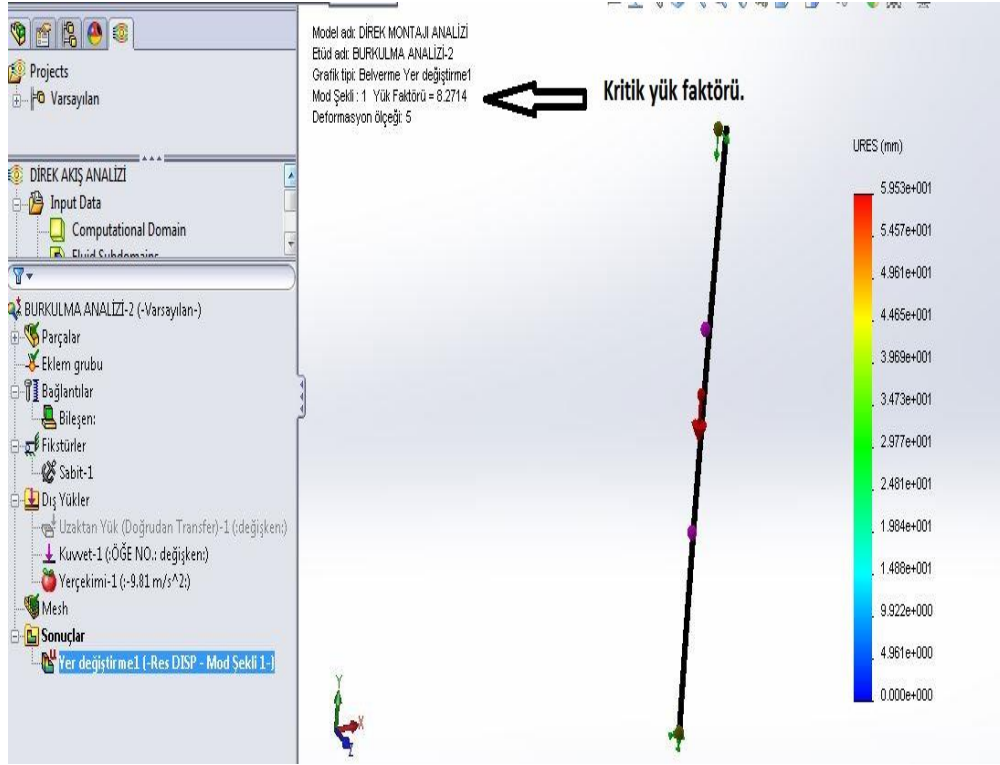


Şekil 8.50: İki analiz bir arada yapılan statik analiz çalışması sonucunda oluşan yer değiştirme sonuçları.



Şekil 8.51: İki analiz bir arada yapılan statik analiz çalışması sonucunda oluşan güvenlik faktörü dağılımı sonuçları.

12 metre uzunluğunda tasarlanan direğin burkulma analizi sonuçları ve kritik yük katsayısı Şekil 8.52’de görülmektedir. Bu analizde girdi kuvvetleri olarak rüzgar türbinini gövde kısmının ağırlığı, rüzgardan kaynaklanan kuvvetler ve direğin kendi ağırlığı alınarak gerçekleştirilecektir. Bu analizde kritik yük katsayısı 8.2714 bulunmuştur ve en yüksek yerdeğiştirme 59.53 mm olarak sonuçlanmıştır.



Şekil 8.52: Burkulma analizi kritik yük faktörü ve yerdeğiştirme sonuçları.

Bu yapılan akış, statik ve burkulma analizlerin sonuçlarına bakıldığında bizim 3 kW’lık rüzgar türbini için tasarladığımız 12 metrelik direk üzerine uygulanan kuvvetlere ve 30 m/s rüzgar şiddetine dayandığı anlaşılmakta fakat yüksek yerdeğiştirmeler meydana geldiği görülmektedir. Bu neden ile rüzgar türbini direğinin gergi halatları ile sabitlemesi yapılması önerilmektedir yerdeğiştirmeleri azaltmak için.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Bu tez çalışması çerçevesinde 3 kW'lık küçük güçlü rüzgar türbininin yeni nesil teknoloji kullanılarak tasarımını, gerekli analizlerini ve hesaplamalarını bilgisayar desteği ile yapılmıştır. Solidworks bilgisayar destekli tasarımı programı kullanılarak 3kW'lık küçük güçlü rüzgar türbininin üç boyutlu katı modeli oluşturulmuştur. Bütün rüzgar türbini bileşenleri modellenmiştir ve daha sonra programın montaj bölümünde parçalar birleştirilerek rüzgar türbin montajı tamamlanmıştır. Bu yapılan çalışmalar sayesinde bir çok araştırmacı ve bu konu ile ilgili insanlara ışık tutacak bir tez ortaya çıkmış bulunmaktadır.
2. Rüzgar türbini boyutlandırması ve bu boyutlandırma da kullanılacak olan denklem ve hesaplamalar tek tek verilmiştir.
3. Rüzgar türbininden 3 kW'lık elektrik enerjisi almak için gerekli olan kanat uzunluğu ve diğer parametreleri hesaplanmıştır. NACA4415 profili, $\lambda_D = 7$, $R = 2$, $a_D = 5^\circ$ için optimum profil boyu ve optimum bağlama açısı, 3 kanatlı için profil giriş hattı boyunca ayrı ayrı hesaplamaları tek tek verilmiştir. Bu tasarımın ve hesaplamalarının doğruluğunu karşılatırmak için ayrı olarak airfoiltools internet sitesinden yararlanarak NACA 4415 kanat profilinin $a_D = 5^\circ$ ve hesaplanan profil boylarında ki damla profilleri hazır olarak indirilerek kanat tekraradan çizilmiştir. Görülmüştür ki iki tasarım arasında sapmanın az olduğunu ve ihmal edilebilecek düzeyde olduğudur.
4. Solidworks programında rüzgar türbini kanatının nasıl çizildiği ve nelere dikkat edilmesi gerektiği adım adım anlatılarak çizilmiştir.
5. Rüzgar türbini kanatları ve hup kısmı için akış analizleri yapılmış kanat üzerine, hup kısmı üzerine gelen basınç dağılımları, hız dağılımları, oluşan kuvvetler listelenmiştir. Bu analizler sonucunda yapılan statik analizler ile tasarım doğrulaması yapılmış bulunmaktadır.
6. Solidworks programında nasıl akış analizi yapılacağı ve buradan oluşan kuvvet ve basınçları nasıl statik analize aktarılacağı ve statik analizin nasıl yapılacağı adım adım anlatılarak yapılmış bulunmaktadır.

7. Bu çalışmada tasarlanmış olduğumuz rüzgar türbinine ait türbin kanadının doğal dairesel frekansı hesaplanmıştır. Solidworks simulation programında frekans analizi seçilerek sonlu elemanlar yöntemi ile doğal dairesel frekansları ve bu frekanslara ait titreşim türleri belirlenmiştir. Sonuç olarak görülmüştür ki bizim tasarladığımız rüzgar türbininde çalışma şartlarına göre kanatların rezonans bölgesinde çok uzak olduğu saptanmıştır.
8. Rüzgar türbininin direği üzerine gelen kuvvetleri belirlemek ve bu direğin tasarım doğrulamasını yapabilmek için akış analizleri yapılmıştır bu sayede kuvvetler belirlenip ve sonuçlar doğrultusunda solidworks simulation programı kullanılarak statik analizleri, burkulma analizleri yapılmış ve gerekli önlemler söylenmiştir. Direğin statik analizi yapılırken iki ayrı statik analizi tek bir statik analiz olarak Solidworks simülasyon'da nasıl yürütüldüğünü adım adım anlatılmıştır. Bu sayede iki ayrı analizi harmanlayarak tasarım üzerinde daha doğru yorum yapma ve bunun yanında oluşan kuvvetleri ve deformasyonları tek bir analizde görme şansına sahip oluyoruz.
9. Rüzgar türbini için yeni bir kanat kontrol mekanizması tasarlanmıştır. Bu tasarlanan kanat kontrol mekanizması uygulanabilirliği kolay ve diğer kanat kontrol mekanizmalara göre daha uygun fiyat olarak ve mekanik bir tasarım olduğundan ömür olarak daha uzundur.
10. Tasarlanmış bulunan kanat kontrol mekanizması sayesinde istenilen devir de sabit tutularak rüzgar türbininin yüksek devirlerde çalışarak zarar görmesini engeler. Bu sabit tutma işlemi ise elektrikli liner aktüatör motor sayesinde sağlanacağı ve bu sistemin nasıl montajı yapılacağı şekiller ile adım adım gösterilmiştir.
11. Elde edilen elektrik enerjisinin frekans dalgalanmasının mekanik bir yöntem ile çözümlenebilirliği gösterilmiştir. Şiddetli rüzgarlar karşısında türbin kanatlarının kırılması ve kanat yuvalarının hasar görmesi sorununa mekanik bir çözüm geliştirilmiştir. Rüzgar türbini durdurulması gerektiğinde ve bu sistem kullanılarak fazaladan bir frenleme sistemi eklenmesine gerek kalmamıştır bu sistem sayesinde.

10. KAYNAKLAR

- [1] Karadağ, H.İ., “Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Rüzgar Enerjisinin Önemini ve Rüzgar Türbini Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2009).
- [2] Güneş, İ.İ., “Bir Rüzgar Türbininin Modellenmesi, Simulasyonu ve Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gebze, (2006).
- [3] Ergür, Ö., “Rüzgar Türbinleri İle Enerji Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2006).
- [4] Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, (15 Nisan 2015), http://www.tureb.com.tr/attachments/article/169/Turkiye_Ruzgar_Enerjisi_istatistik_Raporu_Ocak_2014.pdf , (2014).
- [5] Temiz, F.İ., “Rüzgar Enerjisi Sistemlerinde Optimizasyon”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü*, İstanbul, (2010).
- [6] Gözler, M.Z., “Rüzgar Enerjisi”, (15 Nisan 2015), <http://www.21yyte.org/tr/arastirma/enerji-ve-enerji-guvenligi-arastirmalari-merkezi/2014/05/31/7621/ruzgar-enerjisi> , (2014).
- [7] Emniyetli, G., “Evsel Elektrik İhtiyacının Karşılanması İçin Rüzgar Türbini Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, (2007).
- [8] Onat, C., Kepçeler, T. ve Orgül, B.O., “Rüzgar Türbini Kanatlarının Katı Modellemesi”, *Mühendis ve Makine*, Cilt: 45 (Sayı:533), (2004).

[9] Karalı, V.M., “11 KW Yatay Eksen Rüzgar Türbini Tasarımı ve İmalat”, (5 Şubat 2015) , www.emo.org.tr/ekler/24267fe94355723_ek.doc, (2005).

[10] Kanat Damla Profilleri, (5 Şubat 2015), <http://airfoiltools.com/>

[11] Çoban, T., “Rüzgar Türbini Pervane Kanadının Titreşim Analiz” Bitirme Tezi, *EGE Üniversitesi Kütüphanesi Tezler Bölümü*, İzmir, (2003).