

T.C.  
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



BİLGİSAYAR DESTEKLİ 1 KW' LİK RÜZGÂR TÜRBİNİ TASARIMI VE  
PROTOTİP ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oğuzhan TOSUN

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

Eylül, 2017







**T.C.  
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**BİLGİSAYAR DESTEKLİ 1 KW' LİK RÜZGÂR TÜRBİNİ TASARIMI VE  
PROTOTİP ÜRETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Oğuzhan TOSUN**

**(Y1413.080024)**

**Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Makine Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zafer UTLU**

**Eylül, 2017**





T.C.  
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

**Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi**

Enstitümüz Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı **Y1413.080024** numaralı öğrencisi **Oğuzhan TOSUN**'un "**BİLGİSAYAR DESTEKLİ 1 KW'LIK RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ**" adlı tez çalışması Enstitümüz Yönetim Kurulunun 15.08.2017 tarih ve 2017/18 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından **oğuzhan** ile Tezli Yüksek Lisans tezi olarak **karar** edilmiştir.

**Öğretim Üyesi Adı Soyadı**

**İmzası**

**Tez Savunma Tarihi : 27/09/2017**

**1)Tez Danışmanı:** Prof. Dr. Zafer UTLU

**2) Jüri Üyesi :** Yrd. Doç. Dr. Barış KINACI

**3) Jüri Üyesi :** Yrd. Doç. Dr. Vedat ÖZTÜRK

.....  
.....  
.....

Not: Öğrencinin Tez savunmasında **Başarılı** olması halinde bu form **imzalanacaktır**. Aksi halde geçersizdir.





## **YEMİN METNİ**

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “**BİLGİSAYAR DESTEKLİ 1 KW’ LİK RÜZGÂR TÜRBİNİ TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ**” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla doğrularım.

**Oğuzhan TOSUN**



## **ÖNSÖZ**

Çalışma ve araştırmalarım boyunca geniş bilgi birikimi, yenilikçi düşünceleri ve tecrübesiyle yol gösteren, yurtdışı eğitime gitmeme vesile ve her daim yanımda olan başta Sayın hocam Prof. Dr. Zafer UTLU' ya, İstanbul Aydın Üniversitesi' nde bize birer kimlik kazandıran, gerek derslerde gerek hayatla ilgili verdikleri bilgilerle bizi olgun birey yapan tüm hocalarıma, tezimin bir kısmını hazırladığım Cracow University of Technology' ye ve türbin tasarımı konusunda birlikte çalıştığım Sayın Doç. Dr. Artur CEBULA' ya, ayrıca Polonya' da hem okul hem de sosyal hayatımda daha çabuk adapte olmamı sağlayan her daim yardım eden Sayın Dr. Janusz Poboźniak' a, Prototip yapım sürecinde malzeme imali ve diğer üretim aşamalarında destek olan Bimed çalışma arkadaşlarıma, beni bu süreçte destekleyen ailem ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

**Eylül, 2017**

**Oğuzhan TOSUN**

**(Makina Mühendisi)**



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
ABSTRACT .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. DÜNYANIN RÜZGÂR ENERJİSİ POTANSİYELİ VE TÜRKİYE’NİN DURUMU .....</b>	<b>3</b>
2.1 Avrupa 2016 Rüzgar Enerji İstatistiği.....	7
<b>3. RÜZGÂR TÜRBİNİNİN MODELLENMESİ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ 11</b>	<b>11</b>
3.1 Rüzgar Türbininin Bileşenleri Ve Görevleri.....	12
3.1.1 Makine Bölümü (Nacelle).....	14
3.1.2 Türbin Kanatları .....	14
3.1.3 Flanş (Hub) .....	14
3.1.4 Düşük Hız Mili.....	14
3.1.5 Dişli Kutusu (Gearbox).....	14
3.1.6 Yüksek Hız Mili.....	15
3.1.7 Elektrik Üreteci (Jeneratör).....	15
3.1.8 Bilgisayar Kontrol Ünitesi Görevi .....	15
3.1.9 Türbin Hidrolik Sistemi Görevi .....	15
3.1.10 Türbin Soğutma Ünitesi Görevi.....	16
3.1.11 Türbin Kulesi (Tower) .....	16
3.1.12 Anemometre( Rüzgâr Ölçer).....	17
3.1.13 Yön Bulma Mekanizması ( Yaw) .....	17
3.2 Rüzgâr Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları.....	17
3.2.1 Rüzgâr Enerjisinin Sağladığı Avantajlar.....	17
3.2.2 Rüzgâr Enerjisinin Dezavantajları .....	18
<b>4. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN SINIFLANDIRILMASI.....</b>	<b>19</b>
4.1 Dönme Eksen Yönüne Göre Rüzgâr Türbin Sistemleri.....	20
4.1.1 Ekseni Yatay Olan Rüzgâr Türbin Sistemleri .....	20
4.1.2 Ekseni Düşey Olan Rüzgâr Türbin Sistemleri .....	22
4.1.3 Kanatlardaki Güç Kontrol Sistemleri.....	25
4.1.3.1 Eğim(Pitch) Kontrollü Rüzgâr Türbinleri.....	25
4.1.3.2 Durma( Stall) Kontrollü Rüzgâr Türbinleri .....	25
4.1.3.3 Aktif Stall Kontrollü Rüzgâr Türbinleri.....	25
4.1.4 Diğer Güç Kontrol Yöntemleri .....	26
4.1.5 Rüzgâr Türbinlerinin Karşılaştırılması .....	26

<b>5. RÜZGÂR ENERJİSİ İÇİN GELİŞTİRİLEN DEPO ETME YÖNTEMLERİ</b>	<b>31</b>
5.1 Sıkıştırılmış Hava Depo Etme	31
5.2 Hidrojen Gazı Depo Etme	32
5.3 Pompalı Hidroelektrik Depolama	33
5.4 Doldurulabilen Bataryalar (Akümülatörler)	33
5.5 Rüzgâr Enerjisi Depolamak İçin Yeni Geliştirilen Yöntemler	34
<b>6. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN JENERATÖR SİSTEMLERİ</b>	<b>37</b>
6.1 Dc Makine	37
6.2 Senkron Makineler	38
6.3 Asenkron Makine	39
<b>7 TÜRBİN MODELİNİN MATEMATİKSEL FORMÜLASYONU</b>	<b>41</b>
7.1 Tek Boyutlu Momentum Teorisi Ve İdeal Betz Limiti	43
7.2 Türbülanslı Dönme Hareketi Olan İdeal Türbin	50
7.3 Kanat Uç Hız Oranı	56
7.4 Hava Yoğunluğunun Türbine Etkisi	58
7.5 Türbin Rotorundan Alınabilecek Faydalı Güç	59
<b>8. BETZ MODELİNİN İRDELENMESİ VE GGS MODELİYLE KARŞILAŞTIRILMASI</b>	<b>63</b>
8.1 Eğrisel Akış İçin Önerilen Model	64
8.2 Tahmini Enerji Üretimi için Geliştirilmiş Olan Diğer Teoriler	66
<b>9. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN TERMODİNAMİK YÖNDEN İNCELENMESİ VE EKSERJİ ANALİZİ</b>	<b>69</b>
9.1 Enerji ve Ekserji Verimliliği	72
<b>10. TAHMİNİ YILLIK ENERJİ ÜRETİMİ HESAPLAMA YÖNTEMLERİ</b>	<b>75</b>
10.1 Rüzgâr türbininin güç eğrisi	76
10.2 Rüzgâr Hızı Dağılımı	77
10.2.1 Olasılık Yoğunluğu Fonksiyonu	77
10.2.2 Kümülatif Dağılım Fonksiyonu	77
10.3 Sık Kullanılan Olasılık Dağılımları	78
10.3.1 Rayleigh Olasılık Dağılımı	78
10.3.2 Weibull Olasılık Dağılımı	79
10.4 Aşırı Rüzgâr Hızları (Gumbell Olasılık Dağılımı)	82
10.5 Weibull ve Rayleigh Dağılımlarının Karşılaştırılması	83
10.6 Rotor Alanının ve Üreteç Nominal Gücünün Optimizasyonu	85
<b>11. KANAT TASARIMININ AERODİNAMİK ESASLARI</b>	<b>89</b>
11.1 Kanat Terminolojisi	89
11.2 Kaldırma Kuvveti, Sürüklenme Kuvveti ve Boyutsuz Parametreler	90
11.3 Kanat Elemanı Teorisi	93
11.4 Kanatta Zorlanmalara Bağlı Meydana Gelen Gerilmeler	97
11.4.1 Aerodinamik yüklenmelere bağlı meydana gelen eğilme	97
11.4.2 Yerçekimi Yüklenmelerine Bağlı Meydana Gelen Eğilme	98
11.5 Ansys Destekli Kanat Mekanik Analizi	99
<b>12. RÜZGAR TÜRBİNİ BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMI</b>	<b>103</b>
12.1 Kuyruk Modellemesi	104
12.2 Fren Sistemi Modellemesi	105
12.3 Akış Analizi	108
12.4 Kanat Modeli 1	109
12.5 Kanat Modeli 2	111
<b>13. TASARIMIN PROTOTİP İMALATI</b>	<b>113</b>

<b>14. SONUÇLAR .....</b>	<b>119</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>121</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>125</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>129</b>





## KISALTMALAR

$\Delta ke$	: Kinetik enerji değişikliği
$a'$	: Açısal indüksiyon faktörü
$A$	: Alan
$a$	: Eksenel indüksiyon faktörü
$a$	: İvme
$AC$	: Alternatif akım
$c$	: Ölçek parametresi
$C_d$	: Sürüklenme kuvveti katsayısı
$C_l$	: Kaldırma kuvveti katsayısı
$C_p$	: Güç katsayısı
$C_T$	: İtme katsayısı
$DC$	: Doğru akım
$DETR$	: Düşey eksenli rüzgâr türbini
$dF_D$	: Artımlı sürüklenme kuvveti
$dF_L$	: Artımlı kaldırma kuvveti
$dF_N$	: Dönme düzlemine etkileyen normal artımlı kuvvet
$dF_T$	: Kanada etki eden torku oluşturan teğetsel kuvvet
$E$	: Elastisite modülü
$E$	: Kinetik enerji
$E_{tot}$	: Yıllık üretilen toplam enerji değeri
$Ex^Q$	: Isı transfer kaynaklı ekserji
$Ex^W$	: Türbinde üretilen işe ait ekserji
$F$	: Kuvvet
$F(U)$	: Kümülatif dağılım fonksiyonu
$f(v)$	: Rüzgâr hızı olasılık fonksiyonu
$h$	: Entalpi
$H_m$	: Deniz seviyesinden yükseklik
$I$	: Atalet momenti
$I$	: Ekserji kaybı
$k$	: Şekil parametresi
$ke$	: Birim kütle başına kinetik enerji
$Ke$	: Enerji modeli faktörü
$m$	: Kütle
$\dot{m}$	: Kütlesel debi
$M_B$	: Eğilme momenti
$MIT$	: Massachusetts teknoloji enstitüsü
$m_{in}$	: Türbine giren kütlesel hava debisi
$m_{out}$	: Türbinden çıkan kütlesel hava debisi
$P$	: Hava basıncı
$\Theta_p$	: Kanat kesit pitch açısı
$P$	: Rüzgârdaki güç
$p(U)$	: Rüzgâr hızının olasılık yoğunluk fonksiyonu

<b>pe</b>	: Birim kütle başına potansiyel enerji
<b>P<sub>e</sub></b>	: Elektriksel güç çıkışı
<b>P<sub>eR</sub></b>	: Nominal rüzgâr hızında nominal güç çıkışı
<b>P<sub>g</sub></b>	: Rüzgâr türbini güç eğrisi fonksiyonu
<b>P<sub>m</sub></b>	: Gerçek güç çıkışı
<b>P<sub>m</sub></b>	: Türbin çıkış gücü
<b>P<sub>mR</sub></b>	: Nominal değerdeki çıkış gücü
<b>P<sub>t</sub></b>	: Dişli çıkış gücü
<b>P<sub>w</sub></b>	: Rüzgâr gücü
<b>Q</b>	: Tork
<b>Q<sub>loss</sub></b>	: Rüzgâr türbinindeki ısı kaybı
<b>Q<sub>r</sub></b>	: Sistem sınırında r boyunca sisteme ısı transfer miktarı
<b>R</b>	: Gaz sabiti
<b>r</b>	: Yarıçap
<b>Re</b>	: Reynold sayısı
<b>REPA</b>	: Rüzgâr enerjisi potansiyel atlası
<b>s</b>	: Birim yer değiştirme
<b>Ş<sub>üre</sub></b>	: Entropi
<b>T</b>	: İtme kuvveti
<b>Θ<sub>T</sub></b>	: Kanat büküm açısı
<b>T</b>	: Sıcaklık
<b>t</b>	: Zaman
<b>TÜREB</b>	: Türkiye rüzgâr enerjisi birliği
<b>U</b>	: Hava hızı
<b>UIUC</b>	: Havacılık ve uzay mühendisliği departmanı
<b>U<sub>rel</sub></b>	: Bağlı rüzgâr hızı
<b>V<sub>maz</sub></b>	: Türbinin devreden çıkma hızı
<b>V<sub>min</sub></b>	: Türbinin devreye girme hızı
<b>v<sub>w</sub></b>	: Rüzgâr hızı
<b>W</b>	: Net iş
<b>W</b>	: Yapılan iş
<b>W<sub>a</sub></b>	: Yayılı yük
<b>WEC</b>	: Dünya enerji konseyi
<b>y</b>	: tarafsız eksene olan uzaklık
<b>YERT</b>	: Yatay eksenli rüzgâr türbini
<b>α</b>	: Hücüm açısı
<b>ΔH</b>	: Entalpi değişikliği
<b>η</b>	: Verim
<b>η<sub>ex</sub></b>	: Ekserji verimliliği
<b>η<sub>g</sub></b>	: Jeneratör verimi
<b>η<sub>gR</sub></b>	: Nominal güçteki jeneratör verimi
<b>η<sub>m</sub></b>	: Dişli kutusu verimi
<b>η<sub>o</sub></b>	: Türbin genel verimliliği
<b>λ</b>	: Kanat uç hız oranı
<b>ρ</b>	: Havanın yoğunluğu
<b>ρ</b>	: Eğrilik yarıçapı
<b>σ<sub>e</sub></b>	: Elastik eğilme gerilmesi
<b>σ<sub>U</sub></b>	: Rüzgâr hızının standart sapması
<b>φ</b>	: Bağlı rüzgâr açısı
<b>Ω</b>	: Açısal hız

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 4.1:</b> Büyük ve küçük yapılı türbinlerin karşılaştırılması .....	27
<b>Çizelge 4.2:</b> Rüzgâr Alış Yönüne Göre Türbinlerin Karşılaştırılması .....	27
<b>Çizelge 4.3:</b> Yatay ve dikey eksenli rüzgâr türbinlerin karşılaştırma.....	28
<b>Çizelge 4.4:</b> Onshore(karaüstü) ve Offshore(denizüstü) Rüzgâr Santrallerinin Karşılaştırılması .....	28
<b>Çizelge 7.1:</b> Güç katsayısı, <b><math>C_p, max</math></b> , uç hız oranının bir fonksiyonudur, <b><math>\lambda</math></b> ; <b><math>a2</math></b> uç hız oranı yerel uç hız oranına eşit olduğundaki eksenel indüksiyon faktörü .....	54
<b>Çizelge 7.2:</b> Sabit Parametreler [31].....	59
<b>Çizelge 10.1:</b> Weibull ve Rayleigh fonksiyonlarına göre tahmini yıllık enerji üretimi .....	84
<b>Çizelge 13.1:</b> 500 watt alternatör için üretebileceği güç verileri.....	117



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Dünya genelinde teorik rüzgâr enerji potansiyelinin bölge bazında dağılımı .....	3
Şekil 2.2: Yeryüzü genelinde teorik potansiyelin yüzdesel olarak bölgelere göre dağılımı .....	4
Şekil 2.3: Türkiye’ de 50 m yükseklikteki rüzgâr hızı değerleri (REPA) .....	5
Şekil 2.4: Türkiye’ de 50 metre yükseklikteki rüzgar güç yoğunluğu değerleri(REPA) .....	5
Şekil 2.5: Türkiye rüzgâr enerji santralleri atlası (TÜREB).....	6
Şekil 2.6: Türkiye Rüzar enerji santralleri yıllara göre kümülatif kurulumu .....	6
Şekil 2.7: Türkiye’ deki rüzgar enerji santralleri için yıllık kurulum.....	7
Şekil 2.8: Avrupa Birliğinde 2005- 2016 yılları arasındaki kümülatif güç kapasitesi	7
Şekil 2.9: 2016 yılındaki rüzgâr enerjisi kapasitesi .....	8
Şekil 2.10: Avrupa’ da 2016 yılında kurulmuş yeni rüzgâr enerjisi kapasitesi dağılımı .....	9
Şekil 2.11: 2016 yılında yeni kurulmuş enerji güç kapasitesi dağılımı .....	9
Şekil 3.1: Rüzgâr Türbinin Çalışma Prensibi [10].....	12
Şekil 3.2: Rüzgâr türbini temel bileşenleri .....	13
Şekil 3.3: Rüzgâr türbinin yıllara göre kule uzunluk değişimi [12] .....	16
Şekil 3.4: Enerji üretim sistemlerinin çevresel etkilerinin karşılaştırılması [13] .....	18
Şekil 4.1: Çalışma prensiplerine göre rüzgâr türbin sınıflandırması .....	19
Şekil 4.2: Kanat sayısına göre türbin modelleri.....	20
Şekil 4.3: Yatay eksenli rüzgâr türbin santrali bileşenleri .....	21
Şekil 4.4: Darrieus Tipi Rüzgâr Türbinleri.....	23
Şekil 4.5: Savonius Tipi Rüzgâr Türbinleri .....	24
Şekil 4.6: Deniz üstü ve kara üstü rüzgâr santralleri .....	29
Şekil 5.1: Rüzgâr enerjisini, sıkıştırılmış hava ile depo etmenin görünümü .....	31
Şekil 5.2: Sıkıştırılmış hidrojen gazı depolamanın şematik görünümü .....	32
Şekil 5.3: Pompalı hidroelektrik enerji depo etme sisteminin şematik görünümü ....	33
Şekil 5.4: Kurşun Asit Akümülatör .....	34
Şekil 5.5: Rüzgâr enerjisinin depo edilmesini sağlayan denizaltı hava topu.....	34
Şekil 5.6: Dalgaların Altına Rüzgâr Enerjisi Saklama Sistemi .....	35
Şekil 6.1: Dc Makine .....	38
Şekil 6.2: Senkron makine .....	39
Şekil 6.3: Sincap kafesli asenkron makine .....	40
Şekil 6.4: Kendinden uyartımlı asenkron makine.....	40
Şekil 7.1: Süpürme Alanı.....	43
Şekil 7.2: Bir rüzgâr türbininin aktüatör disk modeli .....	44
Şekil 7.3: Rotor arka bölgesindeki eksenel indüksiyon faktörü ve hıza göre değişen itme ve güç katsayıları .....	48
Şekil 7.4: Türbin Rotorundan Geçen Hava Hız ve Basınç Değişimi .....	49
Şekil 7.5: Dönen rüzgâr türbini kanatları arkasındaki akış için akım borusu modeli	50

<b>Şekil 7.6:</b> Rotor analizi için geometri; $U$ , bozulmamış hava hızı, $a$ , indüksiyon faktörü, $r$ , radyus.....	50
<b>Şekil 7.7:</b> Girdap rotasyonlu ve rotasyonsuz ideal bir yatay eksenli rüzgâr türbini uç hız oranının bir fonksiyonu olarak teorik maksimum güç katsayısı.....	55
<b>Şekil 7.8:</b> Girdap rotasyonlu ideal bir rüzgâr türbini için indüksiyon faktörü; uç hız oranı, $\lambda = 7,5$ ; $a$ , eksenel indüksiyon faktörü; $a'$ , açısız indüksiyon faktörü; $r$ , yarıçap; $R$ rotor yarıçapı .....	55
<b>Şekil 7.9:</b> Farklı kanat yapılarındaki, kanat uç hız – güç katsayısı ilişkisi .....	56
<b>Şekil 7.10:</b> Rotor tipi, uç hız oranı ve güç katsayısı arasındaki ilişki.....	56
<b>Şekil 7.11:</b> Hub merkezinden kanat ucuna gittikçe kanat hızları .....	57
<b>Şekil 7.12:</b> Barometrik formülasyon [30] .....	58
<b>Şekil 7.13:</b> Değişken eğimli türbinlerin shaft güç çıkışı.....	59
<b>Şekil 7.14:</b> MOD-2 Türbin modeli için rüzgâr türbini performans katsayısı ilişkisi	60
<b>Şekil 7.15:</b> MOD-2 Rüzgâr türbin modeli [33].....	60
<b>Şekil 7.16:</b> Rüzgâr elektrik sistemi .....	61
<b>Şekil 8.1:</b> a)Betz Doğrusal Akış Modeli, b) Önerilen kavisli akış modeli, $\Phi$ = rotorun düzleme çarptığı açı.....	64
<b>Şekil 8.2:</b> Eğim açısına karşı akış ve verimlilik.....	65
<b>Şekil 8.3:</b> Betz ve GGS modelinin karşılaştırılması .....	65
<b>Şekil 8.4:</b> $C_T$ ve $C_P$ değerlerinin 0 ile 1 arasındaki değişimi [37] .....	67
<b>Şekil 9.1:</b> Değişik rüzgâr hızlarındaki sıcaklık değişiminin ekserji verimliliğine etkisinin incelenmesi [39].....	71
<b>Şekil 9.2:</b> Rüzgâr türbini ve rüzgâr enerjisi girdi çıktı değişkenleri .....	72
<b>Şekil 10.1:</b> Türbin güç eğrisi grafiği.....	76
<b>Şekil 10.2:</b> Normal dağılım ve çarpık dağılım.....	78
<b>Şekil 10.3:</b> Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu örneği.....	79
<b>Şekil 10.4:</b> $U = 6 \text{ m/s}$ için Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunun örneği.....	80
<b>Şekil 10.5:</b> Gumbel Dağılım Gösterimi .....	83
<b>Şekil 10.6:</b> M.Torres TWT 1.65-82 Türbini [44] .....	84
<b>Şekil 10.7:</b> İdeal Güç Eğrisi.....	85
<b>Şekil 10.8:</b> Rotor çapı arttırıldığında güç eğrisindeki meydana gelen değişim .....	86
<b>Şekil 10.9:</b> Jeneratör kapasitesi arttırıldığında güç eğrisinde meydana gelen değişim .....	86
<b>Şekil 11.1:</b> Kanat terminolojisi gösterimi .....	90
<b>Şekil 11.2:</b> Kanat profil örnekleri .....	90
<b>Şekil 11.3:</b> Bir kanat kesiti üzerindeki kuvvetler ve momentler; $c$ , kord; $a$ , hücum açısı. Pozitif kuvvetlerin ve momentlerin yönü, ok yönü ile gösterilir. ....	91
<b>Şekil 11.4:</b> Kanat elemanlarının şematik yapısı; .....	93
<b>Şekil 11.5:</b> Bir rüzgâr yönünde yatay eksenli rüzgâr türbini için genel geometri; $a$ , eksenel indüksiyon faktörü; $U$ , bozulmamış akışın hızı; $\Omega$ , rotorun açısız hızı .....	94
<b>Şekil 11.6:</b> Yatay eksenli rüzgâr türbininin analizi için kanat geometrisi .....	95
<b>Şekil 11.7:</b> Aerodinamik yükler sebebiyle rüzgâr türbini bıçağında meydana gelen eğilme .....	97
<b>Şekil 11.8:</b> Yerçekimi yükleri sebebiyle bıçağın eğilme durumu.....	98
<b>Şekil 11.9:</b> $5 \text{ m/s}$ ' lik akışkan hızında bıçak üst bölgesinde meydana gelen basınç dağılımı .....	100
<b>Şekil 11.10:</b> $5 \text{ m/s}$ ' lik akışkan hızında bıçak alt bölgesinde meydana gelen basınç dağılımı .....	100

Şekil 11.11: Hava akızsız (rüzgâr olmayan) ortamda meydana gelen normal gerilmeler.....	101
Şekil 11.12: Hava akızsız (rüzgâr olmayan) ortamda meydana gelen kayma gerilmeleri.....	101
Şekil 12.1: Kanat damla modeli .....	103
Şekil 12.2: AH79-100 C kanat katı modeli .....	103
Şekil 12.3: Kanat katı modeli 2 .....	104
Şekil 12.4: Rüzgâr türbini kuyruk modellemesi .....	104
Şekil 12.5: Fren disk tutucu .....	105
Şekil 12.6: Fren diski.....	105
Şekil 12.7: Hidrolik fren kaliperi.....	106
Şekil 12.8: Alternatör modellemesi .....	106
Şekil 12.9: Burun modellemesi.....	107
Şekil 12.10: Destek plakası.....	107
Şekil 12.11: Genel görünüş .....	108
Şekil 12.12: Solidworks' te modellenen hava hacmi.....	108
Şekil 12.13: Genel parametreler .....	109
Şekil 12.14: Model 1 için akış analizi .....	109
Şekil 12.15: Hızın kesitsel görünümü ( Model 1) .....	110
Şekil 12.16: Kanat çevresinde basıncın kesitsel görünümü.....	110
Şekil 12.17: X yönünde ki rüzgâr hızı .....	111
Şekil 12.18: AH79-100C kanat modeli için akış dağılımı.....	111
Şekil 12.19: AH79-100C kanat modeli için kesit görünümü .....	112
Şekil 12.20: AH79-100C kanat çevresindeki basınç değişimi .....	112
Şekil 13.1: Alternatör ve dişli görünümü .....	113
Şekil 13.2: Rulman ve hidrolik disk fren sistemi .....	114
Şekil 13.3: Kanat görünümü .....	114
Şekil 13.4: Kuyruk görünümü .....	114
Şekil 13.5: Plaka destek, mil ve ilk montaj görünümü .....	115
Şekil 13.6: Direk, ayak görünümü ve şarj kontrol cihazı .....	115
Şekil 13.7: Sistemin rüzgâr yönüne göre dönmesine sağlayan parça.....	115
Şekil 13.8: Rüzgâr türbininin tasarım ve montaj ilk görünümü .....	116
Şekil 13.9: Rüzgâr Türbin Son Montajlanmış Görünümü.....	116





## BİLGİSAYAR DESTEKLİ 1 KW' LİK RÜZGÂR TÜRBİNİ TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ

### ÖZET

Dünya hızlı bir şekilde yenilenebilir enerji kaynağı kullanımına geçmektedir. Özellikle son yıllarda bu konuda yatırımlarında artması yenilenebilir enerjinin önemini göstermektedir. Rüzgâr enerjisi de son zamanlarda göstermiş olduğu gelişimlerle çokça bahsedilen yenilenebilir bir enerji çeşididir. Rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbin makineleri vasıtasıyla ilk önce mekanik, daha sonra elektrik enerjisine dönüştürülür. Üretilebilecek enerji miktarını etkileyen en önemli faktörler; rüzgâr türbini bıçak sayısı ve bıçak yapısı, türbin tasarımı, dişli yapısı kısacası sistemin her bir faktörü üretilecek enerji miktarını etkilemektedir. Bu yüzden her yıl rüzgâr türbini ile ilgili yatırım miktarları da artmaktadır. Rüzgâr enerjisinde ilk sermaye yatırımı makine ve destekleyici altyapı için kullanılmaktadır. Türbin tasarımı, tesisin kurulumu ve işletilmesi gibi enerji maliyet fiyatının artmasına sebep olan faktörler rüzgâr gücünü bir alternatif enerji kaynağı yapma anahtarıdır. Bir rüzgâr türbinin matematiksel modellenmesi, işlem alanı üzerinde, rüzgâr türbinin davranışının anlaşılması için gereklidir. Çünkü rüzgâr türbinin optimum değerlerde çalışmasına yardımcı olacak kapsamlı kontrol algoritmaların geliştirilmesine izin verir. Modelleme, rüzgâr türbini performans değerlerinin kontrol edilmesini sağlar. Model sonuçları, türbin tasarımını optimize etmek ve rüzgâr enerjisi fiyatının artmasına yol açacak faktörleri minimize etmek isteyen yeni nesil türbin araştırmacıları ve tasarımcıların yararlanabileceği bir bilgi olacaktır. Bu tezde rüzgâr enerji sistemleri üzerinde çalışılmış ve rüzgâr türbin sisteminin matematiksel modellenmesi yapılmıştır. Çevre şartları ve rüzgâr türbini için belli parametreler dikkate alınarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Uygulamalı görmek için mini rüzgâr türbini imal edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler;** *Rüzgâr hızı, Türbin gücü, Güç katsayısı, Uç hız oranı, Jeneratör, Enerji*



# COMPUTER AIDED 1 KW WIND TURBINE DESIGN AND PROTOTYPE MANUFACTURING

## ABSTRACT

The World is increasingly going renewable energy source. Especially in recent years, increase of the investments in this field shows the importance of renewable energy. Wind energy is the type of renewable energy that has been mentioned a lot in recent times. Wind energy is first converted to mechanical, then electrical energy by means of wind turbines. The most important factors affecting the amount of energy that can be produced are; the number of wind turbine blades and blade structure, turbine design, gear structure in short, each factor of the system affects the amount of energy to be produced. That's why the investment related to the wind turbine increases every year. The first capital investment in wind energy is used for machinery and supporting infrastructure. Factors that increase the energy cost price, such as turbine design, installation and operation of the plant, are the key to making wind power an alternative energy source. Mathematical modeling of a wind turbine is necessary for understanding the behavior of the wind turbine on the process area. Because the wind allows the development of comprehensive control algorithms to help the turbine operate at optimum values. The modeling ensures that wind turbine performance values are controlled. Model results will provide information that can be used by next-generation turbine researchers and designers to optimize turbine design and minimize the factors that lead to increased wind energy costs. In this thesis, wind energy systems have been studied and mathematical modeling of the wind turbine system has been done. Simulations have been carried out by considering certain parameters for environmental conditions and wind turbine. Prototype wind turbine has been manufactured to see it applied.

**Keywords;** *Wind speed, Turbine power, Power factor, Top speed ratio, Generator, Energy.*



## 1. GİRİŞ

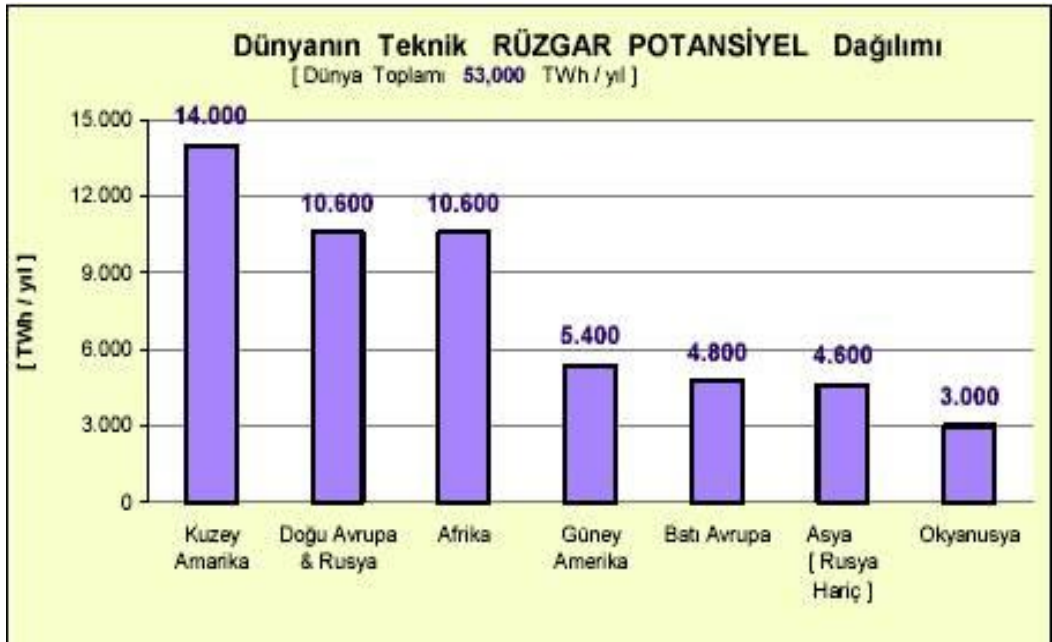
Dünya nüfusunun sürekli artması, insanların sürekli talepleri doğrultusunda, teknolojik gelişmelerin ilerlemesine de paralel olarak, elektronik sistemlerin kullanılmasının artması, sanayileşme ve buralarda kullanılan enerji ihtiyaçlarının artması gibi etkenler, enerji tüketimini ve buna bağlı olarak enerji gereksinimini arttırmaktadır. Enerji gereksiniminin hızla artmasına istinaden, kontrolsüz ve bilinçsiz bir şekilde tüketilen fosil yakıtlarının sebebiyet verdiği küresel ısınma ve doğa felaketleri gibi dünyamızı ve dolayısıyla yaşayan canlıları yaşamsal olarak tehlikeli bir noktaya götürecek faktörler, ancak küresel yenilenebilir enerji çalışmaları, işbirliği ve insanlara bu durumla ilgili ciddiyetle bilgilendirme yapılması ile önüne geçilebilir. Fosil yakıtlarının da kısıtlı olması, zamanı gelince tükenecek olması yenilenebilir enerji kaynaklarına önem vermeyi zorunlu kılmaktadır. Bu vaziyet, dünya genelinde geleceğe dönük önem arz eden çalışmalar yapılma gereksinimi ortaya koymuştur.

Enerji gereksinim ve buna ilaveten isteklerin hızla artması ve fosil yakıtlarında gün geçtikçe azalması durumu, ülkeler arasında işbirliği ve dünya enerji politika haritasının şekillenmesinde ciddi önem taşımaktadır. Ortaya çıkarılan enerji politika haritalarına bağlı olarak, enerjinin daha verimli bir şekilde kullanılması, sera gazına bağlı olarak ortaya çıkan salınımların indirgenmesi, enerji iletim sırasında oluşan hat kayıplarının azaltılması, insanların yenilenebilir enerji kaynakları konusunda bilinçlendirilmesi ve bu konuyla ilgili yatırım yapmaya yönlendirilmesi gibi yakın gelecekteki enerji yapılandırılmasını şekillendirmeye çalışan birçok araştırma ve çalışmalar hızlı bir şekilde sürdürülmektedir. Bu araştırma ve çalışmalar, gün geçtikçe artmakta olan enerji gereksiniminin muhtemel sorunlarını en aza indirmeli ve yeryüzünün daha yaşanabilir bir hal alması için bütün insanları bu konuda etkileyebilecek seviyede olmalıdır. Aksi durumda, enerjiye bağlı birçok sorun oluşacak, ülkeler ciddi anlamda ekonomilerine etki edecek sorunlarla karşı karşıya gelecek ve belki de en kötü senaryo kötüsü olarak tüm canlılar için güvenilir, temiz

bir yaşam ortamı kalmayacaktır. Dünyanın bu kötü gidişatına dur demenin ve yeniden yapılanmanın yollarından birisi de, temiz enerji kaynağı olarak da bilinen alternatif enerji kaynaklarına hak ettiği değeri vermekten geçmektedir. Bu kaynaklara örnek olarak; rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, hidrolik enerji, dalga enerjisi, doğal gaz kaynakları jeotermal enerji gösterilebilir. Bu çalışma boyunca, alternatif enerji kaynaklarından birisi olan ve gelecekte oldukça ümit vaat eden rüzgâr enerjisine sebebiyet veren rüzgârların nasıl meydana geldiği, rüzgârdan sağlanacak teorik güç hesaplamaları, son yıllardaki rüzgâr türbini ile ilgili çalışma ve yatırımlar, gücün oluşumunu etkileyen en önemli unsurlar, rüzgâr enerjisinin bu makineler vasıtasıyla nasıl elektrik enerjisine dönüştürüldüğüne, türbin şekillerinden ve bu türbinlerin modellemelerinin nasıl yapıldığından bahsedilecektir.

## 2. DÜNYANIN RÜZGÂR ENERJİSİ POTANSİYELİ VE TÜRKİYE’NİN DURUMU

Dünya Enerji Konseyi (WEC)’ nin yapmış olduğu araştırma ve çalışmalar göstermektedir ki; 5,1 m/s’ den fazla rüzgâr süratlerine sahip alanların uygulanabilirliği ve toplumsal kısıtlamalar sebebiyle ile %4’ nünden yararlanılabileceği kabul edilerek, dünyanın genel olarak hesaplanan teknik rüzgâr enerjisi potansiyelinin 53.000 TWh/yıl olabileceği öngörülmektedir [1]. Bu potansiyelin dünya üzerindeki dağılımı, aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir. 2020 yılında dünyanın ihtiyaç duyacağı elektrik enerji gereksiniminin 25,579 TWh/yıl civarında olabileceği tahmin edilmektedir. Başka bir deyişle, dünya genelinde ki var olan rüzgâr enerji potansiyelinin tamamından yararlanılabilmesi halinde, dünyanın mevcut elektrik ihtiyacının çok daha fazlasını elde edebilmek kuramsal olarak mümkün olabileceği gözlenmiştir [2].



**Şekil 2.1:** Dünya genelinde teorik rüzgâr enerji potansiyelinin bölge bazında dağılımı

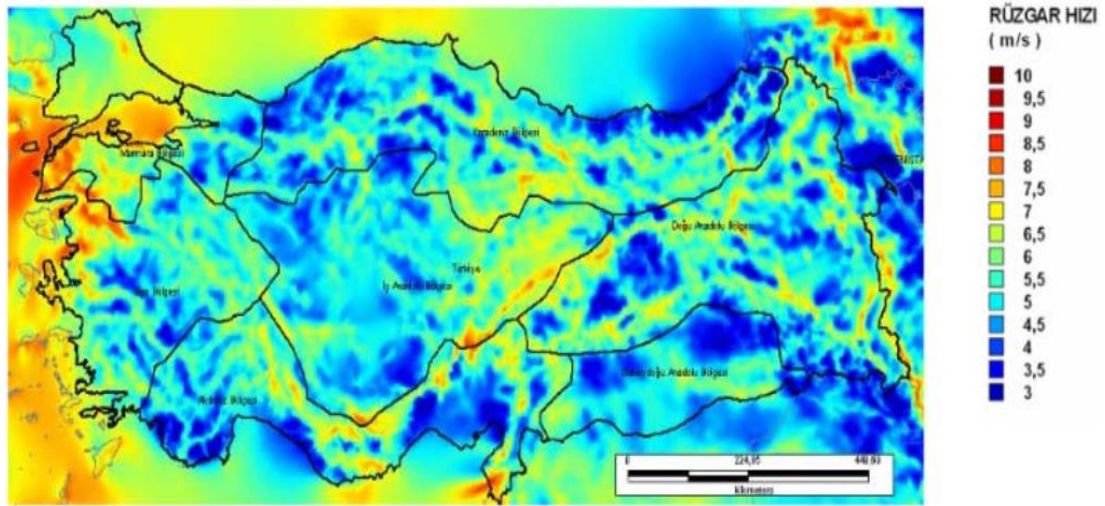


**Şekil 2.2:** Yeryüzü genelinde teorik potansiyelin yüzdesel olarak bölgelere göre dağılımı

Türkiye' nin yer düzeyinden 50 metre civarı yükseklikte ve 7,5 m/s' den fazla rüzgâr süratine sahip bölgelerde kilometrekare başına takriben gücü 5 MW olan rüzgâr santralleri kurulabileceği tahmin edilmektedir. Bu teorik kabullere bağlı olarak, küçük ölçekli(mikro) rüzgâr akış modellemesi ve sayısal hava tahmin modellemesi için orta ölçekli tahmin modeli uygulanarak üretilen rüzgâr kaynağı verilerinin verildiği Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlanmıştır. Türkiye' de mevcut rüzgâr enerjisi potansiyel değerinin 48.000 MW olarak belirlemiştir [3].

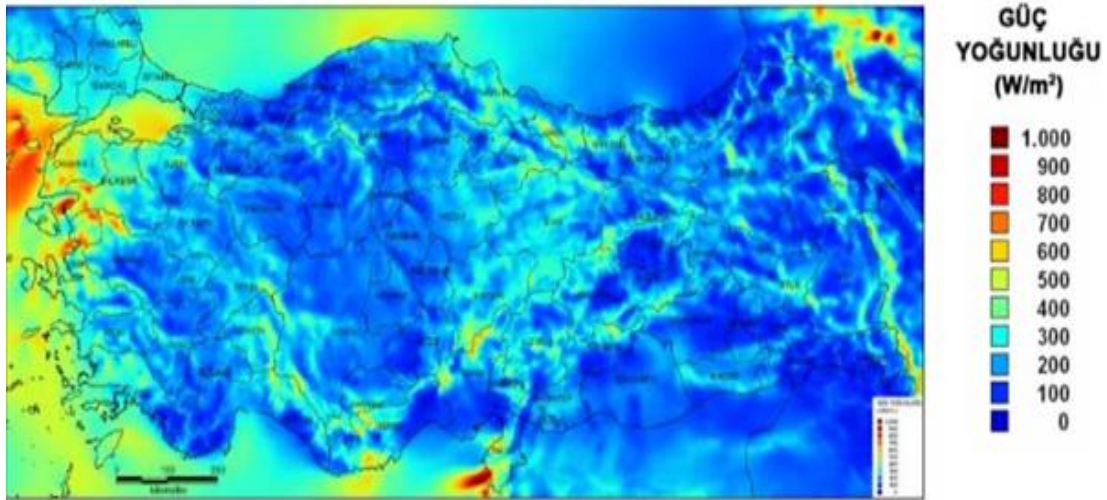
REPA ( Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası) doğrultusunda Türkiye' de 50 m yükseklikteki rüzgâr hız dağılımı verilmektedir. Görüldüğü gibi Marmara ve Ege bölgeleri 7 m/s ve üzeri rüzgâr hızıyla ciddi rüzgâr potansiyeline sahip bölgelerimizdir. Bu yüzden bu bölgelerde, rüzgâr enerji santral kurulumları ağırlık kazanmıştır [4].





**Şekil 2.3:** Türkiye’ de 50 m yükseklikteki rüzgâr hızı değerleri (REPA)

Rüzgâr enerjisi santralleri için yapılan fizibilite çalışmalarında, rüzgâr hızının belirlenen limit değerlerinde olması yeterli gelmemektedir. Rüzgâr hızıyla birlikte bölgedeki rüzgâr yoğunluğu ve kapasite faktörlerinin de bilinmesi gereklidir. Rüzgâr güç yoğunluğu dağılımı şekilde verilmektedir.

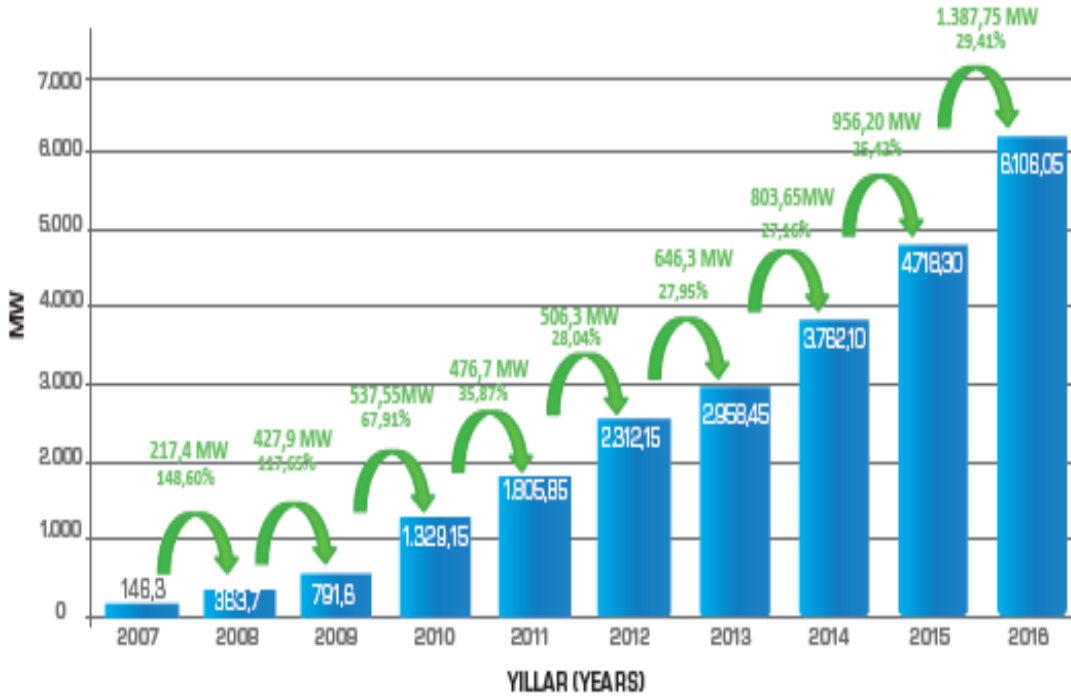


**Şekil 2.4:** Türkiye’ de 50 metre yükseklikteki rüzgar güç yoğunluğu değerleri(REPA)

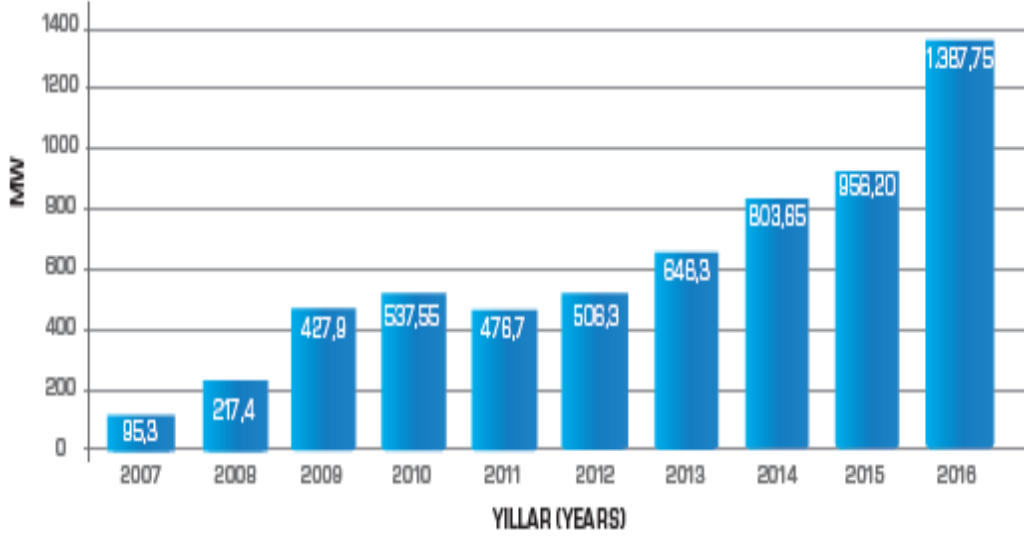
Türkiye rüzgar güç yoğunluğu haritasında görüldüğü gibi, Ege ve Marmara bölgelerinde rüzgar güç yoğunluğunun fazlalığı dikkat çekmektedir. Bu sayede, herhangi bölgede rüzgar hızı aynı olsa bile rüzgar santrallerinden elde edilebilecek gücü rüzgar yoğunluğu belirleyecektir. Yoğunluğun fazla olduğu bölgede türbin kanatları daha fazla itme gücüyle dönmüş olacaktır. Bu da türbin kanatlarının dönüş tur sayısını etkileyecektir [4].



Şekil 2.5: Türkiye rüzgâr enerji santralleri atlası (TÜREB)



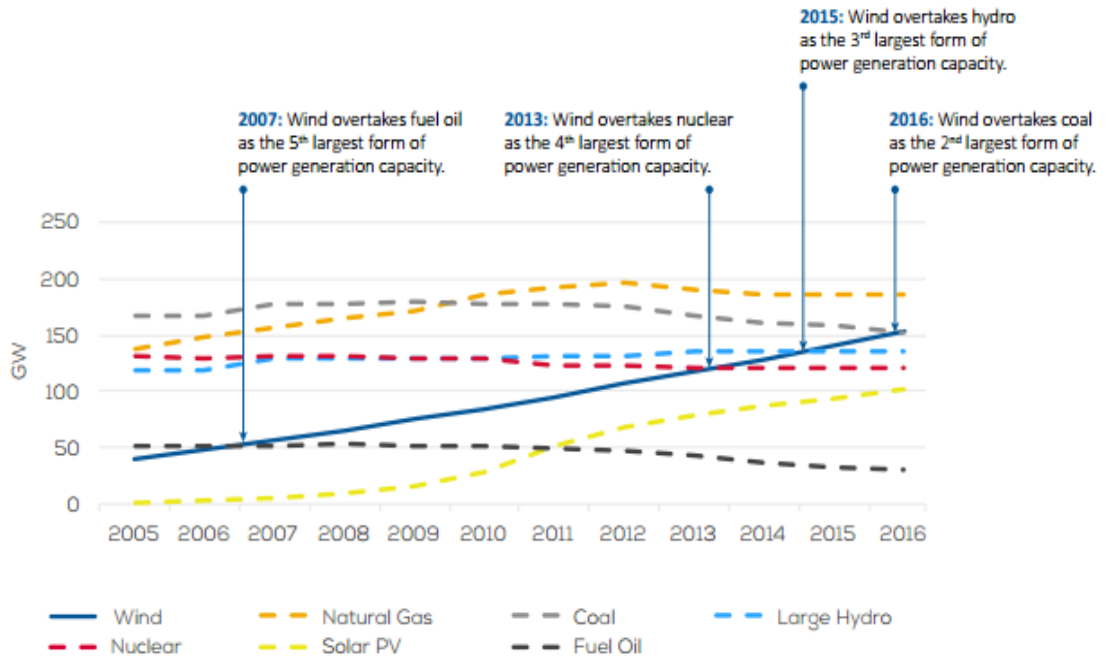
Şekil 2.6: Türkiye Rüzar enerji santralleri yıllara göre kümülatif kurulumu



**Şekil 2.7:** Türkiye’ deki rüzgar enerji santralleri için yıllık kurulum

TÜREB’ in istatistiğine göre, Türkiye’ de son yıllardaki rüzgar enerjisi gelişimini göstermektedir. Özellikle 2013 yılından itibaren rüzgar enerji santral kurulumunun dikkate değer bir şekilde arttığı gözlenmektedir. Bu değer 2016 yılında yaklaşık 1.4 GWh değerine ulaşmış ve Türkiye bu şekilde yıllık kurulmuş rüzgâr enerjisi rekorunu kırmıştır [5].

## 2.1 Avrupa 2016 Rüzgar Enerji İstatistiği

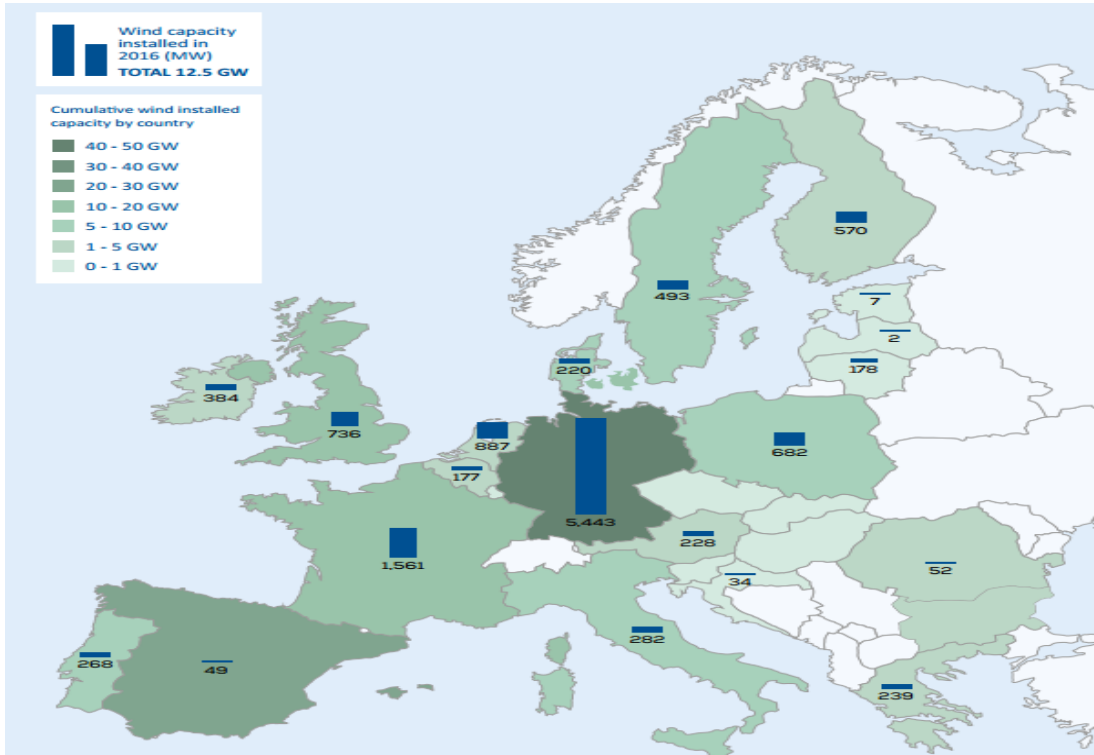


**Şekil 2.8:** Avrupa Birliğinde 2005- 2016 yılları arasındaki kümülatif güç kapasitesi

2017 Şubat ayında yayınlanan Avrupa 2016 rüzgâr enerjisi istatistikleri sonucuna göre, 2016 yılında Avrupa ‘da 12,5 GW ek rüzgâr enerjisi kapasitesi kurularak 153,7 GW total kapasiteye ulaştı. Bu değer ile rüzgâr enerjisi şimdi kömürü de geçerek Avrupa ‘ da elektrik üretim kapasitesinin 2. en büyük formu oldu

2016 yılındaki kurulum kapasitesi 2015 yılındaki kurulum kapasitesiyle karşılaştırıldığında, 2016 yılında rüzgâr enerjisinin %3 daha az kurulduğu belirlenmiştir. Kurulan bu tesislerin 10,923 GW’ ı onshore, 1,567 GW’ ı offshore olarak tercih edilmiştir. Rüzgâr enerji tesisleri 2016 yılında Avrupa’ da güç üretim formlarına göre, diğerler enerji üretim şekillerinden daha çok kurulmuştur. Rüzgâr enerjisi, total güç kapasitesi kurulumunun % 51’ i olarak hesap edilmiştir. 2016 yılında rüzgâr enerjisinin geliştirilmesi için 27 milyar Euro yatırım yapılmış ve bu yatırım değeri 2015 yılına göre %5 daha fazladır.

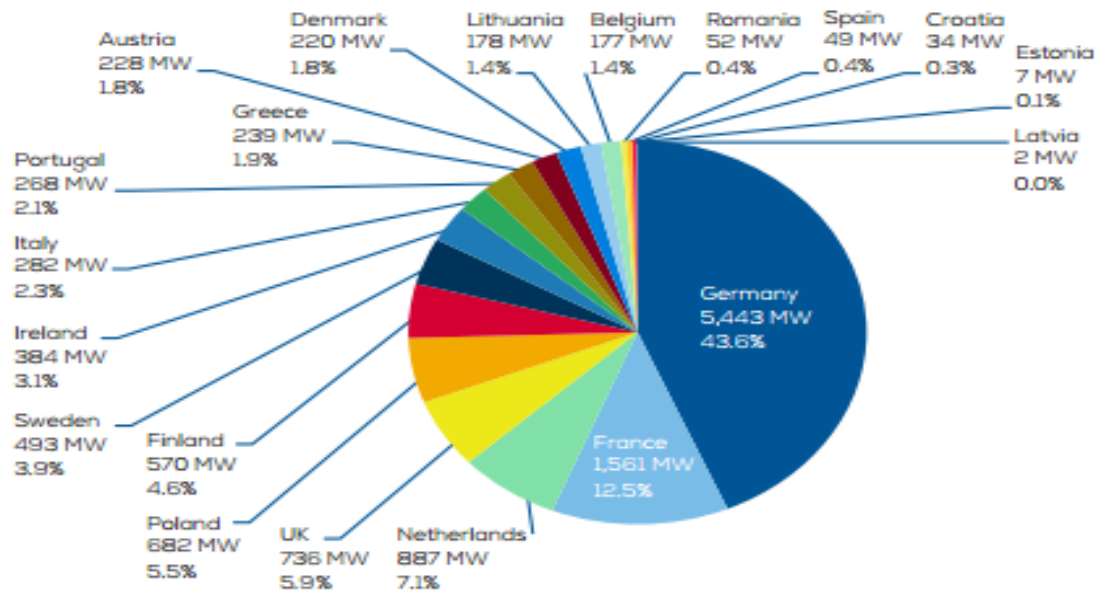
2007 yılında rüzgâr enerjisi, sıvı yakıt ile enerji üretimini geçerek güç üretim kapasitesinin 5. en büyük formu olmuştur. 2013 yılında nükleer enerji üretimini geçerek güç üretim kapasitesinin 4. en büyük formu olmuştur. 2015 yılında hidro enerji üretim kapasitesini geçerek dünyanın en büyük 3. formu olmuştur. 2016 yılında kömür enerji üretim kapasitesini geçerek dünyanın en büyük 2. formu olmuştur.



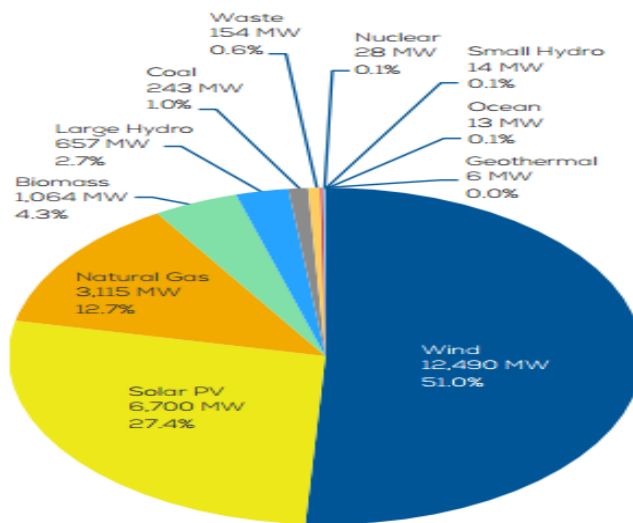
Şekil 2.9: 2016 yılındaki rüzgâr enerjisi kapasitesi

Almanya, Avrupa’ da kurulan rüzgâr enerji kapasitesinin %44’ ünü oluşturarak bu alanda en büyük paya sahip olmuştur. Bunu İspanya, İngiltere ve Fransa takip etmiştir. 5 Avrupa birliği üyesi 2016 yılında, yeni rüzgâr enerji kurulumlarıyla rekor kırmıştır. Bunlar Fransa 1.6 GW, Hollanda 887 MW, Finlandiya 570 MW, İrlanda 384 MW ve Litvanya 178 MW ’dır [6].

Rüzgâr enerji Avrupa’ nın total kurulu güç kapasitesinin %17 sini oluşturmaktadır. Avrupa’ da net total güç üretim kapasitesi 12,5 GW artarak 918,8 GW ‘ a ulaşmıştır.



Şekil 2.10: Avrupa’ da 2016 yılında kurulmuş yeni rüzgâr enerjisi kapasitesi dağılımı



Şekil 2.11: 2016 yılında yeni kurulmuş enerji güç kapasitesi dağılımı

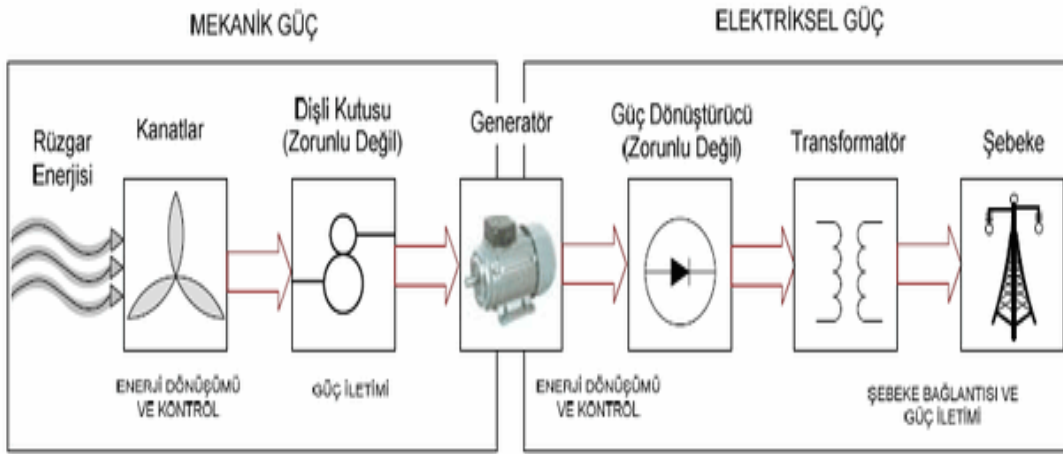
2016 yılında, Avrupa' da 24,5 GW enerji güç kapasitesi kurulmuştur. Kurulan bu güç kapasitesinin % 86' sı yenilenebilir enerji kaynağı olduğu hesaplanmıştır. Bu da 21,1 GW enerji kurulum kapasitesine karşılık gelmektedir. Total net enerji kurulum kapasitesinde, 12,5 GW ile rüzgâr enerjisi ilk sırada yer almaktadır(%51). 6,7 GW ile solar pv enerji ikinci sırada(%27), 3,1 GW ile doğal gaz üçüncü sırada(%13) yer almaktadır. Ayrıca 2016 yılında yaklaşık 300 TWh güç üretilmiş ve rüzgâr enerjisi, Avrupa Birliğinin elektrik talebinin % 10,4' ünü karşılamaktadır [6].

### 3. RÜZGÂR TÜRBİNİNİN MODELLENMESİ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Günümüzde tek bir rüzgâr türbininin gücü megawattlarla ifade edilecek kadar artmış ve yapılan fizibilite, model geliştirme, yapısında ve mekanik iyileştirmeler ile de bu değerlerin daha da artması kaçınılmazdır [7]. Rüzgâr türbinlerinin çalışma prensibini anlamak için de iki önemli aerodinamik kuvvetin iyi bilinmesi gereklidir. Bu kuvvetler kaldırma ve sürüklenme kuvvetleridir. Sürüklenme kuvveti, cismin üstünde akış yönüne doğru ortaya çıkan bir kuvvettir. Örneğin düz bir plakanın üst kısmında oluşabilecek en büyük sürüklenme kuvveti, hava akış yönünün plaka üzerine  $90^0$  dik açıyla geldiği durumda oluşurken, sürüklenme kuvvetinin en az olabilmesi için hava akışının cismin yüzey bölgesinden paralel doğrultuda olması gerekir. Kaldırma kuvveti ifadesi ise, akış doğrultusuna dik bir şekilde ortaya çıkan bir kuvvettir. Uçaklar bu kuvvet vasıtasıyla havalandıkları için bu kuvvet kaldırma kuvveti olarak tanımlanmıştır. Sürüklenme kuvveti için en iyi örnek paraşüt örneği olur. Bu kuvvet vasıtasıyla paraşütün hız değeri azalmaktadır. Sürüklenme kuvvetinin sebep olduğu etkileri minimize edebilmek için akış çizgili (streamlined) cisimler adı verilen özel cisimler yapılmıştır. Bu cisimler için örnek gösterilecek olunursa zeplin ve balıklar gösterilebilir. Düz bir plakanın üzerine etkiyen kaldırma (lift) kuvveti, hava akışının  $0^0$  açı ile plaka yüzeyi doğrultusunda geldiği anda görülür. Havanın akış doğrultusuna göre meydana gelen ufak açılar, akış şiddetinin artması sebebiyle düşük basınçlı bölgeler oluşur. Bu bölgeleri akış altı olarak da tanımlayabiliriz. Bu sebepten, hava akış süratıyla basınç arasında bir ilişki meydana gelir. Yani hava akış hızının artmasıyla basınç düşecek, hava sürati yavaşladıkça basınç artacaktır. Bu durum Bernoulli etkisi olarak tanımlanır. Kaldırma(lift) kuvveti de cismin üzerinde çekme(emme) oluşturur [8].

Rüzgâr türbinlerinde sınıflandırma dönme eksenlerine göre yapılmaktadır. Rüzgâr türbinleri yatay eksenli ve düşey eksenli olmak üzere iki sınıfta incelenir. Rüzgâr türbinleri sabit veya değişken hızlı olmak üzere iki modda çalışır. Bir sabit hız türbin için, rüzgâr hızının değişimlerinden bağımsız olarak sabit açısal hızda döner. Sabit

hız türbinlerinin en önemli avantajı inventer ve dönüştürücüler gibi pahalı elektronik parçalara ihtiyaç duyulmamasıdır. Bununla birlikte dezavantajları da vardır. Bunlar rotor hızındaki kısıtlamalardan dolayı türbinin tüm rüzgâr hızlarında en yüksek verimlilikle çalışmasını engellemektedir. Bu nedenle değişken hız rüzgâr türbinleri sabit hız rüzgâr türbinlerine göre daha düşük rüzgâr hızlarında daha fazla enerji üretir. Bir rüzgâr türbinin çıkış gücü veya torku çeşitli faktörler tarafından belirlenir. Bunlar arasında türbin hızı, rotor kanat eğimi, rotor kanadının eğim açısı, türbinin boyutu ve şekli, türbin alanı, rotor geometrisi, eğik eksenli veya düşey eksenli olması ve rüzgâr hızıdır. Çıkış gücü ve çeşitli değişkenler arasındaki ilişki rüzgâr türbinin matematiksel modelini teşkil etmektedir. Bir rüzgâr türbinin matematiksel modeli rüzgâr türbinin işleyiş bölgesi üzerindeki davranışının anlaşılması için gereklidir ve modelleme rüzgâr türbini performansının kontrolünü sağlar [9].

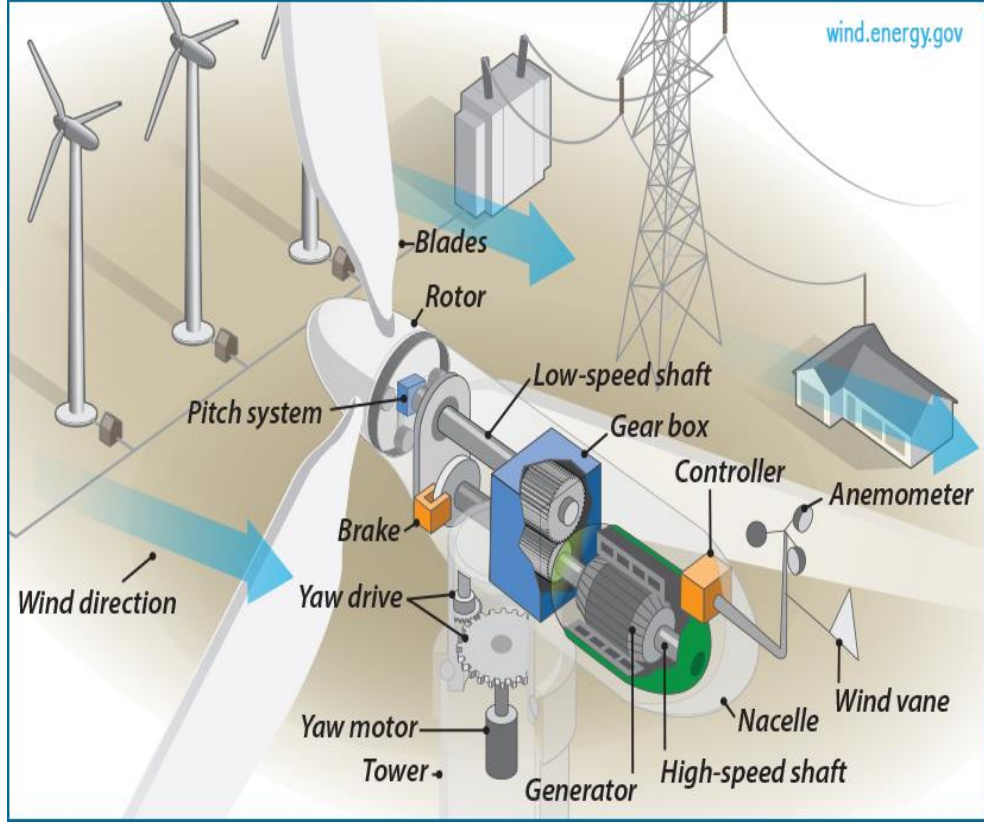


Şekil 3.1: Rüzgâr Türbinin Çalışma Prensibi [10]

### 3.1 Rüzgâr Türbininin Bileşenleri Ve Görevleri

Bir rüzgâr türbini rotora monte edilmiş motor yeri ve bir kule ile birkaç kanadın mekanik olarak jeneratöre bağlanmasıyla oluşmuştur. Rüzgâr gücünün kinetik enerjisi rotor vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüştürülür. Mekanik montajdaki dişli kutusu, rüzgâr türbininin dönme hızlarını üreteçte daha yüksek devir sayılarına çevirir. Üreteçte vasıtasıyla sağlanan elektrik enerjisi akülerde depolanır veya direkt olarak alıcılara iletilir. Jeneratör milinin dönüşüyle üretilen güç çıkışı bir kontrol sistemi tarafından sağlanır [9].





Şekil 3.2: Rüzgâr türbini temel bileşenleri

- Makine Bölümü (Nacelle)
- Türbin Kanatları
- Flanş
- Düşük Hız Mili
- Mekanik Veya Hidrolik Frenli Yüksek Hız Mili
- Dişli Kutusu
- Jeneratör ( Elektrik Üreteci)
- Yön Bulma Mekanizması ( Yaw)
- Hidrolik Sistem
- Kule
- Anemometre (Rüzgâr Ölçer)
- Kontrol Ünitesi

### **3.1.1 Makine Bölümü (Nacelle)**

Bu kısımda, rüzgâr türbininin dişli kutusu, üreteç, fren sistemi, miller dâhil kilit parçalarını içerdiği ve dış etkenlere karşı koruduğu bölümdür. Servis personeli, bu yere türbin kulesinden girebilir. Makina bölümünün ön kısmında, rüzgâr türbininin pervane kanatları, flanş ve burun kısmı bulunur.

### **3.1.2 Türbin Kanatları**

Türbin kanatları, rüzgârı yakalar ve dönme hareketiyle yaptığı mekanik işi miller vasıtasıyla jeneratöre aktarır. Modern 600 kW'lık bir rüzgâr türbininde kanadın boyutu 20 - 25 metre civarındadır ve gerekli hesaplamalar ve çalışmalar sonucu tasarlama aşamasına geçilir. Türbin kanatları; genel olarak kompozit malzemelerden imal edilmektedir. Ayrıca kanatlar rüzgârdan elde ettikleri verim arttırmak için kendi eksenini çevresinde 90° hareket edebilecek şekilde tasarlanmıştır.

### **3.1.3 Flanş (Hub)**

Flanş kanatların monte edildiği ve kanatların dönme hareketini, mil ve dişliler vasıtasıyla jeneratöre aktaran bileşendir.

### **3.1.4 Düşük Hız Mili**

Rüzgâr türbinlerindeki düşük hız milleri, flanşın dişli kutusuyla bağlantısını sağlar. Aerodinamik fren sisteminin çalışmasını sağlayacak hidrolik sistemleri borulara bağlar.

### **3.1.5 Dişli Kutusu**

Flanşa bağlı mildeki dönme hareketi dişli kutusuna aktarılır. Dişli kutusu, milden elde edilen devir sayısını arttırarak jeneratörün daha fazla enerji üretmesini sağlar. Düşük hızlı milin yaklaşık olarak 50 kat daha hızlı dönmesini sağlayarak arttırılan devir hareketini yüksek hızlı mile aktarır. Elektrik üretmek için ihtiyaç duyduğu dönüş hızını arttırarak dakikada 30-60 (rpm) olan dönüş hızlarını, dakikada 1000-2000 (rpm) devirlere kadar çıkarır [11].

### **3.1.6 Yüksek Hız Mili**

Yüksek hız mili, dakikada ortalama 1400 - 1600 devir hızlarında döner ve jeneratörü çalıştırır. Herhangi bir ehemmiyeti yüksek durumlar için mekanik fren sistemi mevcuttur. Mekanik fren ikincil bir fren sistemi olarak, aerodinamik fren sisteminin herhangi bir sebepten dolayı işlevini kaybetmesi veya türbinin genel bakım işlemleri yapıldığında devreye kullanılır.

### **3.1.7 Elektrik Üretici (Jeneratör)**

Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren cihazdır. Elektrik motoruna benzer bir sisteme sahiptir ve iç kısmında mıknatıslar bulunur. Bu mıknatısın orta kısmında ince tellerle sarılmış bir bölüm vardır. Kanatların dönüşüyle mekanik iş burada elektrik enerjisine dönüşür. Jeneratörler çalışma şekline göre genelde senkron veya asenkron motorlar olmak üzere iki gruptan oluşur. Son zamanlarda ki gelişmelerle birlikte bir rüzgâr türbininden elde edilebilecek ortalama elektrik güç miktarı 1000 - 10000 kW arasında değişmektedir.

### **3.1.8 Bilgisayar Kontrol Ünitesi Görevi**

Elektronik kontrol ünitesi, rüzgâr türbininin çalışmasını sürekli takip eden ve pitch açısı(eğim mekanizması) kontrolünü yapan bir bilgisayar sistemi barındırır. Herhangi bir arızalanma durumunda (örneğin; jeneratörün veya dişli sisteminin aşırı ısınması) türbin sistemini otomatik bir şekilde durmasını sağlar ve türbin operatörüne gönderdiği sinyaller ile de olay hakkında bilgi gönderir. Türbinin devreye girmesini devreden çıkmasını da bu sistem sağlar.

### **3.1.9 Türbin Hidrolik Sistemi Görevi**

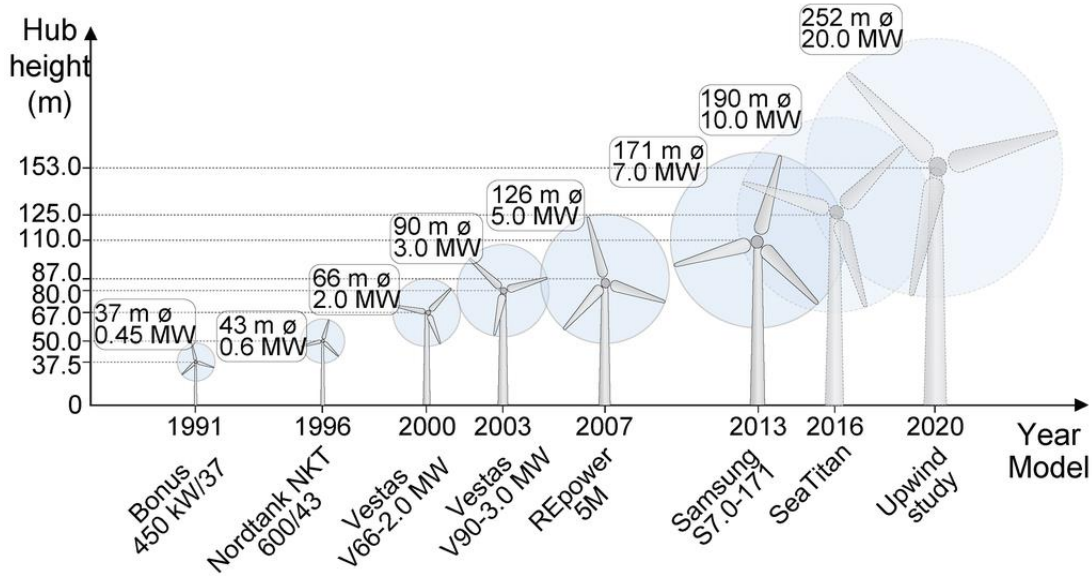
Bu sistem, türbin sisteminin yavaşlamasını veya durmasını sağlayacak aerodinamik fren sistemini içeren kısımdır.

### 3.1.10 Türbin Soğutma Ünitesi Görevi

Bu ünite, jeneratörün aşırı ısınma durumlarında soğumasını sağlamak amacıyla bir soğutma ünitesi barındırır. Buna ilaveten dişli kutusunda bulunan yağın soğutulmasını sağlayan ayrı bir soğutma bölümünü de içinde barındırır.

### 3.1.11 Türbin Kulesi

Nacelle dediğimiz makine bölümünü ve rotor kısmını yer seviyesinden belli bir yükseklikte taşıyan yapılardır. Genel olarak bu yapıların uzun olması bir avantaj sağlamaktadır, çünkü yer seviyesinden yukarı doğru çıktıkça rüzgâr hızlarında artmalar olur. Ortalama 600 – 700 kW gücüne sahip türbinler yerden yaklaşık 50- 60 metre uzunluğundaki kuleler ile taşınır. Kuleler tasarımlarına göre daire şeklinde veya kare biçiminde olabilir. Kare biçimindeki kulelerin en önemli artışı ise maliyet bakımından daha düşük bütçeli olmasıdır. Daire biçimindeki kuleler, yerden türbin nacelle kısmına ulaşılması için merdiven bulunur. Kulenin yapısı ise genelde beton ve çelikten oluşmaktadır. Kule yapımını etkileyen en önemli parametrelerden biri eğilme frekansıdır bu sebepten kulenin sağlamlığı oldukça önemlidir. Hatta rüzgâr türbininin % 20' lere kadar maliyetini kule yapımı oluşturmaktadır.



Şekil 3.3: Rüzgâr türbininin yıllara göre kule uzunluk değişimi [12]

### **3.1.12 Anemometre( Rüzgâr Ölçer)**

Rüzgârın hava hızını ve esme yönünü ölçmek için kullanılır. Rüzgâr hızı belli seviyeye geldiğinde kanatların hareketini sağlamak için türbin bilgisayar kontrol bölümü tarafından anemometre vasıtasıyla iletilen sinyal verileri kullanılır. Rüzgâr hızı genelde 25 m/s' ye hızını aştığında kontrol ünitesi tarafından türbinin zarar görmemesi amacıyla otomatik bir şekilde türbinin çalışması durdurulur. Türbinin çalışma hız aralığını belirleyen kısım hız kontrolörüdür. Rüzgâr türbininin harekete geçeceği rüzgâr hız değeri (cut-in speed) ile türbinin çalışmasını durduracağı rüzgâr hız değerini (cut-out speed) hız kontrolörü belirler.

### **3.1.13 Yön Bulma Mekanizması ( Yaw)**

Rüzgârın yönünü belirleyen elektronik bir kontrolör tarafından çalışır. Rüzgâra doğru rotoru döndürmek için elektrik motorlarını kullanır [11].

## **3.2 Rüzgâr Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları**

### **3.2.1 Rüzgâr Enerjisinin Sağladığı Avantajlar**

- Rüzgâr santralleri, havanın kirlenmesini sağlayacak zehirli duman salınımları yapmazlar.
- Rüzgâr türbin makineleri, asit yağmurları gibi doğal afetlere neden olabilecek emisyonlar oluşturmazlar.
- Rüzgâr türbinlerinden enerji elde edilmesi için herhangi bir hammaddeye gereksinim duyulmamaktadır.
- Rüzgâr kuvvetinin hiç bitmeyecek olması sebebiyle, rüzgâr enerjisi yenilenebilir bir kaynak sınıfındadır.
- Rüzgârdan elde edilen enerji, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde maliyet bakımından en ucuz olanlarından biridir.
- Rüzgâr türbin sistemleri kırsal bölgelerde, çiftliklerde kurulabilir, bu sayede rüzgârın fazla olduğu kırsal bölgelerde ekonomiye katkı sağlanabilir.
- Gerekli olan tek ihtiyaç rüzgâr olduğundan dolayı atmosfere zehirli gaz salınımı olmaz.

### 3.2.2 Rüzgâr Enerjisinin Dezavantajları

- Rüzgâr türbinlerinin en önemli dezavantajı ilk kurulum maliyetlerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.
- Rüzgâr hızının değişken olmasından dolayı üretilen enerji de değişkenlik göstermektedir. Bu sebepten dolayı, enerjinin depolanması zorunlu hale gelmiştir.
- Genelde verimi yüksek olan rüzgâr santralleri, enerji ihtiyacının yüksek olduğu şehir merkezlerinden uzak yerlerde kurulmaktadır. Bunun en büyük sebebi gürültülü olması, radyo ve TV alıcılarında parazite sebep olmasıdır. Ayrıca kuş ölümlerine de sebep olduğu için birçok Avrupa ülkesinde kurulan rüzgâr türbinleri milli park alanlarına yakın yerlerde kurulması yasaklanmıştır.

Enerji Üretim Sistemleri	Enerji İklim Değişikliği	Asit Yağmuru	Su Kirliliği	Toprak Kirliliği	Gürültü	Radyasyon
Petrol	X	X	X	X	X	-
Kömür	X	X	X	X	X	X
Doğal Gaz	X	X	X	-	X	-
Nükleer	-	-	X	X	-	X
Hidrolik	X	-	-	-	-	-
Rüzgar	-	-	-	-	X	-
Güneş	-	-	-	-	-	-

Şekil 3.4: Enerji üretim sistemlerinin çevresel etkilerinin karşılaştırılması [13]

#### 4. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Rüzgâr türbinleri, kanatları vasıtasıyla rüzgârın kinetik enerjisini dönme hareketiyle mekanik işe daha sonra da bu hareketi mil ve dişliler vasıtasıyla jeneratöre iletir burada elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Elde edilen enerji ya depolanır ya da direkt olarak alıcılara ulaştırılabilir. Rüzgâr türbinleri yapısı itibariyle genel olarak jeneratör, elektrik ve elektroniksel aksamlar, mil çevrimini arttıran dişli kutusu, kule ve kanatlardan meydana gelmektedir.

Bu çalışma prensibi göze alınıp rüzgâr türbinleri sınıflandırılacak olunursa, dönme eksenlerine, güçlerine, devirlerine, dişli özelliklerine, rüzgâr hız ve yoğunluğuna, kanat sayılarına ve kurulum konumlarına göre sınıflandırılırlar.



Şekil 4.1: Çalışma prensiplerine göre rüzgâr türbin sınıflandırması

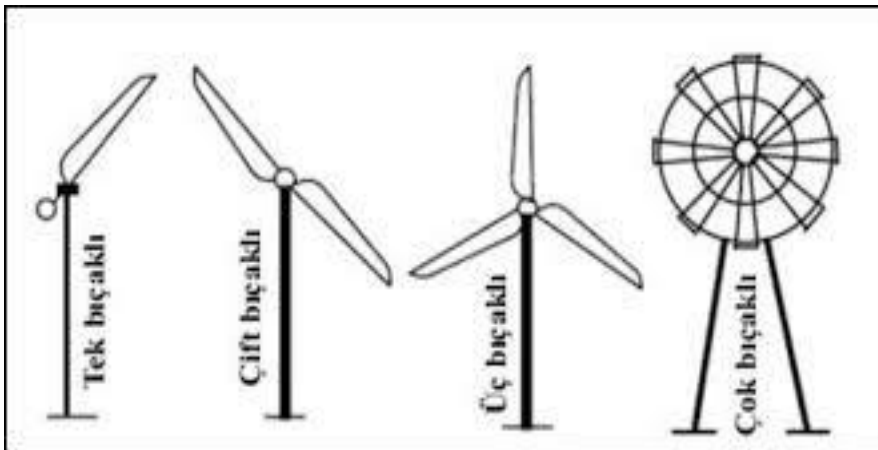
## 4.1 Dönme Eksen Yönüne Göre Rüzgâr Türbin Sistemleri

Rüzgâr türbinleri dönme eksen yönüne göre iki grupta incelenir. Bunlar; yatay eksenli olan rüzgâr türbin sistemleri ve dikey eksenli olan rüzgâr türbin sistemleridir.

### 4.1.1 Ekseni Yatay Olan Rüzgâr Türbin Sistemleri

Bir rüzgâr türbini düşündüğümüzde, çoğumuzun düşündüğü ortak stildir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, yel değirmenine benzer bir dizayna sahiptir. Yatay eksenli dönen pervaneye benzeyen bıçaklara sahiptir. Bu türbinlerde; rotorun dönüş eksen yönü, rüzgâr geliş doğrultusuna paralel olacaktır. Kanatları da rüzgâr geliş doğrultusuna göre diktir. Türbin kulesinin tepesinde, rotor ana mil ve jeneratör mevcuttur. Küçük rüzgâr türbinleri, türbinin arkasına yerleştirilmiş basit bir yönlendirme vasıtasıyla rüzgârı yakalarken, büyük rüzgâr türbinleri türbini rüzgâra çevirmek için dönmesini sağlayacak bir servo motoru ve sensörleri kullanır. Bu türbinlerin rotorunda bulunan kanat miktarı azaldıkça rotor sürati artmaktadır. Rüzgâr süratinin, rotor kanadının uç süratine bölünmesi sonucu ortaya çıkan değere kanat uç hız oranı denir ve  $\lambda$  ile gösterilir. Eğer;

- $\lambda$  değeri 1 ile 5 arasındaysa kanat sayısı çok olan rotoru ifade etmektedir.
- $\lambda$  değeri 6 ile 8 arasındaysa kanat sayısı 3 olan rotoru ifade etmektedir.
- $\lambda$  değeri 9 ile 15 arasındaysa kanat sayısı 2 olan rotoru ifade etmektedir.
- $\lambda$  değeri 15' den büyük ise kanat sayısı 1 olan rotoru ifade etmektedir. [14]



Şekil 4.2: Kanat sayısına göre türbin modelleri

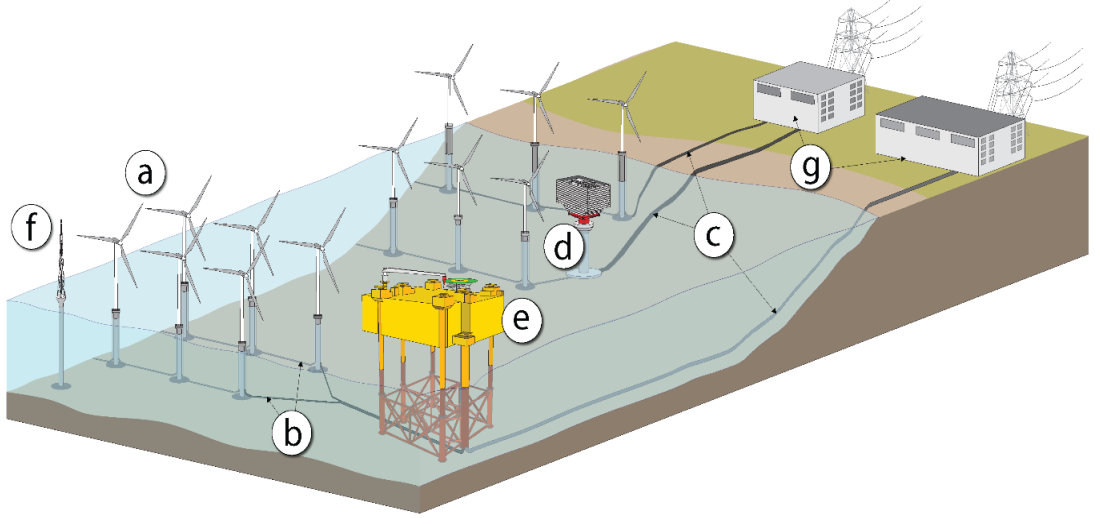


### Dönme eksenli yatay olan rüzgâr türbinlerinin avantajları;

- Uzun kuleleri sayesinde daha güçlü rüzgârlara erişebiliyor. Bazı rüzgâr değişimi bölgelerinde, her on metre yukarıdaki rüzgâr hızı % 20 ve güç çıkışı % 34 oranında artabilir.
- Yüksek verimliliğe sahiptir çünkü kanatlar her zaman rüzgâr yönüne dik olarak hareket eder ve tüm dönüş boyunca güç alır.

### Yatay eksenli rüzgâr türbininin dezavantajları;

- Dişli kutusunu, jeneratörü, kanatları taşımak için devasa kule yapımı gereklidir ve yüksekliklerinin fazla olması nedeniyle görünür alanda rahatsız edici görüntü vermesi ve manzaranın bozulmasına sebep olmaktadır.
- Rüzgâra karşı kanatları döndürmek için ek olarak yaw kontrol mekanizmasına gerek duymaktadır.
- Yüksek rüzgâr hızlarında türbinin zarar görmemesi için frenleme sistemi gerektirir [15].



Şekil 4.3: Yatay eksenli rüzgâr türbin santrali bileşenleri

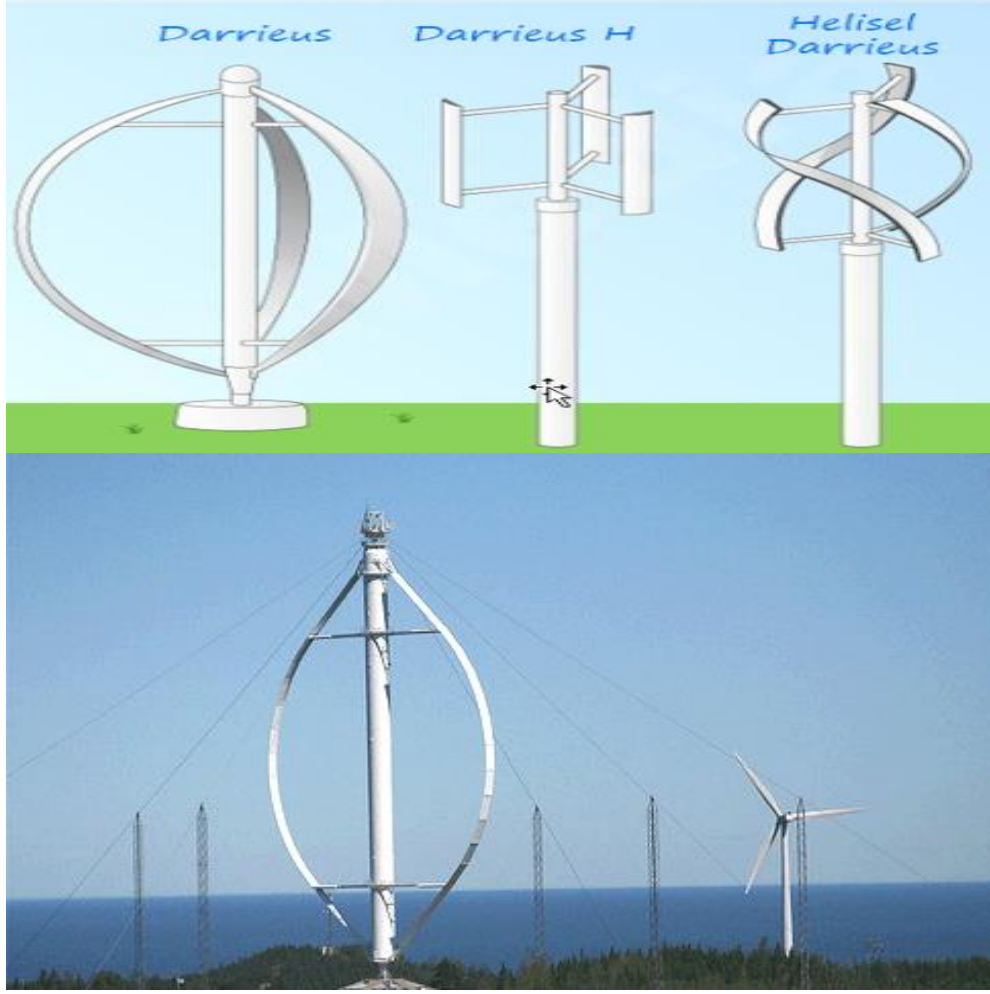
- a) Rüzgâr türbinleri
- b) Toplama kabloları
- c) İhracat kabloları
- d) Transformatör istasyonu
- e) Dönüştürücü istasyonu
- f) Meteoroloji direği

g) Kara istasyonu [12]

#### 4.1.2 Ekseni Düşey Olan Rüzgâr Türbin Sistemleri

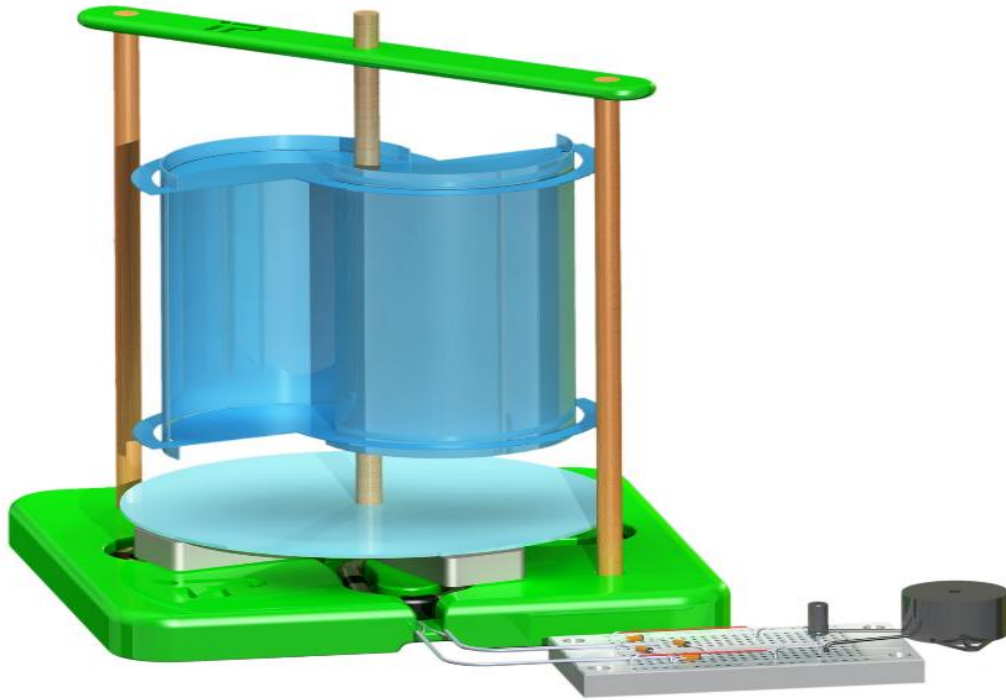
Eksen yönü yatay olan türbinler gibi bir kanatlı rotor sistemine sahip değildir. Ana rotor şaftı dikey olarak düzenlenmiştir. Bu düzenlemenin temel amacı, türbinin rüzgâra karşı doğrultulmasına gerek yoktur. Bu rüzgâr yönünün oldukça değişken olduğu ve türbülansın olduğu bölgeler için bir avantajdır. Dikey eksen ile jeneratör ve diğer bileşenler yere yakın bir şekilde konumlandırılabilir ve bu şekilde kulenin taşınmasına gerek duyulmaz ve maliyeti azaltmaktadır. Ayrıca bakımı da kolaylaştırır. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin temel dezavantajı, rüzgârda dönerken genellikle sürüklenme oluşturmasıdır. Ticari olarak tercih edilmemektedir ve genelde deneyler için üretilmektedir. Kendi içlerinde çeşitleri vardır;

**Darrieus modeli:** Darrieus modeli rüzgâr türbinleri, eksen yönü düşey olan iki adet kanat içerir. Kanatların dışbükey ve içbükey yüzeylere sahip olması sebebiyle çekme kuvveti meydana gelir ve bu kuvvette dönme hareketi oluşturur. Yapısı itibariyle bu model rüzgâr türbinlerinde, kanatların bir devrinde iki defa en fazla tork sağlanır. İyi verimliliği vardır, ancak kule üzerinde büyük tork dalgalanması ve çevrimsel gerilmeler ürettiği için düşük güvenilirliğe sahiptir. Başlangıç torku çok düşük olduğundan, dönmeye başlaması için genellikle harici bir güç kaynağı veya ek olarak bir Savonius rotor gereklidir. Tork dalgalanması, rotor için daha fazla sağlamlık ve dayanıklılık sağlayacak üç veya daha fazla sayıda bıçak kullanılarak indirgenebilir.



**Şekil 4.4:** Darrieus Tipi Rüzgâr Türbinleri

**Savonius tipi:** Savonius bir sürüklenme tipi türbindir, anemometreler ve havalandırma gibi yüksek güvenilirlik durumlarında yaygın kullanıma sahiptir. Bu türbin modeli, iki ya da üç adet ortadan ikiye ayrılmış yarım silindir görünümüne benzer şekildedir ve bunların birleşimi gibidir. Silindirik kanat yapısı itibariyle hava akışı dönel bir hal alarak hava burgacı(türbülans) oluşturur. Hava akışının bu şekilde olması türbin verimini azaltır ve bu sebepten dolayı da çok tercih edilen bir model değildir. Savonius, türbülanslı rüzgârlarda ve kendi kendine harekete geçme konusunda mükemmeldir.



**Şekil 4.5:** Savonius Tipi Rüzgâr Türbinleri

**Eksen yönü düşey olan rüzgâr türbinlerinin avantajları;**

- Yaw ( yön bulma) mekanizmasına ihtiyaç yoktur.
- Yere yakın yerlerde konumlandırılabilir, bu da hareketli parçaların korunmasını kolaylaştırır.
- Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin aksine daha düşük rüzgâr hızlarında harekete geçer.

**Dezavantajları;**

- Eksen yönü yatay olan türbinlere göre verimliliği daha azdır, bunun başlıca sebebi rüzgâr içinde dönen kanatların ek olarak sürüklenmesidir.

- Rüzgâr hızlarının düşük ve yukarı bölgelerdeki daha fazla rüzgâr hızlarından faydalanamayan yere yakın konumlanmış rotora sahiptir [15].

### **4.1.3 Kanatlardaki Güç Kontrol Sistemleri**

#### **4.1.3.1 Eğim(Pitch) Kontrollü Rüzgâr Türbinleri**

Pitch kontrol adı verilen kanat açısı kontrol yönteminde rotor kanat açıları, kontrol sistemi tarafından ayarlanmaktadır ve elektronik güç denetleyicisi güç çıkışlarını saniyede birkaç kez kontrol etmektedir. Güç çıkışı çok yüksek değerlere ulaştığı zaman, güç denetleyicisi pitch mekanizmasına uyarı gönderir ve rotor kanatları kendi eksenini etrafında dönerek, gelen rüzgâr yönüne göre kanadın hücum açısını değiştirir. Böylece frenleme veya durdurma gerçekleştirilir ve türbinin güç çıkışı azaltılmış olur. Rüzgâr hızı ne zaman azalırsa kanatlar tekrar tersine geri döner. Pitch kontrollü rüzgâr türbinlerindeki avantaj, gücün rüzgâr hızındaki değişimlere göre kontrol edilebiliyor olmasıdır. Dezavantajı olarak da türbin çıkış güç değerlerinde büyük değişimlere sebep olmasıdır [16]

#### **4.1.3.2 Durma( Stall) Kontrollü Rüzgâr Türbinleri**

Pasif stall kontrollü rüzgâr türbinlerinde, rotor bıçakları sabit bir açıyla göbeğe vidalanmıştır. Rotor kanat profillerinin geometrisi, rüzgâr hızının çok yüksek olduğu anı sağlamak üzere aerodinamik olarak dizayn edilmiştir. Bu durum, rotor üzerinde hareket eden rotor kanatlarında kaldırma kuvvetini önler. Stall kontrollü rüzgâr türbini kanatlarına yakından bakılacak olursa, kanatların uzunlamasına doğru eksenini etrafında hafifçe döndüğü anlaşılmaktadır. Bu rüzgâr hızının kritik değerlere ulaştığında rotor kanatlarının birden değil de yavaş yavaş durması için yapılmaktadır. Yani rotor kanadını doğal aerodinamik özelliği ile durmasını sağlamaktadır. Tercih edilme sebepleri, fiyatlarının uygun olması, bakım gereksinimlerinin az olması, basit olması, dayanıklılığının fazla olması ve karmaşık sistemlere gereksinim duyulmamasıdır. Diğer yandan stall kontrol, durmaya bağlı titreşimlerden kaçınmak için bütün rüzgar türbinlerinin yapısal dinamiklerindeki dizayn değişiklikleri gibi çok karmaşık aerodinamik dizayn problemleri göstermektedir.

#### **4.1.3.3 Aktif Stall Kontrollü Rüzgâr Türbinleri**

1 MW ve üstü rüzgâr türbin modellerinde genellikle aktif stall kontrol mekanizması kullanılmaktadır. Eğilebilir kanatlara sahip olduklarından teknik olarak aktif stall

kontrol sistemi pitch kontrollü türbinlere benzemektedir. Rüzgâr hızının düşük seviyede olduğu durumlarda makul derecede büyük tork(dönme gücü) sağlamak amacıyla, türbinler genellikle, düşük rüzgâr hızlarında pitch kontrollü türbin sistemleri gibi kanatları eğimli olacak şekilde programlanmıştır. Genellikle rüzgâr hızlarına göre sabit birkaç adım kullanırlar. Rüzgar nominal güce ulaştığında, pitch kontrollü makinelerden bir fark oluşacaktır. Eğer jeneratörde aşırı yüklenme olmak üzereyse, makine kanatlarını pitch kontrollü makinelerin yaptığı gibi karşı yönde eğecektir. Diğer bir deyişle, kanatları daha fazla stall konuma getirmek amacıyla rotor kanatlarının hücum açısını arttıracak, böylece rüzgârın aşırı enerjisini boşa harcayacaktır. Aktif stall' ın avantajlarından biri, pasif stall' e göre çıkış gücünün daha doğru kontrol edilebilmesidir. Diğer bir avantaj ise makinenin bütün yüksek rüzgâr hızlarında neredeyse tam olarak çalıştırılabilmesidir. Normal pasif stall kontrollü rüzgâr türbinleri genellikle yüksek rüzgâr hızlarında elektrik güç çıkışında bir düşüşe sahip olacaktır [16].

#### **4.1.4 Diğer Güç Kontrol Yöntemleri**

Bazı daha eski rüzgâr türbinleri, uçakların kalkışta fazladan havalandırma sağlamak için kullandığı kanat geometrisini değiştirme metodu gibi benzer şekilde rotor gücünü kontrol etmek için kanatçıklar kullanır. Diğer teorik olasılık, gücü azaltmak için rotoru kısmen rüzgârın dışına çıkarmaktır. Bu yaw kontrol tekniği, yalnızca küçük rüzgâr türbinleri(1 KW veya daha az) için kullanılmaktadır. Çünkü rotorda çevrimsel olarak değişen gerilmelere neden olmakta ve bu da zamanla türbine zarar vermektedir [16].

#### **4.1.5 Rüzgâr Türbinlerinin Karşılaştırılması**

Rüzgâr santralleri kurulumunda; rüzgâr hız değerleri ve sürekliliği, kurulacak bölge ve ciddi kayıplardan kaçınmak için rüzgâr türbin özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Rüzgâr türbinleri incelemelerine dayanarak rüzgârı alma şekli, kanat profilleri ve kullanılacak yerler doğrultusunda birkaç çeşitte üretilmektedir.

**Çizelge 4.1:** Büyük ve küçük yapılı türbinlerin karşılaştırılması

	Kullanım Alanı	Bir Tek Türbin Gücü	Üretilen Enerjinin Verildiği Yer	Akü İhtiyacı	Bakım Masrafları	Kurulum Masrafı
Büyük Rüzgar Türbinleri	Endüstriyel	1 MW – 10 MW	Şebeke	Yok	Var	Yüksek
Küçük Rüzgar Türbinleri	Kişisel	1 KW – 50 KW	Seralar, çiftlik evleri, radyo kulesi vb.	Var	Yok	Düşük

Büyük boyutlu rüzgâr türbin santrallerini merkezi doğrudan şebekeye bağlıdır. Kurulum sürecindeki yatırım değerleri fazladır ve içerdiği parçaların kullanımı ve aşınmasına bağlı bakım gereksinimi vardır. Küçük boyutlu türbinler ise şahsi olarak üretilen ve evlerde, çiftliklerde, serada ısıtma yapma amacıyla kullanılabilen türbinlerdir. Bu türbinler vasıtasıyla elde edilen elektrik enerjisi akülerde depolanmaktadır.

**Çizelge 4.2:** Rüzgâr Alış Yönüne Göre Türbinlerin Karşılaştırılması

	Yaw Mekanizma İhtiyacı	Kanat Malzeme Yapısı	Kuleye Binen Yük	Rüzgârın Türbine Verdiği Zarar
Rüzgârı Önden Alan Rüzgâr Türbinleri	Var	Sert	Ağır	Az
Rüzgârı Arkadan Alan Rüzgâr Türbinleri	Yok	Esnek	Hafif	Çok

Rüzgârın geliş yönü türbinin ön tarafından kanatlara direkt olarak gelen modellerde, enerji üretimi daha çoktur. Bu sebepten ötürü, bu model türbinler rüzgârı arkasından olarak çalışan türbin modellerine göre daha çok tercih edilmektedir. Rüzgârı arkadan olarak çalışan türbin modellerinde yaw mekanizmasına sahip değildir ve taşıma kulesine daha az yük biner.

**Çizelge 4.3:** Yatay ve dikey eksenli rüzgâr türbinlerin karşılaştırma

	YERT				DERT	
	Tek Kanatlı	Çift Kanatlı	Üç Kanatlı	Çok Kanatlı	Savonius	Darrierus
Maliyet	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Estetik Görünüm	Kötü	Kötü	İyi	İyi	İyi	İyi
Gürültü	Yüksek	Yüksek	Düşük	Az	Az	Az
Çalışma Hızı	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Kule İhtiyacı	Var	Var	Var	Var	Yok	Yok
Kullanım Amacı	Elektrik	Elektrik	Elektrik	Az elektrik ve su pompalaması	Az elektrik ve su pompalaması	Az elektrik ve su pompalaması
Günümüzde Kullanımı	Yok	Yok	Var	Var	Az	Az
Rotorun Dönmesi İçin Rüzgârı	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır ve sürükler	Kaldırır ve sürükler	Kaldırır ve sürükler

Kanat sayısı bir veya iki olan rüzgâr türbin modelleri görünüş olarak güzel durmaması, gürültü seviyesinin yüksek olması ve maliyetli olmasından kaynaklı tercih edilmemektedir. Kanat sayısı üç olan türbin modellerinin maliyetlerinin daha az olması, görünümünün iyi olması, gürültü düzeyinin az olması ve çalışma hızlarının yüksek olmasından kaynaklı en çok kullanılan türbinlerdir. Savonius ve Darrierus gibi türbin modelleri ise düşük verimlilikleri sebebiyle çok fazla tercih edilmemektedir[17].

**Çizelge 4.4:** Onshore(karaüstü) ve Offshore(denizüstü) Rüzgâr Santrallerinin Karşılaştırılması

	Kurulum Maliyeti	Çalışma Hızı	Enerji Üretimi	İşletme Maliyeti	Yaygın Kullanımı
Onshore (Kara üstü)	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek
Offshore (Deniz üstü)	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük

Kara üzerinde bulunan rüzgâr türbin santralleri, deniz üzerinde bulunan rüzgâr türbin santrallerine göre kurulumunun ve işletilebilirliğinin daha kolay olması, maliyet olarak daha uygun olması, bakımlarının daha rahat ve kolay olması sebebiyle kullanım yaygınlığı daha fazladır. Fakat deniz üstü rüzgâr santrallerinin kurulumu da teknolojik ilerlemelere bağlı olarak gün geçtikçe artmaktadır. Bunun en önemli



nedeni, kara üstü rüzgâr santralleri için kurulum yapılacak yerlerin azalması ve rüzgâr şiddetine bağlı olarak verimliliklerinin düşük olmasıdır. Bu da denizüstü türbin santral kurulumunu hızlandırmıştır [18].



**Şekil 4.6:** Deniz üstü ve kara üstü rüzgâr santralleri

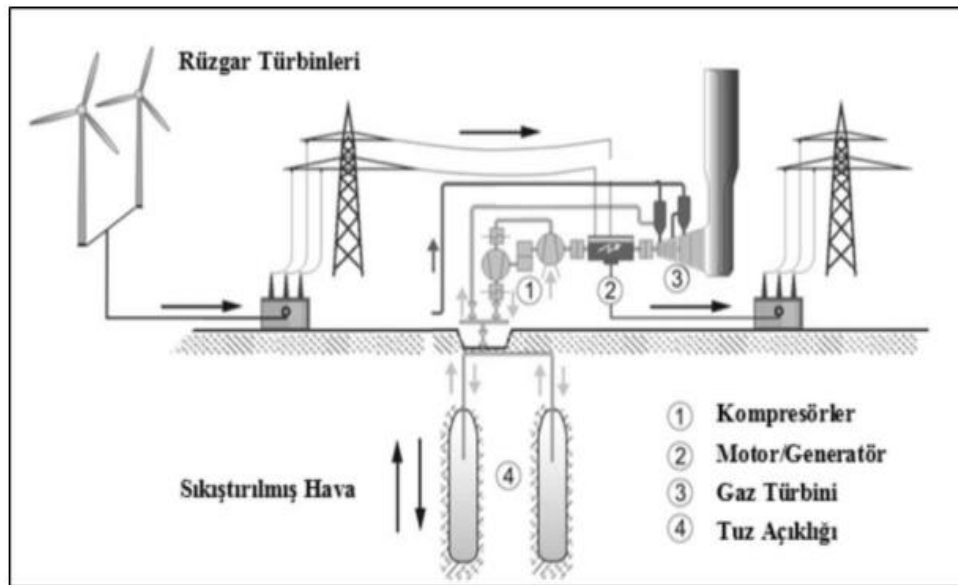


## 5. RÜZGÂR ENERJİSİ İÇİN GELİŞTİRİLEN DEPO ETME YÖNTEMLERİ

Rüzgâr gücünün düzensiz olmasından kaynaklı bu enerjiyi iyi kullanabilmek için depo etmek gereklidir. Bu enerjiyi depolamak için pek çok yöntem mevcuttur.

### 5.1 Sıkıştırılmış Hava Depo Etme

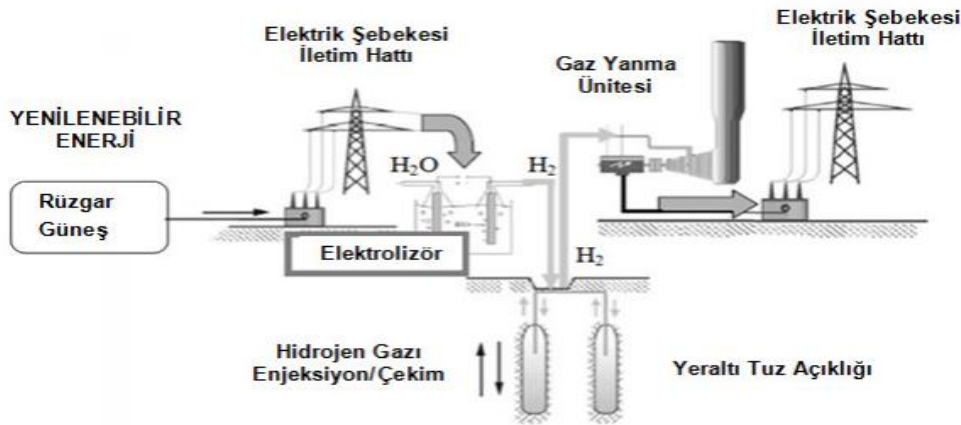
Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama metodu, rüzgâr enerjisi gibi süreksiz ve dalgalanmalar olduğu yenilenebilir enerji çeşitlerinin, enerji üretiminde daha verimli değerlendirilmesine katkıda bulunabilen bir sistemdir. Aslında bu sistem mevcut olan gaz türbini teknolojisinin geliştirilmiş bir halidir. Bu depolama metodu özellikle ihtiyaç fazlası rüzgâr enerjisinden elde edilen elektrik enerjisini, havanın kompresörler yardımıyla sıkıştırılarak yeraltında (madenler, doğal boşluklar vb.) depolanması için kullanılabilir. Elektrik üretiminin fazla olduğu saatlerde, kompresör vasıtasıyla ortamdaki havanın bir yerde depolanması ve depolanan bu basınçlı hava, ihtiyaç duyulması halinde türbinleri çalıştırarak elektrik üretmesidir. Aşağıdaki şekilde sıkıştırılmış hava depolama tesis görünümünü şematik olarak verilmiştir [19].



Şekil 5.1: Rüzgâr enerjisini, sıkıştırılmış hava ile depo etmenin görünümü

## 5.2 Hidrojen Gazı Depo Etme

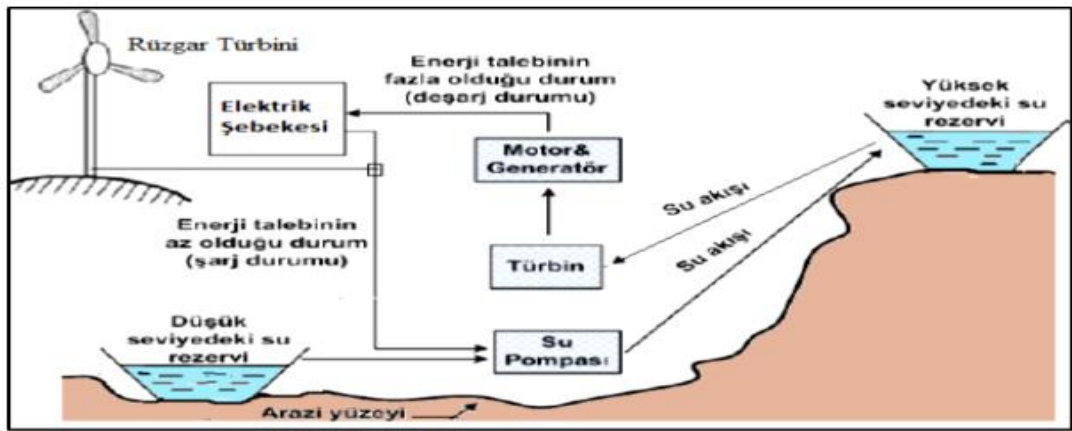
Hidrojen sıcaklık seviyesi düşük sıkıştırılmış gaz veya sıvı halde depo edilebilmektedir. Yeraltının uygun jeolojik oluşumlarında büyük boyutlu sıkıştırılmış hidrojen gazı depolama uygulamalarından hidrojen, ihtiyaç doğrultusunda güneş, rüzgâr gibi süresiz olan yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin depo edilmesi ve hidrojenden yeniden elektrik enerjisi üretmek için kullanılabilir. Verimli bir hidrojen gazı depolama uygulaması için, 1000 m' den daha derinlerdeki yeraltı tuz açıklıklarında, hidrojen gazı 20 MPa ve bu değerden daha fazla değerlerdeki basınçlarda sıkıştırılmaktadır. Güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir enerji ve sudan, elektrolizör vasıtasıyla hidrojen üretimi ve yeraltı tuz açıklıklarında depo etme şeklinin şematik olarak görünümü aşağıdaki şekilde verilmiştir. Sistemin temel bileşenleri, enerji üretimi yapabilmek için fotovoltaik modüller veya rüzgar türbini, sudan hidrojen ve oksijen ayrımının yapılabilmesi için elektrolizör, hidrojen gazı enjeksiyon ve çekimini yapabilmek için kompresör üniteleri, elektrik enerjisi üretebilmek için hidrojen gaz yakma bölümünden meydana gelmektedir. Hidrojen, elektrolizör vasıtasıyla sudan yüksek basınç ve elektrik gerilimi etkisiyle üretilmekte daha sonra depolanmakta ve gaz türbininde elektrik dönüşüm işlemleri gibi aşamalarla sistem çalışmaktadır. Elektrik ihtiyacı güneş veya rüzgâr enerjilerinden karşılanması halinde temiz bir hidrojen üretimi gerçekleştirilmiş olur. Bu yöntemin en büyük eksisi elektrikten elektriğe dönüşüm veriminin %40 seviyelerinde olmasıdır. Yeraltında hidrojen depolama yöntemi düşük verimli olmasına rağmen günümüzde büyük boyutlu ve uzun süre enerji depolama yöntemi için en avantajlı uygulamalardan biridir [19].



Şekil 5.2: Sıkıştırılmış hidrojen gazı depolamanın şematik görünümü

### 5.3 Pompalı Hidroelektrik Depolama

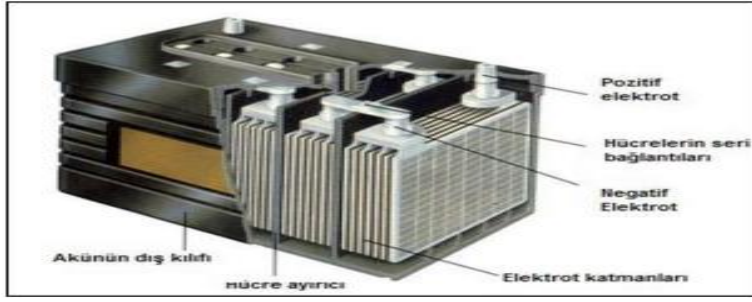
Pompalı hidroelektrik depolama şeklinde; enerji üretiminin çok olduğu zamanlarda rüzgâr türbininin üretmiş olduğu veya şebekeden tedarik edilen elektrik enerjisi vasıtasıyla su pompası çalıştırılarak, suyun düşük seviyeden yüksek seviyedeki bir bölümde depolanmasıdır. Bu şekilde potansiyel enerji depolanması yapılmış olur ve elektrik enerji üretiminin düşük olduğu anlarda yüksek seviyede depolanan su türbine akıtılarak türbinin çalışması sağlanır. Jeneratörün dönmesiyle elde edilmiş olan mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmüş olur. Aşağıdaki şekilde pompalı hidroelektrik enerji depolama sistemi gösterilmiştir [19].



Şekil 5.3: Pompalı hidroelektrik enerji depo etme sisteminin şematik görünümü

### 5.4 Doldurulabilen Bataryalar (Akümülatörler)

Enerji depolamak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Piller, elektrik enerjisini elektrokimyasal enerjiye çevirerek depo eden ve ihtiyaç olduğu zamanda depo edilen enerjiyi elektrik enerjisi şeklinde geri aktarabilen diğer bir enerji depo etme sistemidir. Bu sistemlerin dezavantajı zamanla etkinliklerini yitirmesidir. Piller, en az bir ve daha fazla elektrokimyasal hücre, akış hücreleri veya yakıt hücreleri gibi, elektrokimyasal bileşenlerden oluşur [20].



Şekil 5.4: Kurşun Asit Akümülatör

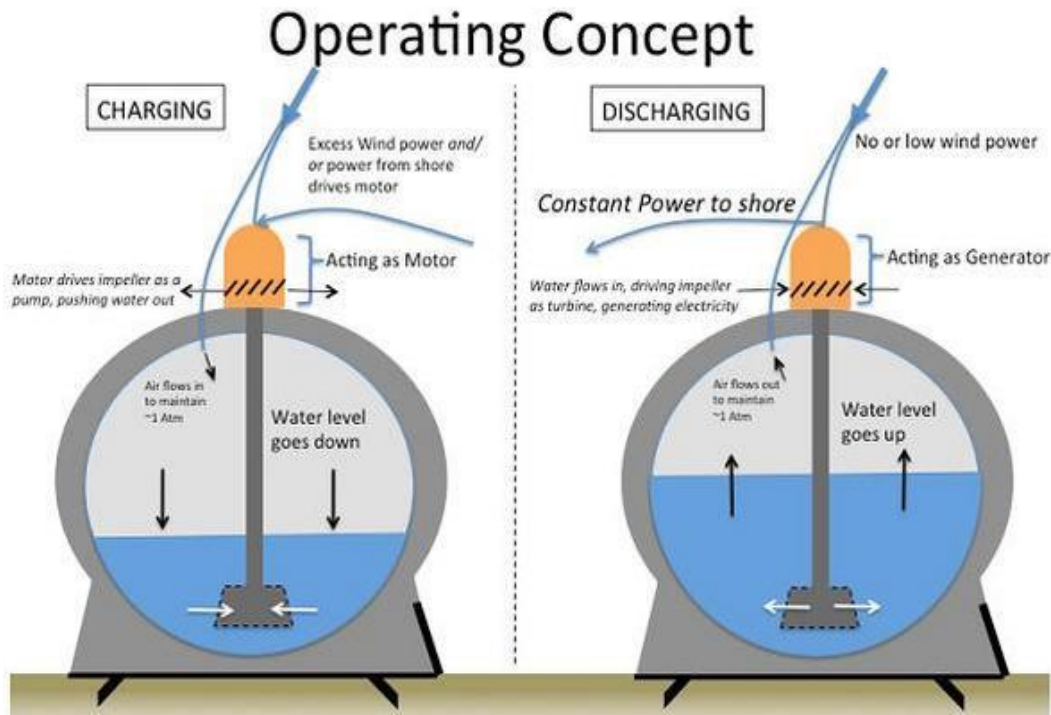
### 5.5 Rüzgâr Enerjisi Depolamak İçin Yeni Geliştirilen Yöntemler

Nottingham Üniversitesinin rüzgâr enerjisini depo etmek için yaptığı çalışmalar doğrultusunda, sualtında devasa şişme saklama torbaları hiç şüphe yok ki bu konuda en dikkat çekici fikirlere bir tanesidir. Sistem çalışması toplanan fazla enerjinin hava torbalarında depolanması şeklindedir. Gün boyunca depo edilen enerji, türbinlere doğru aktarılarak enerji elde edilmesi prensibine dayanır. Yapılan test çalışmalarına göre 600 m civarı derinliklerde, 20 m çap ölçüsüne sahip torba, 700MWh'a kadar enerji depolayabilme kapasitesine sahiptir.



Şekil 5.5: Rüzgâr enerjisinin depo edilmesini sağlayan denizaltı hava topu

Massachusetts Teknoloji Enstitüsü(MIT)'nde yapılan çalışmaya göre deniz üstü rüzgâr türbinlerinden sağlanan enerjiyi depo etmek için geliştirmiş olduğu okyanus yenilenebilir enerji sistemi olarak isimlendirilen bu sistemin çalışma şekli, sualtı pompası hidrolik teknolojisine benzemektedir. Özel imal edilmiş içleri boş beton küreler okyanus zeminine koyulmakta ve rüzgârın yoğun olduğu zaman aralığında, üretilmiş olan fazla enerjiyi, beton küresinin içinde bulunan suyun boşaltımını yapmak için kullanılmaktadır. Rüzgâr yoğunluğunun yeterli olmadığı durumlarda, enerji üretimi yapacak türbinleri çalıştırabilmek için küreler su ile doldurulmaktadır[21].



**Şekil 5.6:** Dalgaların Altına Rüzgâr Enerjisi Saklama Sistemi





## 6. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN JENERATÖR SİSTEMLERİ

Rüzgâr türbinleri iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan biri türbin kanat dizaynı diğeri de jeneratörlerdir. Jeneratörler rüzgâr türbininin rotor hareketiyle elde edilen mekanik enerjiyi minimum kayıpla elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Rüzgâr enerjisi üreten sistemlerde yaygın olarak kullanılan döner elektrikli makinelerin 3 tipi vardır. Bunlar;

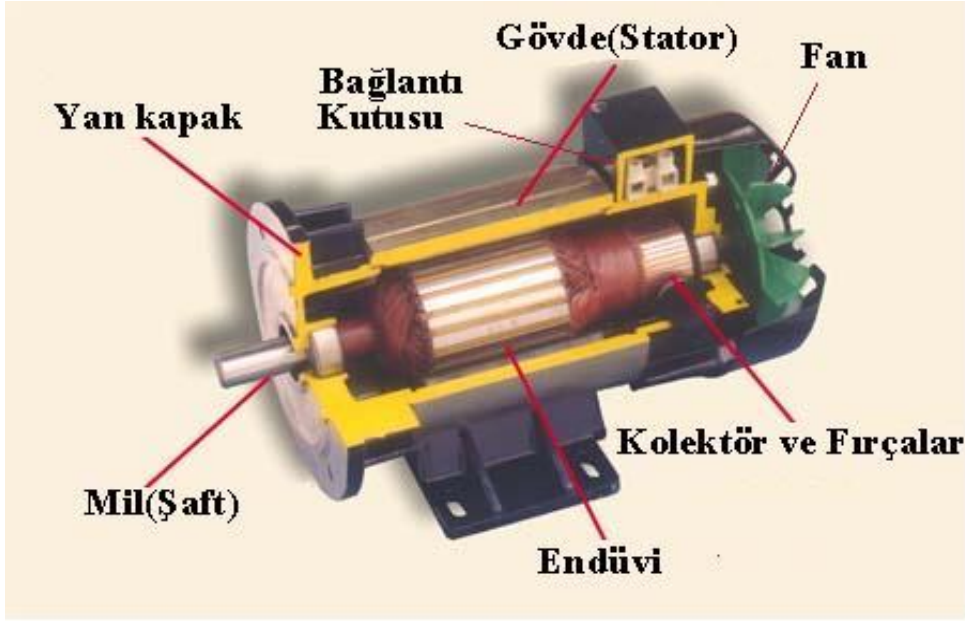
- Doğru akım makineleri (ayrıca dinamo olarak da bilinir)
- Alternatif akım senkron makineler ( AC Jeneratör olarak da bilinir)
- Alternatif akım indüksiyon makineler veya asenkron makineler (Alternatör olarak da bilinir)

Bütün bu elektrik makineleri, Faraday' ın elektromanyetik indüksiyon kanunuyla çalışan elektromekanik cihazlardır. Bu cihazlar, bir elektrik akımı veya şarj akışı ve bir manyetik akının etkileşimi yoluyla çalışırlar. Bu işlem tersinir olduğu için, aynı makine elektrik enerjisini mekanik enerjisine veya mekanik enerjisini elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan bir jeneratör olarak kullanılabilir. Büyük rüzgar türbini uygulamaları için kullanılan en yaygın elektrik makineleri, senkron jeneratörler ve asenkron jeneratörlerdir. Daha küçük ve ev yapımı rüzgâr türbinleri, düşük hız DC jeneratör kullanmaya eğilimlidir. Bir jeneratörden düşük voltaj DC çıkışıyla bataryalar şarj edilebilirken, bir alternatörden gelen daha yüksek sinüzoidal çıkış, direkt olarak yerel şebekeye bağlanabilir [22].

### 6.1 DC Makine

Elektrik makinelerinin tamamı içyapıları bakımından alternatif makinesi gibidir. Bunun sebebi iletkenler NS kutupları arasındaki kısımda, manyetik bölge içinde alternatif şekle dönüşmektedir. DC olarak çalışan makineler AC' den DC' ye çevrimini mekanik anahtarlama vasıtasıyla gerçekleştirir. Doğru akım jeneratörleri, güvenilirliklerinin az olması ve bakım gereksinimleri gibi dezavantajlara sahip

olmasına karşın, sürat kontrolünün basit olması sebebiyle türbin sistemlerinde kullanılmaktaydı. Doğru akım jeneratörlerinden elde edilen enerjiyi, enerji üretim kapasitesi düşük olan ve de elektriğin şebekeye bağımlı olarak kullanılmadığı yerlerde, akülere enerji depo etmek en uygun yoldur. Son yıllardaki teknolojik gelişmelerle birlikte doğru akım makineleri sürekli mıknatıslı ve fırçasız olarak tasarlanıp üretilmeye başlanmıştır. Bu makinelerde manyetik alan sabit mıknatıs kutupları aracılığıyla elde edilmektedir [23].

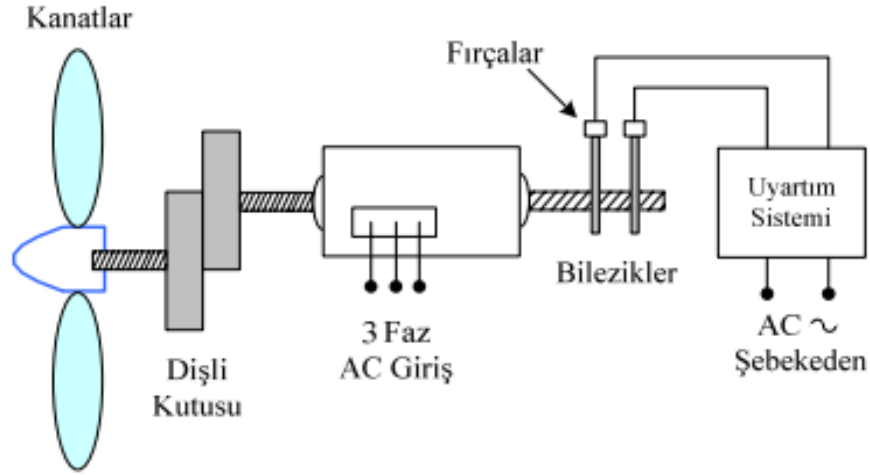


Şekil 6.1: DC Makine

## 6.2 Senkron Makineler

Stator kutupları üç fazlı besleme ile beslendiğinden de senkron hızda dönerler. Rotor bir DC beslemesi vasıtasıyla beslenir ve bu DC gerilim şebeke vasıtasıyla karşılanır. Şebekeden çekilen AC akım DC akıma dönüştürülür. Daha sonra da fırçalar vasıtasıyla rotor salgılarına iletir. Rotor, çalıştırma sırasında eşzamanlı hıza yakın bir hızda döndürülmelidir. Böyle yapılması halinde, rotor kutupları manyetik olarak dönen stator kutuplarına bağlanır ve böylece rotor senkron hızda dönmeye başlar. Senkron makineler doğrudan yerel hatta iletilemezler, bazı özel yöntemler ile çalışırlar. Senkron makinelerin rotor ve stator sargıları başka kaynaklardan beslenmesi sebebiyle çift uyarımlı makineler sınıfında yer alır. Senkron makinelerin güçleri az olanlar sabit mıknatıslı güçleri fazla olanlar sargılı olarak üretilmektedir. Senkron jeneratörler daha çok sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde tercih edilmektedir. Bu

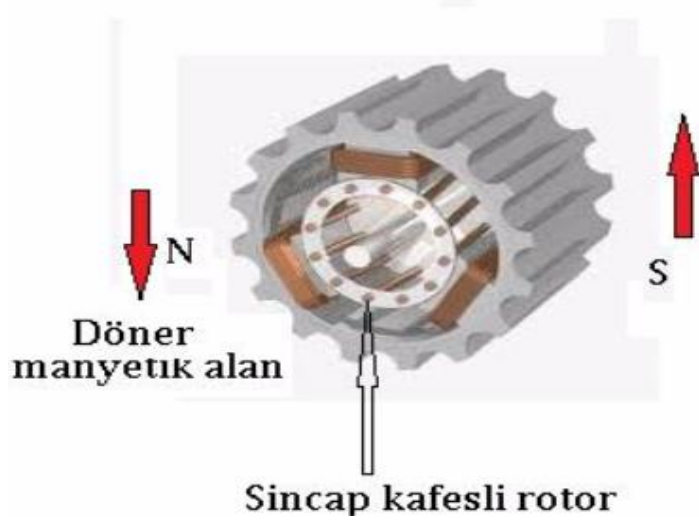
nedenle değişken hızlarda çalışan rüzgâr türbini işletmelerinde çok tercih edilmemektedir. Şebekeden çekilen AC akım doğrultularak DC akıma dönüştürülür. Daha sonrada fırçalar vasıtasıyla rotor sargılarına iletilir [24]



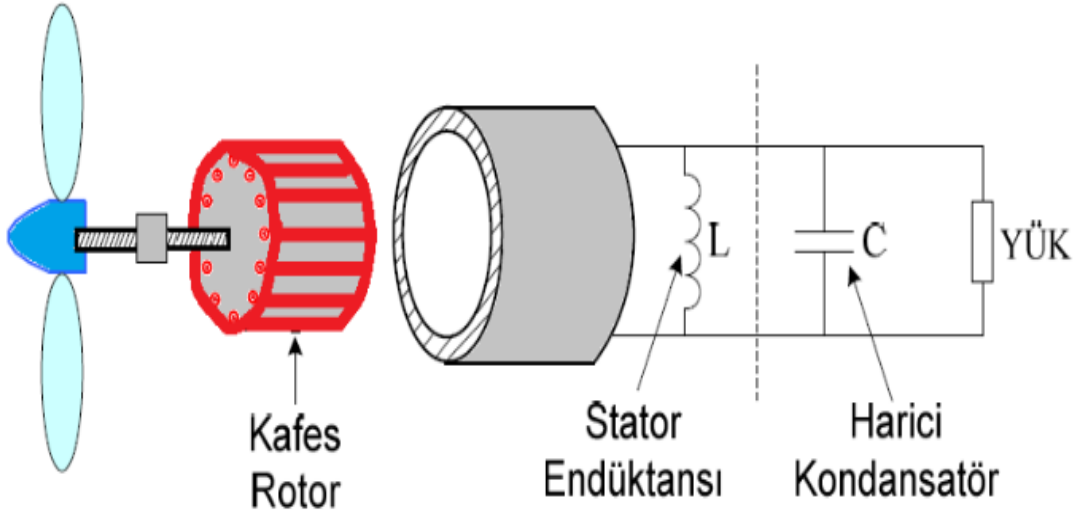
Şekil 6.2: Senkron makine

### 6.3 Asenkron Makine

Asenkron jeneratörler veya indüksiyon motoru elektrik akımının rotorda üretmesi gereken torkun, stator sargısının manyetik alanından elektromanyetik indüksiyon vasıtasıyla elde edildiği AC elektrik motorudur. Bu nedenle, bir indüksiyon motoru, rotora elektriksel bağlantı olmaksızın yapılabilir. Bir indüksiyon motorunun rotoru sarılı veya sincap kafesli olabilir. Üç fazlı sincap kafesli asenkron motorlar sağlam ve güvenilir olduğu için endüstriyel olarak yaygın kullanıma sahiptir. Bu jeneratörler çalışma sırasında mıknatıslanma akımına gereksinimi vardır ve mıknatıslanma için ihtiyaç duyulan akım şebeke veya kondansatörler vasıtasıyla sağlanır. Rüzgâr türbinlerinde genel olarak bu jeneratörler kullanılır. Asenkron makinenin rotorunu harekete geçirecek rüzgar sürati senkron hızdan fazla olduğunda makinede jeneratör çalışmaya başlar, elektrik üretimi gerçekleşir ve şebekeye aktarılır. Sistem şebekeyle paralel çalışıyorsa 3 fazlı mıknatıslanma akımı şebekeden sağlanır. Bunun haricindeki durumlarda makineye bağlanan kondansatör vasıtasıyla ihtiyaç duyduğu uyarı akımı verilmiş olur [24].



Şekil 6.3: Sincap kafesli asenkron makine



Şekil 6.4: Kendinden uyarımlı asenkron makine

## 7. TÜRBİN MODELİNİN MATEMATİKSEL FORMÜLASYONU

Aşağıdaki ifade de bu modelde kullanılan çeşitli değişkenlerin tanımını göstermektedir.

$E$  = Kinetik Enerji (J)

$\rho$  = Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )

$m$  = Kütle (kg)

$A$  = Süpürme Alanı ( $\text{m}^2$ )

$v$  = Rüzgâr Hızı (m/s)

$C_p$  = Güç Katsayısı

$P$  = Güç (W)

$r$  = Radius (m)

$dm/dt$  = Kütle Akış Oranı (kg/s)

$x$  = Mesafe (m)

$dE/dt$  = Enerji Akış Oranı (J/s)

$t$  = Zaman (s)

$a$  sabit ivmesi altında  $m$  kütesine sahip cismin kinetik enerjisi  $E$  hızı  $v$  ise yapılan iş  $W$  ifadesine eşittir.  $F$  kuvveti altında cismin  $s$  birim yer değiştirmesi  $E = W = F \cdot s$  ile ifade edilir [9].

İş ve kinetik enerji yasası(iş-enerji ilkesi) bir parçacığa etkiyen tüm kuvvetler tarafından gerçekleştirilen işin, parçacığın kinetik enerjisinde meydana gelen değişime eş değer olduğunu belirtir. Bir parçacık üzerine bileşke kuvvet vasıtasıyla gerçekleştirilen  $W$  işi, parçacığın kinetik enerjisinde meydana gelen  $F$  değişimine eşit olur [25].

Newton 'un 2. Hareket kanununa göre;

$$F = m \cdot a \quad (1)$$

Böylece kinetik enerji

$$E = m \cdot a \cdot s \quad (2)$$

olur.

Katı cismin kinematiğinden,  $v^2 = u^2 + 2a \cdot s$  cismin ilk hızı  $u$  dur. Bu formülasyondan ivmeyi yalnız bırakıp  $a = (v^2 - u^2)/2s$  bu ifadeyi elde edebiliriz. Cismin ilk hızını sıfır varsayarsak ifadeyi  $a = v^2/2s$  bu hale dönüştürebiliriz. Dolayısıyla denklem 2' den;

$$E = 1/2 m \cdot v^2 \quad (3)$$

elde ederiz.

Bu kinetik enerji formülasyonu, katı kütlesinin sabit olduğu gerçeğine dayanmaktadır. Bununla birlikte rüzgârı (hareket halindeki hava) bir akışkan olarak düşünürsek, hem hızı hem de yoğunluğu değişebilir ve bu sebepten dolayı kütlesi sabit kalmaz. Yani rüzgâr türbinlerinde rüzgârın tüm enerjisini kullanmak mümkün değildir. Bu sebepten dolayı formül, kinetik enerji yasası ile 1/2 yerine 2/3 olur. Ancak biz havanın yoğunluğunu ve sıcaklığını önemli ölçüde değişebilir olmadığını varsayacağız. Çünkü bu enerjinin belirli bir kısmından rüzgâr çarkı yararlanmaktadır. Dolayısıyla hava içindeki  $v_w$  rüzgâr hızı ile hareket eden kütlesi  $m$  olan havanın kinetik enerjisi (joule cinsinden), 3 numaralı denklem ile hesaplanabilir. Rüzgârdaki güç  $P$ , kinetik enerjinin değişim oranı ile verilmektedir.

$$P = dE/dt = 1/2(dm/dt)v_w^2 \quad (4)$$

Kütle debisi  $dm/dt$  ise  $dm/dt = \rho \cdot A \cdot v_w$  ifadesine eşittir.  $A$ , rüzgâr akışının geçtiği alandır ve  $\rho$  ise havanın yoğunluğudur. Bu ifade ile denklem;

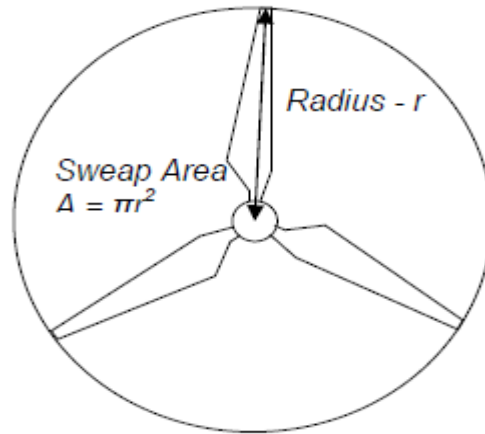
$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v_w^3 \quad (5)$$

olur. Bu şekilde  $v_w$  hızına sahip rüzgâr kütlesinin gücüne ulaşılır. Denklem 5 incelendiğinde anlaşılacağı gibi, rüzgâr enerjisinin bir bileşeni olan rüzgâr süratiyle 3.mertebeden ilişkisi vardır. Bu sebepten, rüzgâr süratinde oluşabilecek ufak değişikliklerin, enerji üretim esnasında ciddi farklar olarak yansıtacağını belirtmek mümkün olacaktır.

Türbinde süpürülen alanı aşağıdaki denklem kullanılarak türbin kanatları uzunluğundan hesaplanabilir [9]

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (6)$$

Yarıçapı bir kanat uzunluğuna eşittir ve aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 7.1: Süpürme Alanı

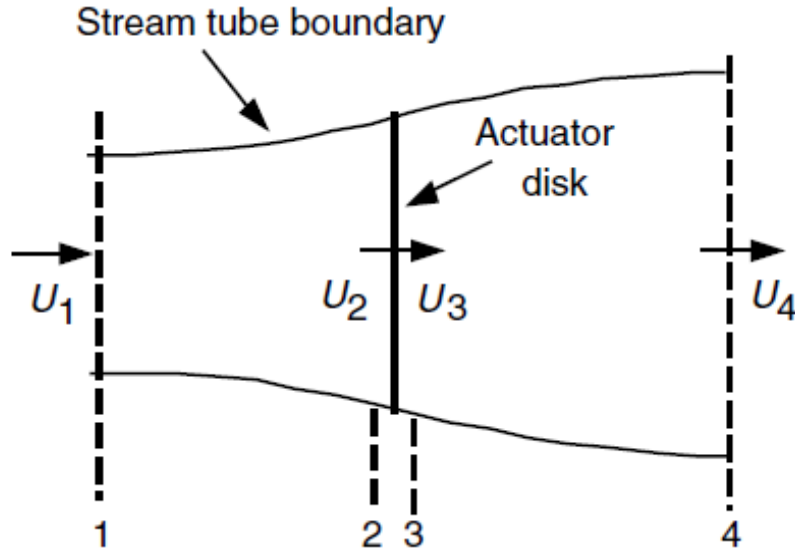
### 7.1 Tek Boyutlu Momentum Teorisi Ve İdeal Betz Limiti

Genel olarak Betz' e atfedilen, basit bir model olan ideal disk teorisi, ideal bir türbin rotorundan gelen gücü, ideal rotor üzerindeki rüzgârın itme gücünü ve yerel rüzgâr alanında rotor işleyiş reaksiyonunu belirlemek için kullanılabilir. Bu basit model, gemi pervanelerinin performansını öngörmek için 100 yıl önce geliştirilen doğrusal bir momentum teorisine dayanmaktadır. Analiz, kontrol hacim sınırlarının, bir akış tüpünün yüzeyi ve iki kesitinin olduğu bir kontrol hacmi olduğunu varsayar. Akış sadece akış tüpü uçları boyunca gerçekleşir. Türbin, hava akışının akış tüpünde bir süreksizlik basıncı oluşturduğu uniform bir aktüatör disk olarak temsil edilmektedir. Betz' in teorisine göre, disk boyunca geçen hava akış hızı, disk bölgesinin her yerinde aynı olmasına karşın basınç ani bir şekilde azalır. Bu düşüş diskin hareket enerjisini artırır. Betz' in ideal disk teorisine göre hesaplama yapılırken, akışın homojen, sıkıştırılmaz ve sürekli olduğu, disk üzerinde meydana gelen basınç değişiminin diskin her yerinde aynı olduğu, kanat sayısının sonsuz olduğu ve diskte hiçbir şekilde türbülans olmadığı kabul edilmiştir.

Bu analizde aşağıdaki varsayımlar kullanılmaktadır;

- Disk boyunca geçen hava akışı homojen, sıkıştırılmaz ve sürekli dir.
- Herhangi bir sürtünme yoktur.
- Kanat sayısı sonsuzdur.
- Dönme hareket olmayan alandır.

- Rotor alanında veya disk üzerinde uniform itme gücü vardır
- Disk üzerinde meydana gelen basınç değişimi, diskin her noktasında aynıdır.
- Rotorun arka ve ön alanından yeteri kadar uzakta oluşan statik basınç, bozulmamış ortam statik basıncına eş değerdir.
- Diskte türbülans yoktur.



Şekil 7.2: Bir rüzgâr türbininin aktüator disk modeli

$U$ , hava hızı anlamına gelmektedir ve 1, 2, 3, 4 konumlarında gösterilmektedir.

Tüm sistemi çevreleyen kontrol hacmine doğrusal momentum korunum prensibini uygulayarak, kontrol hacminin içeriği üzerindeki net kuvvet bulunabilir. Bu kuvvet, rüzgâr türbini üzerindeki rüzgârın kuvveti olan  $T$ , itme kuvvetinin tersidir ve eşittir. İtme gücü, hava akışının momentum değişimi oranının tersidir ve eşittir. Bir boyutlu, sıkıştırılmaz, zamanla değişmeyen bir akış için doğrusal momentum korunum prensibinden;

$$T = U_1(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4 \quad (1)$$

Kontrol hacminde akım yönüne etki eden net kuvvet bulunur. Burada  $\rho$ , havanın yoğunluğu,  $A$ , kesit alanını,  $U$ , havanın hızını göstermektedir. Kararlı durum akışı için;

$$(\rho AU)_1 = (\rho AU)_4 = \dot{m} \quad (2)$$



Kütle akış debisi bulunur. Buradan;

$$T = \dot{m} (U_1 - U_4) \quad (3)$$

İtme gücü pozitiftir bu yüzden rotor arkasındaki akış hızı ( $U_4$ ), serbest akış hızından ( $U_1$ ) daha azdır. Türbin rotorunun her iki tarafında da hiç bir iş yapılmaz. Böylece Bernoulli fonksiyonu, aktüator diskin her iki tarafındaki iki kontrol hacminde kullanılabilir. Akış tüpünde disk girişinde Bernoulli denklemi;

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho U_1^2 = p_2 + \rho U_2^2 \quad (4)$$

Akış tüpünde disk çıkışında Bernoulli denklemi;

$$p_3 + \frac{1}{2} \rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2} \rho U_4^2 \quad (5)$$

Rotor giriş ve çıkış basınçlarının eşit olduğu varsayılır ( $p_1 = p_4$ ) ve diskten geçen hava akışının sabit olduğu ( $U_2 = U_3$ ) olarak kabul edilir.

İtme gücü, aktüator diskin her iki kısmındaki kuvvetlerin net toplamı olarak da belirtilebilir.

$$T = A_2(p_2 - p_3) \quad (6)$$

4. ve 5. denklemlerden  $p_2 - p_3$  ifadesi çözülür ve 6. denklemin içine eklenirse;

$$T = \frac{1}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) \quad (7)$$

elde edilir.

Ayrıca kütleli akış hızları  $\rho A_2 U_2$  ve 3 ve 7 denklemlerindeki itme gücü değerleri eşitlenirse;

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (8)$$

elde edilir.

Böylece, bu basit model kullanılarak, rotor düzlemindeki rüzgâr hızı, giriş ve çıkış rüzgâr hızlarının ortalaması olarak bulunur.

Eksenel indüksiyon faktörü  $a$ , rotor düzlemi ve serbest akış arasındaki rüzgâr hızında, kesirli bir azalma olarak tanımlanırsa;

$$\alpha = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (9)$$

$$U_2 = U_1(1 - \alpha) \quad (10)$$

$$U_4 = U_1(1 - 2\alpha) \quad (11)$$

$U_1$  miktarı sık sık rotorda indüklenen hız olarak ifade edilir, bu durumda rotordaki rüzgâr hızı, indüklenen rüzgâr hızı ve serbest akış hızının bir birleşimidir. Eksenel indüksiyon faktörü sıfır değerinden arttıkça, rotorun arka kısmındaki rüzgâr hızı değeri gittikçe yavaşlar. Eğer  $a = 1/2$  ise, rüzgâr rotor arkasında sıfıra doğru yavaşlar ve basit teori artık kabul edilir olmaz.

Rotor güç çıkışı  $P$ , itki kuvvetinin diskteki hız ile çarpımına eşittir;

$$P = \frac{1}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) U_2 = \frac{1}{2} \rho A_2 U_2 (U_1 + U_4)(U_1 - U_4) \quad (12)$$

Denklem 10. ve 11. eşitliklerindeki  $U_2$  ve  $U_4$  eşitlikleri, 12. denklemdeki ifadeye konulursa;

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (13)$$

Rotorda kontrol hacim alanı olan  $A_2$ , rotor alanı  $A$  olarak değiştirildi ve serbest akış hızı  $U_1$  ise  $U$  olarak değiştirildi.

Rüzgâr türbini rotor performansı genellikle güç katsayısı ile karakterize edilir,  $C_p$ ;

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^3 A} = \frac{\text{Rotor power}}{\text{Power in the wind}} \quad (14)$$

denklemlerle elde edilir. Güç katsayısını indüksiyon faktörü cinsinden yazarsak;

$$C_p = 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (15)$$

elde ederiz. Maksimum güç katsayısı  $C_p$ , indüksiyon faktörü  $a'$  ya göre türevi alınarak sıfıra eşitlenir;

$$\frac{dC_p}{d\alpha} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{dC_p}{da} = \frac{1}{2} \times [(1 - a^2) + (1 - a) \times (1 - 2 \times a)] = 0 \quad (17)$$

$$\frac{1}{2}(1+a)(1-3a) = 0 \quad (18)$$

denklem sonucuna göre;

$a = -1$  veya  $a = 1/3$  bulunur. Ancak  $-1$  çözüm değildir. Bu yüzden  $a = 1/3$  olur ve bu değer denklemde yerine konulduğunda türbinin ulaşabileceği maksimum güç katsayısı elde edilir.

$$C_{P,max} = 16/27 = 0.5926 \quad (19)$$

Türbinin ulaşabileceği maksimum güç katsayısı olan bu değere Lanchester Betz Limiti adı verilir. Bu limit değeri, rüzgâr enerjisi elektrik santrallerinin en fazla %59,3 verime sahip olabileceğini göstermektedir

Denklem 7, 10 ve 11' den, diskteki aksenal itme kuvveti;

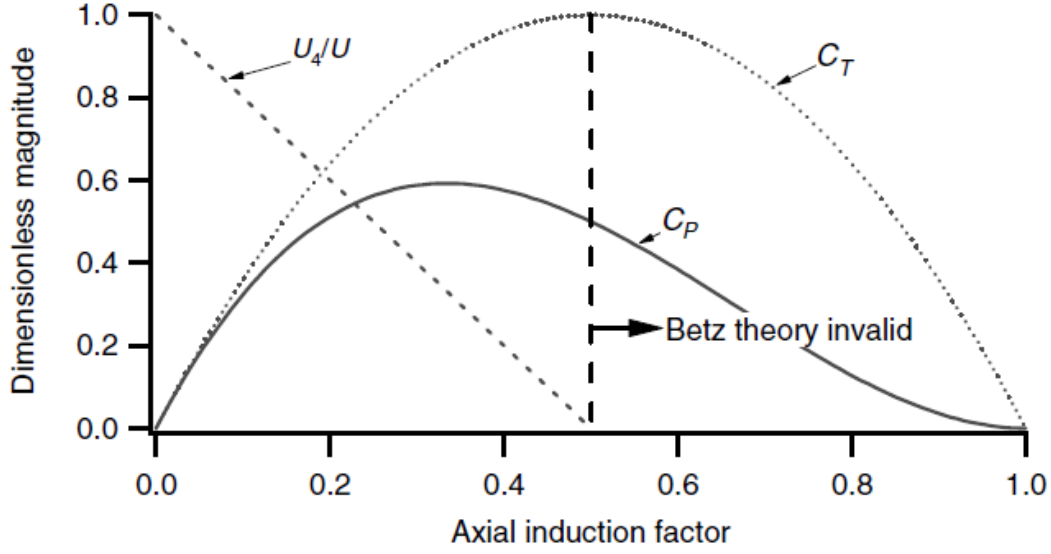
$$T = \frac{1}{2}\rho AU^2[4a(1-a)] \quad (20)$$

Benzer bir şekilde, bir rüzgâr türbini üzerindeki itme kuvveti, güç boyutsuz bir itme katsayısı ile karakterize edilebilir.

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} = \frac{\text{Thrust force}}{\text{Dynamic force}} \quad (21)$$

Denklem 20' den, ideal bir rüzgâr türbini için itme katsayısı  $4a(1-a)$ ' ya eşittir.  $a = 0.5$  ve çıkış akış hızı sıfır iken,  $C_T$ ' nin maksimum değeri '1' olur. Maksimum çıkış gücünde  $a = 1/3$ ,  $C_T = 8/9$  değerindedir. İdeal Betz türbini ve boyutsuz çıkış rüzgâr hızı için itme katsayısı ve gücün grafiği aşağıda gösterilmektedir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, idealize edilmiş model 0,5' den daha büyük aksenal indüksiyon faktörleri için geçerli değildir. Pratikte aksenal indüksiyon faktörü 0,5 değerine yaklaşır veya aşarsa, bu modelde temsil edilmeyen karmaşık akış modelleri, 2' ye kadar yükselebilen itki katsayılarıyla sonuçlanır.



**Şekil 7.3:** Rotor arka bölgesindeki aksel indüksiyon faktörü ve hıza göre değişen itme ve güç katsayıları

Betz limiti için çalışma parametreleri;

$U$ : sabit (dağılmamış) hava hızı

$U_4$ : Rotor arkasındaki havanın hızı

$C_P$ : Güç Katsayısı

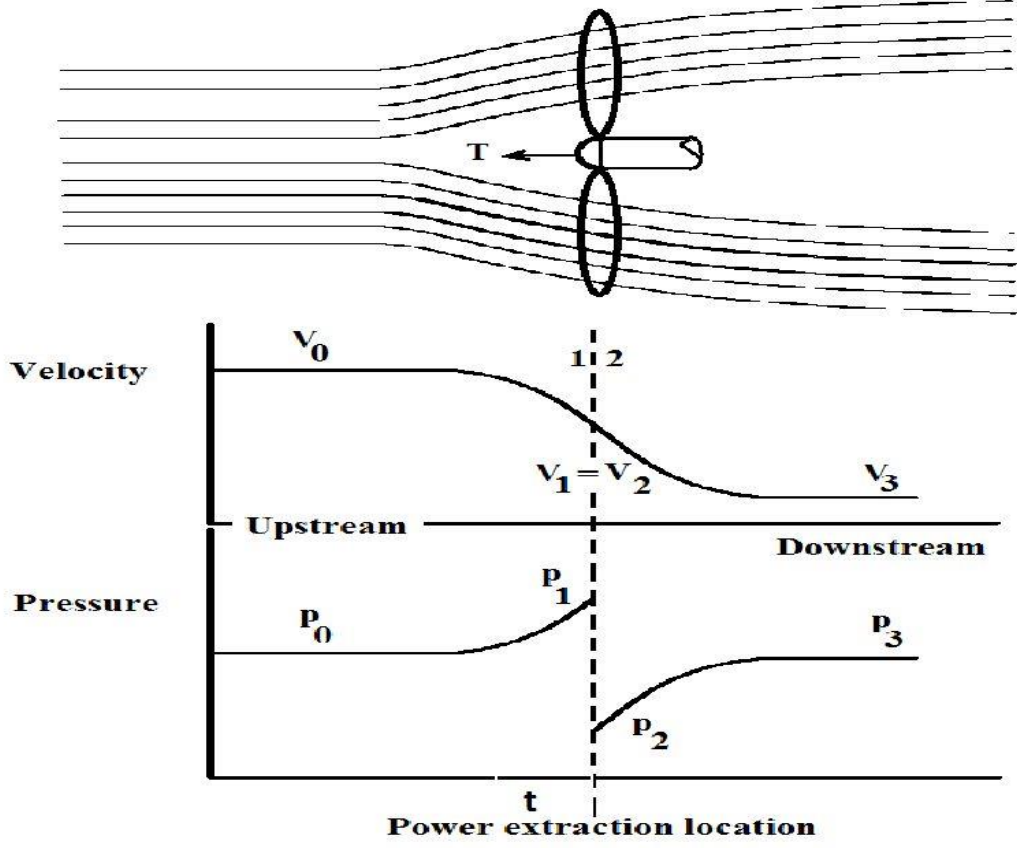
$C_T$ : İtme Katsayısı

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi  $a > 1/2$  olduğunda rotorun arka bölgesindeki rüzgâr hızı sıfıra doğru ilerlemekte ve güç katsayısı bu değerden sonra azalmaya başlamaktadır.

Betz limiti  $C_{P,max}$  16/27 olduğunda, maksimum mümkün olan teorik rotor güç verimine ulaşılır. Pratikte, maksimum ulaşılabilecek rotor gücünün, azalmasını sağlayacak 3 etken vardır;

- Rotorun arkasında türbülans oluşması
- Sınırlı sayıda kanat olması ve uç kayıplarıyla ilişkili olması
- Sıfır olmayan aerodinamik sürtünmelerin olması

Genel türbin verimi, hem rüzgar türbininin mekanik verimi(elektrikte dahil) hem de rotorun güç katsayısının bir fonksiyonudur.



Şekil 7.4: Türbin Rotorundan Geçen Hava Hız ve Basınç Değişimi

$$\eta_{overall} = \frac{P_{out}}{\frac{1}{2}\rho AU^3} = \eta_{mech} C_P \quad (22)$$

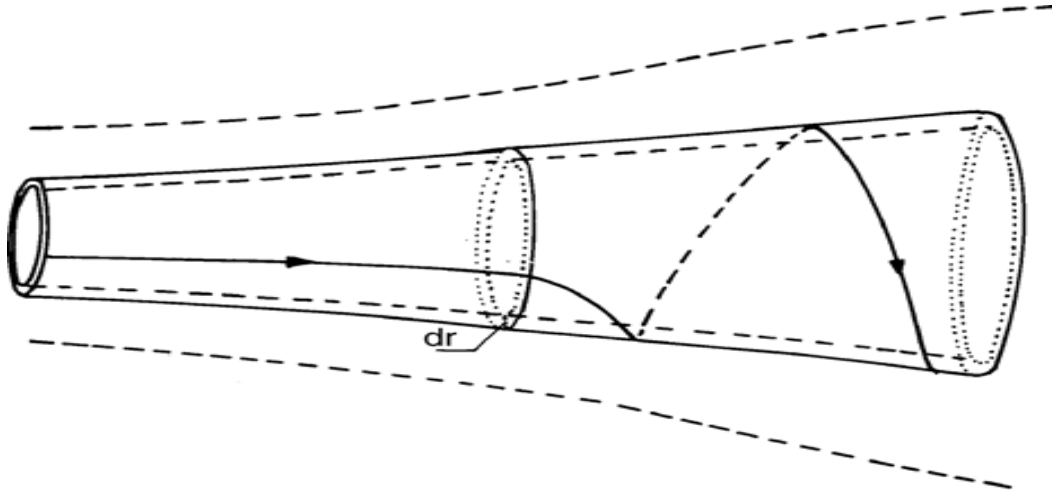
böylece;

$$P_{out} = \frac{1}{2} \rho AU^3 (\eta_{mech} C_P) \quad (23)$$

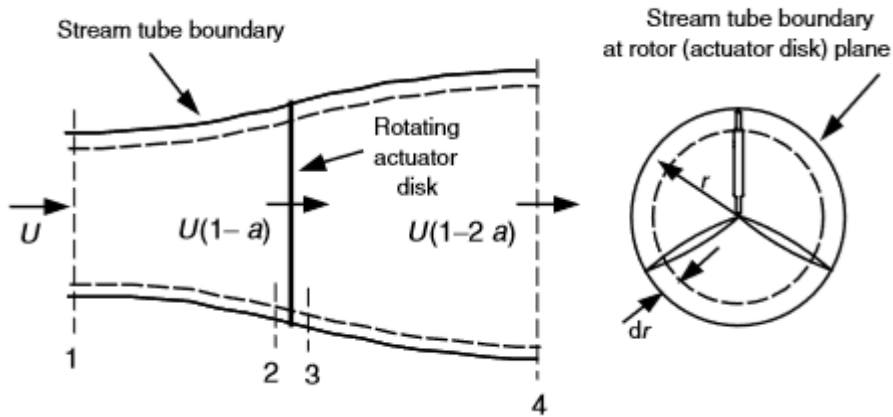
olur [26].

## 7.2 Türbülanslı Dönme Hareketi Olan İdeal Türbin

Önceki analizde doğrusal momentum teorisi kullanılarak, akışa herhangi bir dönme hareketi uygulanmadığı varsayılmıştı. Pervanelere dik doğrultuda gelen rüzgâr hızı, rotor boyunca geçerken rotara bir dönme torku uygular, haliyle rotorda rüzgâra karşı bir tork uygular. Bu sebepten, gerçekte rüzgâr türbini rotoru belli bir açısal hız ile dönmektedir. Şekildeki gibi hava akışıyla birlikte rotor dönmeye başlar ve açısal momentum elde edilir. Dönme hareketi olan rotorun önceki analizde ürettiği doğrusal momentum durumu genişletilebilir. Dönen bir rüzgâr türbini rotorunda, rotor üzerindeki akış tarafından torka uygulanan tepki olarak, rotorun arkasındaki akış rotora ters yönde döner. Bu akışı dögüsel olarak gösteren bir tüp modeli aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 7.5: Dönen rüzgâr türbini kanatları arkasındaki akış için akım borusu modeli



Şekil 7.6: Rotor analizi için geometri;  $U$ , bozulmamış hava hızı,  $a$ , indüksiyon faktörü,  $r$ , radyus

Girdap içinde dönme kinetik enerjisinin üretimi, girdap rotasyonu olmaksızın beklenenden, rotor tarafından daha az enerji çekmesiyle sonuçlanır. Genel olarak, rüzgâr türbini girdabındaki ekstra kinetik enerji, üretilen tork daha yüksekse daha yüksek olacaktır. Böylece, daha yavaş çalışan rüzgâr türbinleri (düşük dönme hızlı ve yüksek torklu), düşük torklu yüksek hızlı makinelere göre daha fazla girdap dönme kayıpları yaşar. Rotorun açısız hızı ile dönen  $r$  çaplı,  $d_r$  kalınlığında bir akış borusunu kontrol hacmi olarak kabul edersek,  $2\pi d_r$ ' ye eşit olan bir kesit alanı elde edilir ve kanadın ön ve arka iz bölgesindeki basınç farkını elde etmek için bir enerji denklemi oluşturulabilir. Basınç, girdap rotasyonu ve indüksiyon faktörlerinin hepsi yarıçapın bir fonksiyonu olduğu kabul edilir. Akış diski boyunca geçen hava akışının aksel bileşenleri sabit kalırken, kanatlara göre açısız hız  $\Omega$  değerlerinden,  $\Omega + \omega$  değerlerine yükselecektir. Bunun sonucunda oluşacak basınç farkı;

$$p_2 - p_3 = \rho \left( \Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \quad (24)$$

Bir dairesel eleman üzerinde itme kuvvetinin sonucu;  $d_T$ ,

$$dT = (p_2 - p_3)dA = \left[ \rho \left( \Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \right] \quad (25)$$

Açısız indüksiyon faktörü  $a'$  ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanacak olursa;

$$a' = \omega / 2\Omega \quad (26)$$

Analize girdap rotasyonu dâhil edildiğinde, rotorda indüklenen hız sadece aksel bileşenleri değil ayrıca  $U_a$ , rotor düzlemindeki bileşenleri de oluşturur. İtke ifadesi için durum şu hale gelir;

$$dT = 4a'(1 + a') \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 2\pi r dr \quad (27)$$

Bir önceki doğrusal momentum analizini takiben, dairesel bir kesit üzerindeki itme, aksel indüksiyon faktörü  $a$ , kullanılarak aşağıdaki ifadeyle de belirlenebilir ( $U_1$  serbest akış hızı bu analizde  $U$  olarak gösterilmiştir). Aksel indüksiyon faktörü  $a$  cinsinden denklem 20' den yazılacak olursa;

$$dT = 4a(1 - a) \frac{1}{2} \rho U^2 2\pi r dr \quad (28)$$

Denklem 27 ve 28' de itke kuvveti için verilen iki ifadeyi de eşitleyecek olursak;

$$\frac{a(1-a)}{a'(1+a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{U^2} = \lambda_r^2 \quad (29)$$

Uç hız oranı  $\lambda$ , kanat ucu hızının rüzgâr hızına oranı olarak tanımlanır.

$$\lambda = \Omega R / U \quad (30)$$

Rüzgâr türbininde uç hız oran değeri, rüzgâr türbini performansını etkileyen önemli bir tasarım parametresidir. Uç hız oranı, rotor için aerodinamik denklemlerde sıklıkla görülür.

Açısal momentum korunumunu uygulayarak rotor üzerindeki tork için bir ifade elde edilebilir. Bu durumda rotora uygulanan tork  $Q$ , girdabın açısal momentumdaki değişimine eşit olmalıdır. Artan dairesel bir alan üzerinde;

$$dQ = d\dot{m}(\omega r)(r) = (\rho U_2 2\pi r dr)(\omega r)(r) \quad (31)$$

$U_2 = U(1 - a)$  ve  $a' = \omega/2\Omega$ , bu ifadeler yerine konulursa;

$$dQ = 4a'(1 - a) \frac{1}{2} \rho U \Omega r^2 2\pi r dr \quad (32)$$

Her bir elemanda üretilen güç  $dP$ , aşağıdaki ifade ile bulunabilir;

$$dP = \Omega dQ \quad (33)$$

Bu denklemde  $dQ$  ifadesinin açılımı ve denklem 30' daki uç hız oranı eklenirse, her bir elemanda üretilen güç ifadesi şu hali alır;

$$dP = \frac{1}{2} \rho A U^3 \left[ \frac{8}{\lambda^2} a'(1 - a) \lambda_r^3 d\lambda_r \right] \quad (34)$$

Herhangi bir dairesel halkadan gelen gücün, aksenal ve açısal indüksiyon faktörleri ve uç hız oranının bir fonksiyonu olduğu görülebilir. Aksenal ve açısal indüksiyon faktörleri, rotor düzlemindeki hava akışının büyüklüğünü ve yönünü belirler. Yerel hız oranı, uç hızı oranının ve yarıçapın bir fonksiyonudur.

Her halkadan güç katsayısına verilen katkı değeri;

$$dC_P = \frac{dP}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (35)$$

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1 - a) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (36)$$



Bu ifadenin çözümlenmesi için  $\lambda_r$ ,  $a$  ve  $a'$  arasındaki ilişkilerin belirlenmesi gerekir. Denklem 29' da işlem yapıp  $a'$  ifadesini  $a$  cinsinden yazacak olursak;

$$a' = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\left[1 + \frac{4}{\lambda_r^2} a(1-a)\right]} \quad (37)$$

Maksimum mümkün olabilecek güç üretimi için aerodinamik şartlardaki  $a'(1-a)$  teriminin maksimum olması gerekir. Denklem 37' deki  $a'$  terimi için  $a'(1-a)$  ifadesi içine değeri yerine konularak ve sifıra eşitlenip  $a$  ifadesine göre türevi alınır;

$$\lambda_r^2 = \frac{(1-a)(4a-1)^2}{1-3a} \quad (38)$$

Bu denklem, her bir dairesel halkadaki yerel uç hız oranının bir fonksiyonu olarak, maksimum güç için aksel indüksiyon faktörünü tanımlar. Bu işlemi de denklem 29' daki ifadede yerine koyarsak, her bir dairesel halkadaki maksimum güç için;

$$a' = \frac{1-3a}{4a-1} \quad (39)$$

Denklem 38' deki eşitlik,  $a'$  ya göre türevi alınırsa  $d\lambda_r$  ve  $da$  arasında bütün koşullarda maksimum güç üretimiyle sonuçlanan bir ilişki elde edilir;

$$2\lambda_r d\lambda_r = [6(4a-1)(1-2a)^2/(1-3a)^2] da \quad (40)$$

Denklem 38 ve 40'daki eşitlik denklem 36' ya taşınırsa maksimum güç için ifade şu hali alır;

$$C_{P,max} = \frac{24}{\lambda^2} \int_{a_1}^{a_2} \left[ \frac{(1-a)(1-2a)(1-4a)}{(1-3a)} \right]^2 da \quad (41)$$

Eşitliği elde edilir. Bu denklemde  $a^1$  (alt limit),  $\lambda_r = 0$ 'daki indüksiyon faktörünü ifade ederken  $a^2$  (üst limit),  $\lambda_r = \lambda'$  daki indüksiyon faktörünü ifade etmektedir. Ayrıca denklem 38' den  $a_2$  için;

$$\lambda^2 = (1-a_2)(1-4a_2)/(1-3a_2) \quad (42)$$

ifadesi yazılabilir ve  $\lambda_r = 0$  değerinde iken  $a_1 = 0.25$ ' dir.

Denklem 42' den, ilgili uç hız oranlarındaki çalışmaya karşılık gelen  $a_2$  değerleri çözülebilir ve bu terimin maksimum değeri,  $a_2 = 1/3$ ' dür. Bu değer aksel indüksiyon faktörünün üst limitidir ve son derece büyük bir uç hız oranını vermektedir.

**Çizelge 7.1:** Güç katsayısı,  $C_{p,max}$ , uç hız oranının bir fonksiyonudur,  $\lambda$ ;  $a_2$  uç hız oranı yerel uç hız oranına eşit olduğundaki aksel indüksiyon faktörü

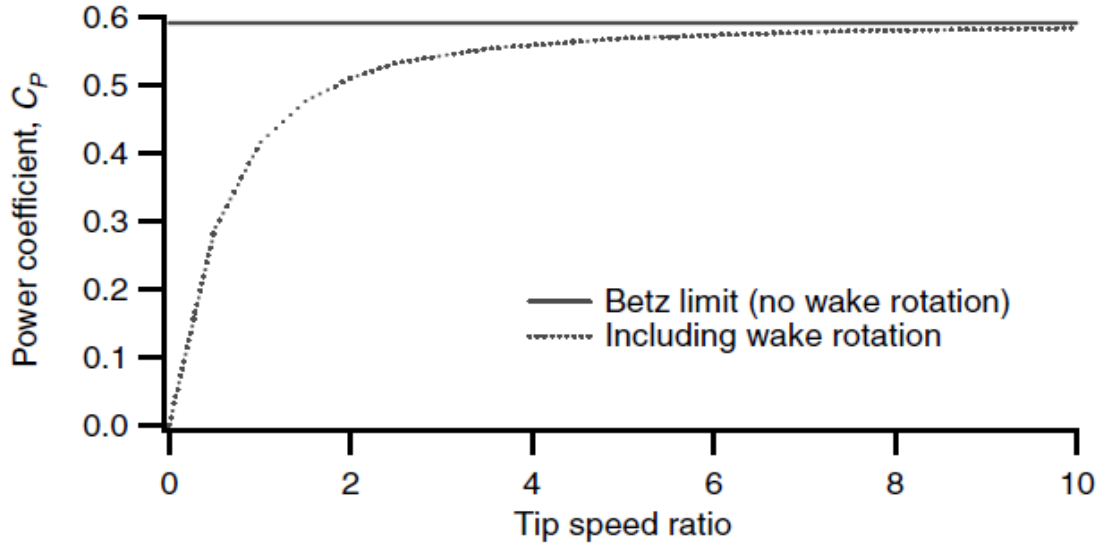
$\lambda$	$a_2$	$C_{p,max}$
0.5	0.2983	0.289
1.0	0.3170	0.416
1.5	0.3245	0.477
2.0	0.3279	0.511
2.5	0.3297	0.533
5.0	0.3324	0.570
7.5	0.3329	0.581
10.0	0.3330	0.585

Denklem 42 ' den  $a_2$  değeri için gerekli  $\lambda$  uç hız oranı hesaplaması yapılır ve  $a$  teriminin maksimum değeri  $a_2 = 1/3$  dür. Denklem 41' de  $(1 - 3a)$  ifadesi için  $x$  değeri yazılırsa, elde edilecek olan integrasyon ifadesi;

$$C_{p,max} = \frac{8}{729\lambda^2} \left\{ \frac{64}{5}x^5 + 72x^4 + 124x^3 + 38x^2 - 63x - 12[\ln(x)] - 4x^{-1} \right\}_{x=(1-3a_2)}^{x=0.25} \quad (43)$$

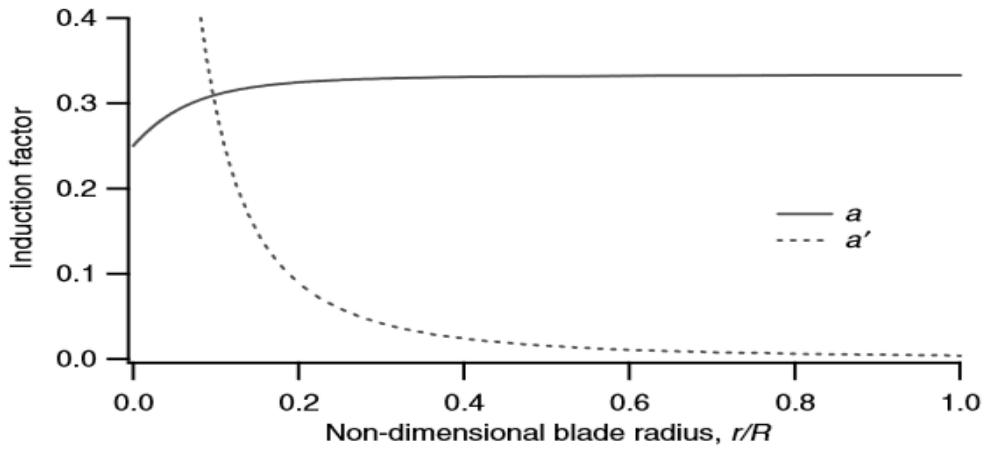
Çizelge, uçtaki aksel indüksiyon faktörüne karşılık gelen  $a_2$ ,  $\lambda$ ' nın bir fonksiyonu olarak  $C_{p,max}$  için nümerik değerlerinin bir özetini sunar.

Bu analizin sonuçları aşağıdaki şekil' de gösterilmektedir. Ayrıca bir önceki doğrusal momentum analizine dayanan ideal türbinin Betz limitini göstermektedir. Sonuçlar; yüksek uç hız oranlarında,  $C_p$  ifadesi teorik olarak maksimum değerine yaklaşmakta olduğunu göstermektedir.



**Şekil 7.7:** Girdap rotasyonlu ve rotasyonsuz ideal bir yatay eksenli rüzgâr türbini uç hız oranının bir fonksiyonu olarak teorik maksimum güç katsayısı

Grafikte de görüldüğü gibi uç hız oranı arttıkça verim Betz sınırına doğru yaklaşmaktadır. Aşağıdaki şekilde, uç hız oranı 7,5 olan bir türbin için açısız ve eksenel indüksiyon faktörlerini göstermektedir.



**Şekil 7.8:** Girdap rotasyonlu ideal bir rüzgâr türbini için indüksiyon faktörü; uç hız oranı,  $\lambda = 7,5$ ;  $a$ , eksenel indüksiyon faktörü;  $a'$ , açısız indüksiyon faktörü;  $r$ , yarıçap;  $R$  rotor yarıçapı

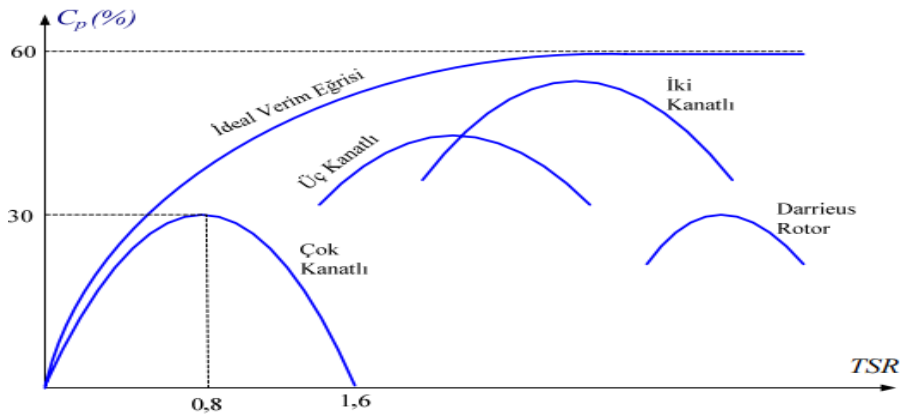
Bu bölümde kullanılan momentum teorisi, teorik olarak kanatçıklardan güç elde etme yaklaşımlarında kullanılabilir. Bu teori türbin için nasıl bir kanat dizaynı yapılmasını ortaya koymamaktadır. Kanadın geometrik yapısına göre kanada etkiyen aerodinamik kuvvetler ve her kanat kesitindeki uç hız oranı  $\lambda = \omega r/V$  değiştiğine

göre, maksimum performans eldesi için ihtiyaç olan kanat kesit burkulma değerleri sadece kanat teori hesaplamaları kullanılarak elde edilebilir [26].

### 7.3 Kanat Uç Hız Oranı

Bir rüzgâr türbininin uç hız oranı, bir kanadın ucunun teğetsel hızı ile gerçek rüzgâr hızı arasındaki orandır. Uç hız oranı verimlilikle ilgilidir ve optimum kanat dizaynıyla değişir. Güç katsayısı, rüzgâr türbini kanat uç hız oranıyla değişir [27].

Aşağıdaki şekilde, çeşitli türbin tasarım ve kanat sayısına göre kanat uç hız oranı ile güç katsayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 7.9: Farklı kanat yapılarındaki, kanat uç hız – güç katsayısı ilişkisi

$$TSR(\lambda) = \frac{\text{Tip Speed of Blade}}{\text{Wind Speed}}$$

Rotor Tipi	$\lambda$ (kanat uç hız oranı)	$C_p$ (Güç Katsayısı)
Pervane Tipi	3-10	0,42-0,57
Darrieus Tipi	5-6	0,40
Cyclogiro Tipi	3-4	0,45
Fan Tipi	1	0,3
Çok Kanatlı Tip	3-4	0,35
Yelken Kanat Tipi	4	0,35
Savonius Tipi	1	0,15
Hollanda Tipi	2-3	0,17

Şekil 7.10: Rotor tipi, uç hız oranı ve güç katsayısı arasındaki ilişki

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü üzere kanat uç hız oranları 4-6 civarında olduğunda maksimum güç katsayısı elde edilir.



**Şekil 7.11:** Hub merkezinden kanat ucuna gittikçe kanat hızları

Uç hız oranını hesaplamadan önce, rotorun bir turunun ne kadar zamanda tamamladığını bilmemiz gerekiyor. Bunun için birkaç yol var ancak en sağlıklı yöntem takometre ile ölçüm olacaktır.

Kanat uç hızını bulmak için;

- 1) Rotor yarıçapını ölçmeliyiz ( veya bir kanat uzunluğu)
- 2) Mesafe, zamana bölünür. (mesafe yol aldığı çemberin çevresidir)
- 3) Hız:  $2\pi r/t$

Bu şekilde kanat uç hız oranını saniyede ne kadar yol aldığını metre cinsinden hesaplayabiliriz [28].

$$\text{Blade tip speed} = \frac{\text{angular speed of turbine}(\omega) \times R}{\text{wind speed}}$$

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times n}{60}$$

Eğer rüzgâr türbini rotoru çok yavaş dönerse, rüzgârın çoğu kanatlar arasındaki boşluktan doğrudan geçecektir, bunun sonucunda güç üretilemeyecektir. Ama rotor çok hızlı dönerse, kanatlar bulanıklaşacak ve rüzgâr katı bir duvar gibi hareket edecektir. Ayrıca kanatlar hava içindeki bu dönüşüyle türbülans oluşturacaktır. Bir sonraki kanat çok hızlı dönmesiyle türbülanslı havaya çarpacaktır. Bu yüzden bazen türbin kanatlarını yavaşlatmak daha iyi sonuçlar verecektir. Rüzgâr türbini, rüzgardan maksimum güç elde edebilmek için optimum kanat uç hız oranıyla dizayn edilmelidir. Teorik olarak daha yüksek  $\lambda$  değerinde jeneratörün verimli çalışması açısından daha iyi olacaktır. Bununla birlikte dezavantajları da vardır. Yüksek  $\lambda$

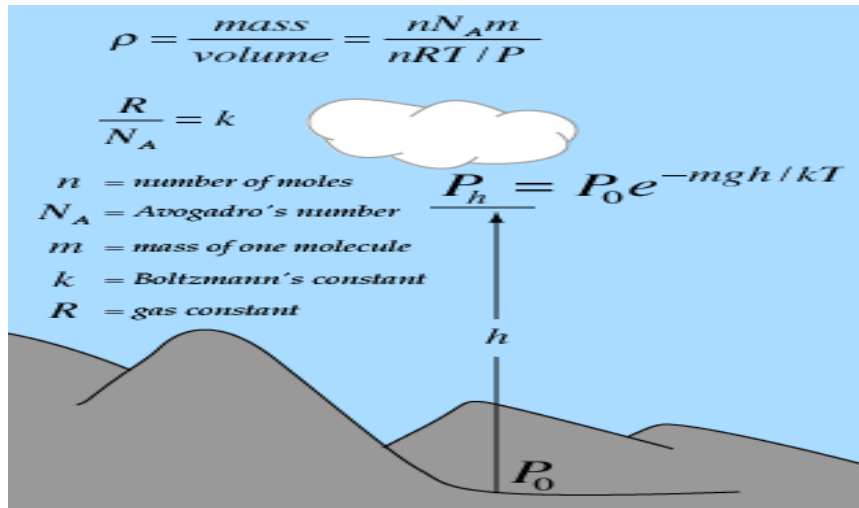
değerinde kanat uçları, havanın içinde bulundan kum, toz gibi parçacıkların etkisiyle deforme olacaktır. Bu da enerji maliyetini arttırabilen, özel erozyona dayanıklı kaplama malzemesinin kullanımını gerektirecektir. Ayrıca yüksek  $\lambda$  değeri titreşim, gürültü, rotor veriminin azalmasına yol açacak ve sürüklenme, uç kayıpları ve aşırı rotor hızı sebebiyle de türbinde hata oluşumuna yol açacaktır [9-28].

#### 7.4 Hava Yoğunluğunun Türbine Etkisi

Hava yoğunluğu türbin sistemine giren başka bir akıştır. Rüzgâr gücü, kanatları süpüren hava yoğunluğu ile doğrusal olarak değişir. Hava yoğunluğu  $\rho$ , gaz kanununa göre sıcaklık ve basıncın bir fonksiyonudur. Havanın basıncı arttığında yoğunluğu da artar veya havanın sıcaklığı azaldığında havanın yoğunluğu da azalır. Bu durum hal denklemiyle uyumludur;

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T}$$

$R$  gaz sabiti,  $T$  sıcaklık,  $P$  hava basıncı olarak tanımlanır. Sıcaklık ve basınç ise yüksekliğe göre değişir ve yükseklik arttıkça hem sıcaklık hem basınç azalır. Yükseklik gibi önemli olan saha alanı, hava yoğunluğu varyasyonu sonucunda ortaya çıkan güçte büyük bir etkiye sahiptir. Atmosfer basıncı 14,7 *psi* (101,325 *kpa*), sıcaklık  $T = 60^\circ F$  (15,55  $^\circ C$ ) ve yoğunluk  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$  ' tür. Bunlar standart referans koşullarıdır [29].



Şekil 7.12: Barometrik formülasyon [30]

$H_m$  deniz seviyesinden yükseklik  $\rho$  hava yoğunluğu,  $P_0$  deniz seviyesinde olan hava basıncıdır.

**Çizelge 7.2:** Sabit Parametreler [31]

Parameter	Description	Value
$\rho_0$	sea level standard atmospheric pressure	101325 Pa
$L$	temperature lapse rate, = $g/c_p$ for dry air	0.0065 K/m
$c_p$	constant pressure specific heat	~ 1007 J/(kg·K)
$T_0$	sea level standard temperature	288.15 K
$g$	Earth-surface gravitational acceleration	9.80665 m/s <sup>2</sup>
$M$	molar mass of dry air	0.0289644 kg/mol
$R$	universal gas constant	8.31447 J/(mol·K)

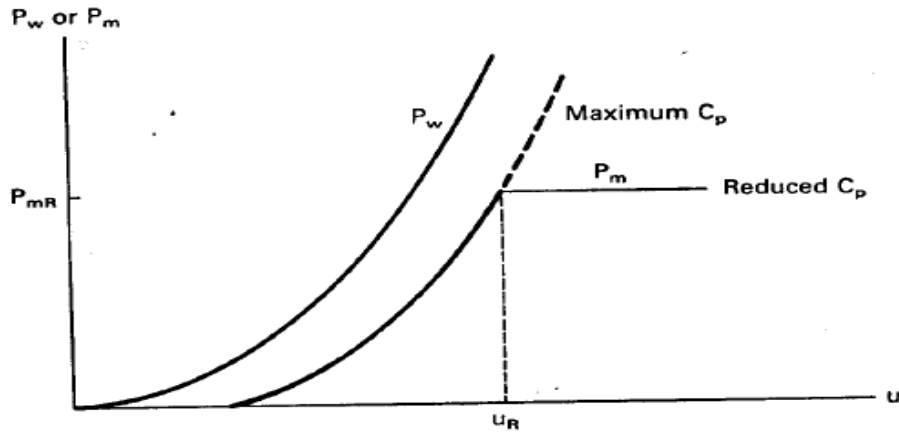
### 7.5 Türbin Rotorundan Alınabilecek Faydalı Güç

Bir rüzgâr türbini tarafından, rüzgârın gücünden çıkarılan güç fraksiyonu, genellikle o anki çalışma karakteristiği olan performans katsayısı  $C_p$  sembolü ile ifade edilir. Gerçek güç çıkışı aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$P_m = C_p \left( \frac{1}{2} \rho A u^3 \right) = C_p P_W \quad W \quad (1)$$

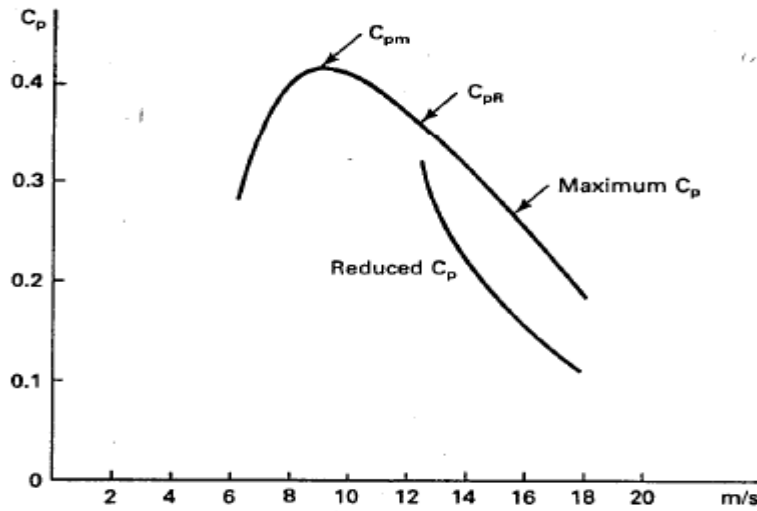
Performans katsayısı sabit değildir ve rüzgâr hızı, türbin dönme hızı ve hücum açısı, eğim açısı gibi türbin kanat parametreleriyle değişir.

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri normalde değişken eğim açılarına sahipken, Darrieus türbinleri sabit eğim açısı ile çalışır, Eğim,  $C_p$ ' yi türbin nominal hızına kadar mümkün olan en yüksek değerde tutacak şekilde değişir ve daha sonra  $P_W$ , rüzgâr hızı ile artmaya devam ederken, nominal değerdeki çıkış gücünü,  $P_{mR}$ , korumak için  $C_p$ ' yi azaltacak şekilde değişir. Aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.

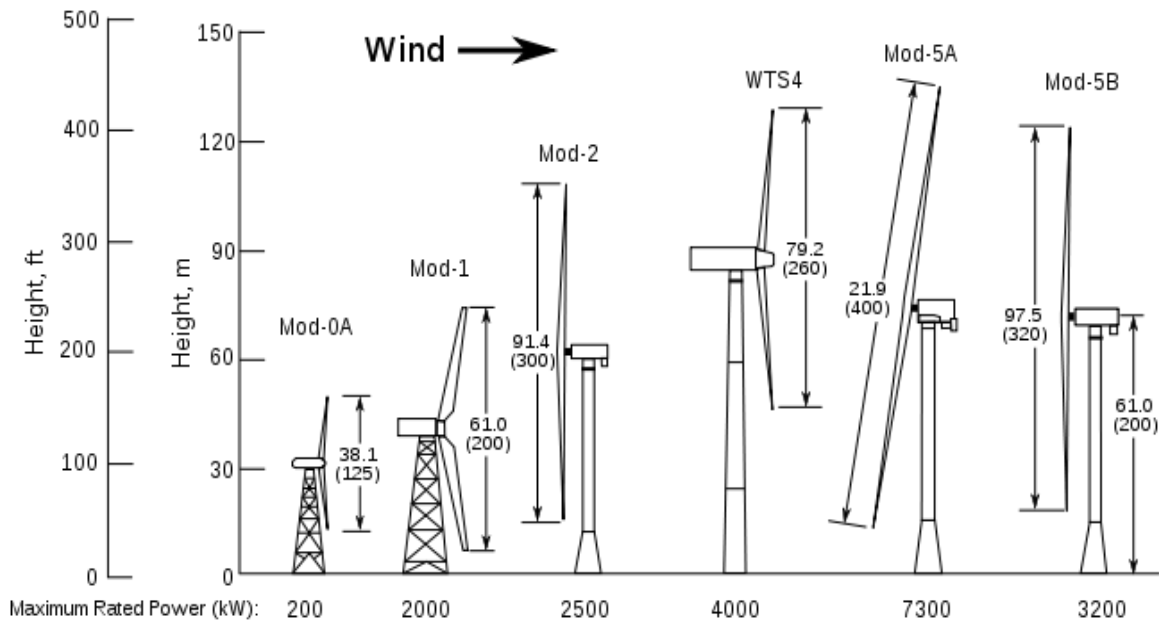


**Şekil 7.13:** Değişken eğimli türbinlerin şaft güç çıkışı

Kontrol limitleri ve üretim nedeniyle pitch(eğim) kontrolü ile  $C_p$ ' yi sabit tutmak pratik değildir, bu yüzden değişken eğimli kanat, sabit bir dönüş hızına sahip olsa bile rüzgâr hızı ile değişecektir.  $C_p$ ' nin hıza  $U$ , karşı değişimi şekilde gösterilmektedir. MOD-2 rüzgâr türbin modeli için; türbin 6,3 m/s rüzgâr hızında performans katsayısı 0.28' dir. Performans katsayısının maksimum olduğu 0.41 değerinde rüzgâr hız 9 m/s' dir [32].



Şekil 7.14: MOD-2 Türbin modeli için rüzgâr türbini performans katsayısı ilişkisi

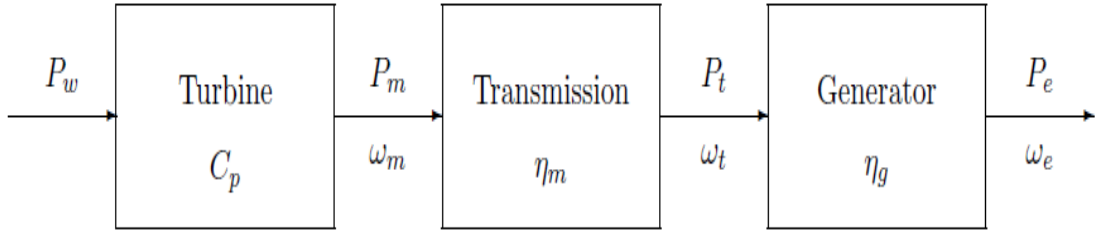


Şekil 7.15: MOD-2 Rüzgâr türbin modeli [33]



Şaft güç çıkışı normalde doğrudan kullanılmaz, genellikle bir dişli kutusu yoluyla üretece yükleme yapar. Şekilden de anlaşıldığı gibi ortamdaki rüzgâr hızına bağlı olarak elde edilebilecek güç ifadesi  $P_w$ 'dir. Bu güç türbin boyunca geçtikten sonra, türbin rotorundan  $P_m$  mekaniksel güç ve  $\omega_m$  açısal hız ile alınır ve bu da dişli veya şanzımana verilir. Şanzıman veya dişli çıkış gücü  $P_t$ , türbin çıkış gücü  $P_m$  ve dişli kutusu verimi  $\eta_m$  ile elde edilir.

$$P_t = \eta_m P_m \quad W \quad (2)$$



Şekil 7.16: Rüzgâr elektrik sistemi

Elektriksel güç çıkışı  $P_e$ , dişli güç çıkışı  $P_t$  ve jeneratör verimi  $\eta_g$  ile elde edilir.

$$P_e = \eta_g P_t \quad W \quad (3)$$

Denklem 1, 2 ve 3, rüzgâr enerji girdisi ve elektrik gücü çıkışı ile ilgili tek bir denklemde yazılmak istenirse;

$$P_e = C_p \eta_m \eta_g P_w \quad (4)$$

Nominal rüzgar hızında nominal güç çıkışı şu şekilde ifade edilebilir;

$$P_{eR} = C_{pR} \eta_{mR} \eta_{gR} \frac{\rho}{2} A u_R^3 \quad W \quad (5)$$

Türbinin genel verimliliği ise;

$$\eta_o = C_{pR} \eta_{mR} \eta_{gR} \quad (6)$$

Buradaki  $C_{pR}$ , nominal rüzgar hızındaki,  $u_R$ , performans katsayısıdır.  $\eta_{mR}$ , nominal güçteki dişli verimi,  $\eta_{gR}$ , nominal güçte jeneratör verimi,  $\rho$ , hava yoğunluğu ve  $A$ , türbin alanıdır [32].



## 8. BETZ MODELİNİN İRDELENMESİ VE GGS MODELİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

Serbest akışta, pervane tipi türbinler için 1920 li yıllarda Betz, yaptığı çalışmalarda %59' larda verim limiti elde etmiştir. Rüzgâr enerji tesisleri tasarlarken bu tür türbinlerin maksimum verimi Betz' in bu limit teoremi kullanılarak hesaplanmaktadır.

Betz, akım kesiti boyunca sabit hızın doğrusal akışıyla sıkıştırılamaz bir akış içine yerleştirilmiş türbin düzlemi için tek boyutlu bir model düşünmüştür.(Şekil a) türbin, eşit dağılmış basınç altında olduğu varsayılmıştır. Türbin verimi, türbin alanı üzerinden kısıtlanmamış yani serbest ve düzgün akış, gücünü türbin gücünün oranı olarak tanımlamıştır.

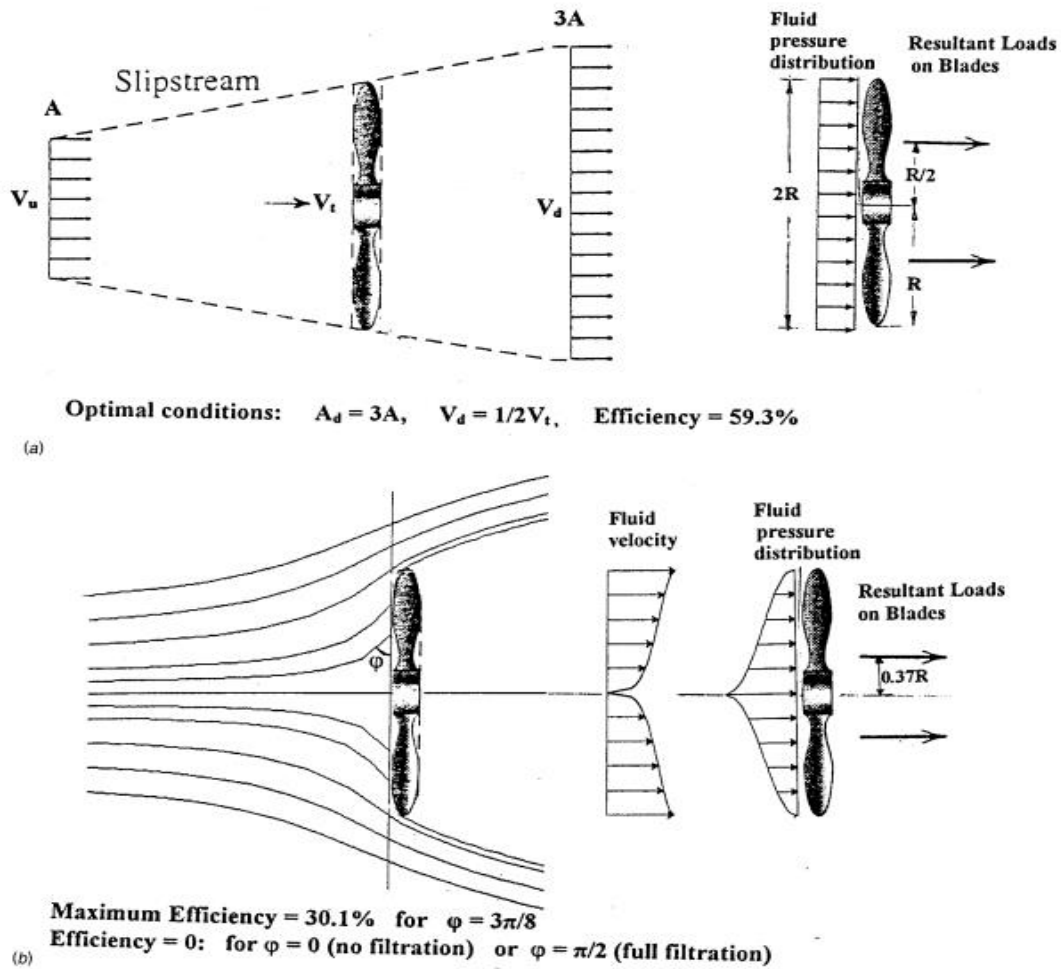
Betz 'in hesaplamalarına dayanarak momentum oranı değişikliği ve türbin boyunca akan akışkan için, Betz % 59 gibi yüksek bir verimlilik elde etmiştir.

Betz modelinin temel varsayımı, türbin boyunca geçen akışkan akışının doğrusal kalması ve türbin üzerindeki akışkan basıncının düzgün dağılımını korumasıdır. Bu şekilde türbin üzerine dağıtılmış yük, türbine uygulanan kuvvet ve torkun olduğundan daha fazla düşünülmesine ve sonuç olarak da, bu şartlarda türbin gücü ve veriminin yüksek değerlerde olduğuna yani düşünülenden daha fazla olduğuna yol açmaktadır. 2001 yılında, Groban, Gorlov ve Silantsev türbin düzlemi boyunca düzgün olmayan bir basınç dağılımı ve eğrisel akışını dikkate alan tam çözülebilen GGS modelini sundular [34]. Sorunlar Betz yaklaşımında dâhil değildi. Gerçekte akışkan akışları engele yaklaştığında doğrusal yönden sapar, eğrisel yörüngeleri hareketini değiştirir ve türbin üzerindeki basıncı azaltır (Şekil b). Akış için eğrisel yörüngelerin hesabı dikkate alınarak, daha doğru türbin gücü ve verimlilik sınırı elde edilir [35].

## 8.1 Eğrisel Akış İçin Önerilen Model

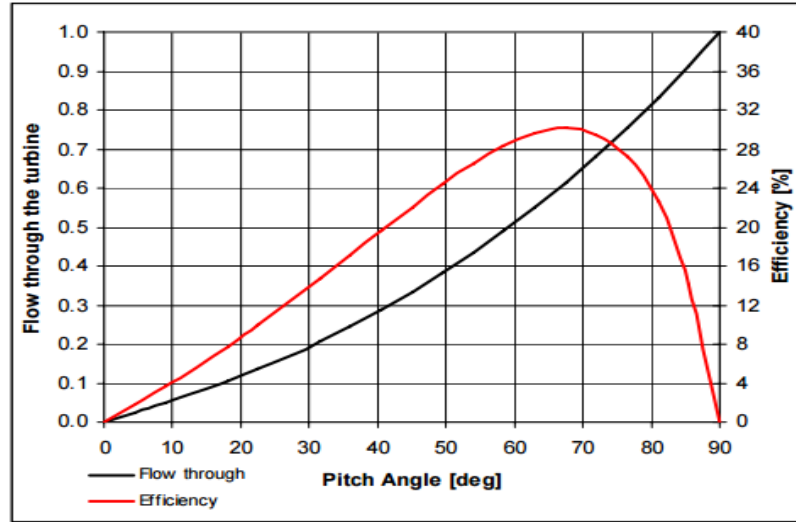
Eğrisel akışta türbin için GGS adı verilen yeni bir model şekil b' de gösterilmektedir. Betz ve GGS modellerinin karşılaştırılması aşağıda gösterilmektedir.

Betz modeline göre bileşke kuvvet, yarıçapı  $R$  olan, türbin ekseninden  $R/2$  uzaklıkta olan basınç merkezindeki her bir kanada uygulanmaktadır. GGS modeline göre ise bileşke kuvvet, türbin miline daha yakın, türbin ekseninden bir  $0.37 R$  mesafesine hesaplanmış olan basınç merkezinde uygulanmaktadır. Her iki modelde de bileşke kuvvetlerin kaldırma ve sürüklenme bileşenleri o türbini döndüren torku geliştirir. Manivela kollarındaki farkın sonucu olarak, GGS modelinde torkun Betz modeline göre daha büyük olduğu kolayca görülmektedir. Laboratuvar testleri ve ölçülen türbin verimleri, Betz limitinin genellikle hem hidrolik hem de rüzgâr düzlem türbinleri için çok yüksek olduğunu teyit etmektedir.



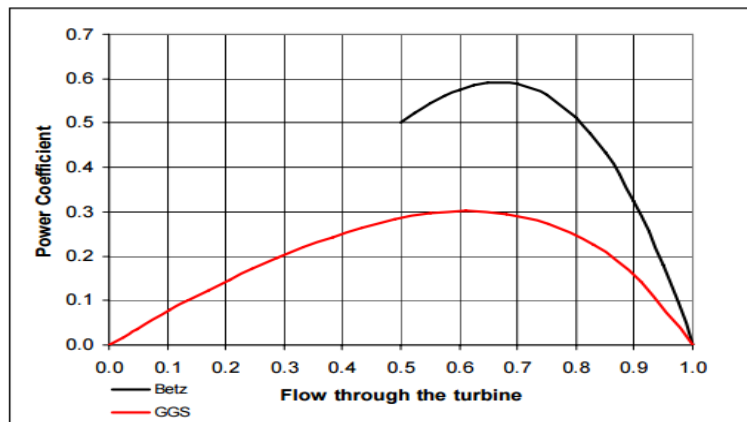
Şekil 8.1: a)Betz Doğrusal Akış Modeli, b) Önerilen kavisli akış modeli,  $\Phi$ = rotorun düzleme çarptığı açı

GGs modeli ve Betz kuramı arasındaki fark, GGS modelinde rüzgâr akışının kanatta dışa doğru bükülmesini de hesaplamalara dâhil etmesidir. Betz kuramı %59 yaklaşık verim tahmin yürütürken, GGS modeli verimi %30 civarı tahmin etmektedir. Yani Betz kuramı baz alınarak bu gücün %59'unun kullanılabilmesi varsayılır. Ancak daha kapsamlı bir hesaplama ile bu enerjinin % 30 civarında bir kısmının kullanılabilmesini söylemek daha olasıdır. Betz kuramı rüzgâr akışının kanadın etkisi ile bükülüp kaçması gerektiğini hesaba katmamaktadır [35].



Şekil 8.2: Eğim açısına karşı akış ve verimlilik

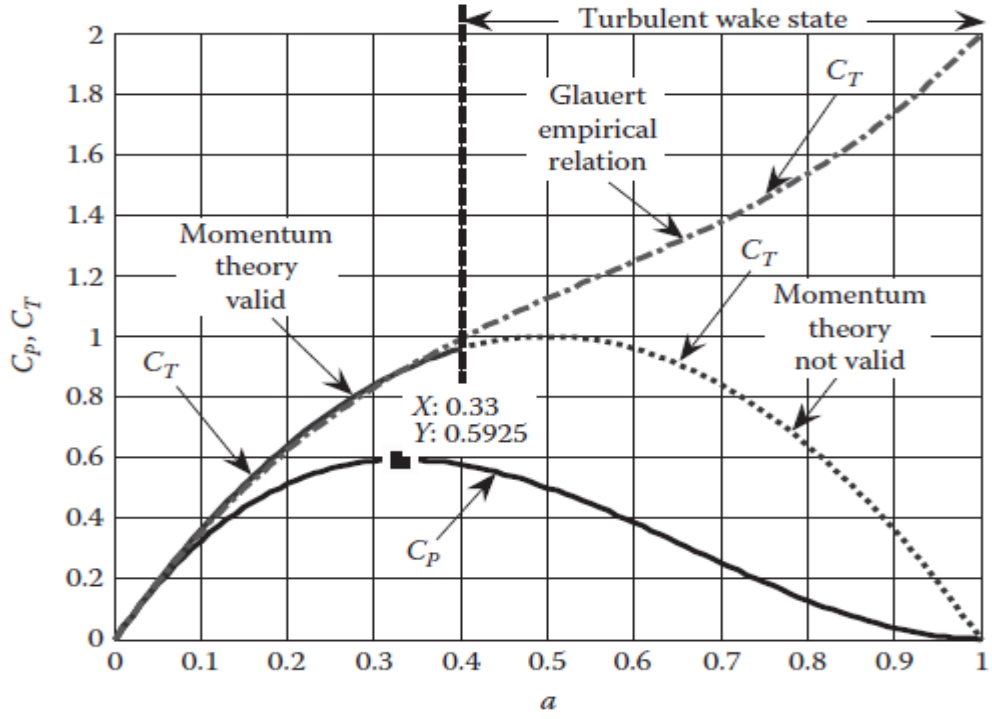
Son zamanlarda hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayalı viskoz hesaplamaları (CFD) rüzgâr türbini modellemelerine uygulanmış ve deney sonuçlarında tatmin edici sonuçlara ulaşılmıştır. Hesaplanan en iyi verim aralığı genellikle Betz limitiyle GGS modeli arasında olduğu gözlenmiştir [34].



Şekil 8.3: Betz ve GGS modelinin karşılaştırılması

## 8.2 Tahmini Enerji Üretimi için Geliştirilmiş Olan Diğer Teoriler

Rüzgâr türbini enerji üretim hesaplamaları için geliştirilmiş olan teoriler, türbinden elde edilecek tahmini güç ve verim verilerini belirlemede önem arz etmektedir. Geliştirilmiş olan ilk teorilerden birisi ideal disk teorisidir ve bu teoride koşulların ideal olduğu kabul edilmiştir. Teorinin temeli sonsuz sayıda ve sıfır kalınlıkta kanada sahip bir rotor bulunma esasına dayanmaktadır. Kanat elemanı momentum teorisi ise kanat elemanı ve ideal disk teorilerinin birleşimi şeklindedir. Kanat Elemanı Teorisi ile kanattaki eğrisel bölümün analiz ve incelemesi yapılabilir. Bu şekilde kanatların geometrik olarak şekli tanımlanabilir. Glauert ise akım borusu analiz incelemesinde, kanat elemanı teorisi ve tek boyutlu momentum teorisini kullanarak kendi modelini oluşturmuştur. Glauert çalışmalarında Betz çalışmasından farklı olarak, rotor arkasında meydana gelen girdaplı akımı da düşünerek hesaplamalar yapmıştır. Bu şekilde teoride en uygun kanat dizaynının da önemi artmıştır. Glauert'ın kuramına göre, hava akışının türbülanssız, homojen ve sürekli olduğu, rotorun arka kısmında silindirik bir iz ortaya çıktığı, kanadın her bir elemanı, bir sonraki kanat elemanından bağımsız hareket ettiği ve teoride iki boyutlu akış olduğu kabullerine dayanmakta ve bu doğrultuda analiz ve incelemeler yapılmıştır. Prandtl ise kanatlar için “Kaldırma Çizgisi Teorisini” öne sürmüştür. Bu teori vasıtasıyla yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin performans öngörülerinde yeni bir boyut meydana gelmiştir. Kaldırma Çizgisi teorisi, kanat üzerindeki meydana gelen kaldırma kuvveti dağılımının hesap edilmesi için geliştirilmiş bir yöntemdir. “Kaldırma yüzeyleri metodu” ise karmaşık kanat modelleri için yararlı bir hesaplama şeklidir. Farklı serbest rüzgâr süratleri için yapılan diğer bir çalışma ise “Girdap Teorisi” dir [36].



Şekil 8.4:  $C_T$  ve  $C_p$  değerlerinin 0 ile 1 arasındaki değişimi [37]





## 9. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN TERMODİNAMİK YÖNDEN İNCELENMESİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Birden fazla giriş çıkışı olan bir sistem boyunca daimi akıştaki hal değişimi için Termodinamiğin Birinci Yasası ve birim zamanda oluşan enerji dengesi dikkate alındığında bir rüzgâr türbinin genel enerji dengesi;

$$\sum_{in}(h + ke + pe)_{inmin} - \sum_{ex}(h + ke + pe)_{exmex} + \sum_r Q_r - W = 0 \quad (1)$$

Birden fazla giriş ve çıkışı olan bir kontrol hacminde sürekli akışta hal değişimi için birim zamandaki ekserji dengesi;

$$\sum_{in} ex_{inmin} - \sum_{ex} ex_{exmex} + \sum_r Ex^Q - Ex^W - I = 0 \quad (2)$$

Eşitlik 'de yer alan  $Q_r$ , sistem sınırında,  $r$  boyunca sisteme ısı transferi miktarını,  $W$  kontrol hacmi için birim zamandaki net işi yani sistemden dışarıya aktarılan işi (mil, jeneratör),  $m_{in}$  ve  $m_{ex}$ ; rüzgâr türbinine giriş ve çıkış yapan kütleli hava debisini  $Ex^Q$ ;  $Q_r$  ile ilgili olan ısı transferinden kaynaklı ekserjiyi,  $Ex^W$ ; rüzgâr türbininde üretilen işe ait ekserjiyi ( $W$  ile ilgili ekserjiyi),  $I$ ; ekserji kaybını (birim zamandaki tersinmezlik),  $m$  kütleli debi,  $h$  entalpi,  $ke$  ve  $pe$  birim kütle başına kinetik ve potansiyel enerji,  $g$  ve  $\chi$  alt indisleri giren ve çıkan ifadeleri olarak kullanılmaktadır.

Rüzgâr türbinlerinin ekserji analizi; termodinamiğin ikinci yasasına dayanan, enerjinin korunumu ve kütleli korunumunun birlikte kullanılması ile oluşturulan verim analizidir. Genel bir ifadeyle ekserji, çevresiyle etkileşimde olan bir sistemin, tanımlanmış olan ölü veya sıfır bir duruma göre üretebileceği maksimum işi ifade eden terimdir. Bir sistemin ölü halde olması demek çevresiyle termodinamik dengede olması anlamına gelmektedir. Enerjiden farklı olarak ekserji, ideal koşullar hariç korunumsuzdur. Gerçek bir çevrimde ekserji yok oluşu, ekserji tüketimi olabileceği gibi tersinmezlikler sebebiyle ekserji kayıpları da meydana gelmektedir. Bir ekserji analizi yapılmadan önce ilk olarak ölü durum şartları belirlenmelidir. Bu şartlar sistemin etkileşim halinde olduğu ortamın kimyasal bileşenleri, basınç ve sıcaklık

değerlerinin tam olarak tanımlanmasını göstermektedir. Tanımlanan durum ile çevresiyle denge haline gelen sistemin ekserjisi sıfır olur.

Birden fazla giriş ve çıkışı olan bir sistem ile  $P_0$  basıncı ve  $T_0$  sıcaklığındaki bir ısı enerji deposu gibi davranan çevresiyle arasında ısı geçişi meydana gelebilir. Bu kontrol hacminde sürekli akışlı hal değişimi için Termodinamiğin İkinci Yasası

$$\dot{S}_{üre} = \sum_g \dot{m}_g s_g - \sum_{\ç} \dot{m}_{\ç} s_{\ç} + \frac{\dot{Q}_{cev}}{T_0} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlikte yer alan  $\dot{S}_{üre}$ , bu hal değişimi için birim zamanda meydana gelen entropi üretimini,  $\sum_g \dot{m}_g s_g$  ve  $\sum_{\ç} \dot{m}_{\ç} s_{\ç}$  kütle, giriş ve çıkışıyla sisteme giren ve çıkan entropiyi,  $Q_{cev} = -Q$ , sistem sınırının sıcaklığı  $T_0$  olan, sistem sınırından çevreye birim zamandaki ısı geçişini gösterirken,  $Q_{cev}/T_0$  ise ısı geçişi nedeniyle birim zamanda entropi transferi olarak ifade edilmektedir.

Sistemde bir giriş ve bir çıkış olması halinde bu kontrol hacmi için birim kütle başına maksimum yararlanılabilir iş ifadesi;

$$w_{y,mak} = (h_g - h_{\ç}) - T_0(s_g - s_{\ç}) + ke + pe \quad (4)$$

olarak gösterilebilir.

$T$  sıcaklığında,  $P$  basıncında cinsinden kimyasal bileşimi  $m_j$ , kütlesi  $m$ , özgül entalpi  $h$ , özgül entropi  $s$ , ve  $j$  cinsinden kütle kesiri,  $x_j$ , olan bir madde akışı için özgül ekserji ifadesi;

$$ex = [ke + pe + (h - h_0) - T_0(s - s_0)] + [\sum_j (\mu_{j0} - \mu_{j00}) x_j] \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir

Burada  $T_0$ ,  $P_0$  ve  $U_{j00}$  referans ortamın yoğun özelliklerini taşır. Fiziksel bileşen (denklem ayırıcısındaki ilk terim) bir akışın çevresel duruma getirilmesiyle elde edilebilecek mümkün olan maksimum işi ifade eder. Kimyasal bileşen (ikinci kare parantez içindeki terim), çevre koşulundan ölü duruma getirildiğinde, akıştan elde edilen maksimum kullanılabilir işi ifade eder. Bir rüzgâr türbini için, kinetik enerji etkindir ve potansiyel enerji değişimi veya kimyasal bileşen yoktur.

Birim zamandaki tersinmezlik ise;

$$I = T_0 S_{gen} \quad (6)$$

$Ex^Q$ ; ısı transferi kaynaklı  $r$  yüzeyinden türbine transfer olan ekserji ifadesi;

$$Ex^Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad (7)$$

$Ex^W$ ; rüzgâr türbininden üretilen işe ait ( $W$ ) ekserji ifadesi;

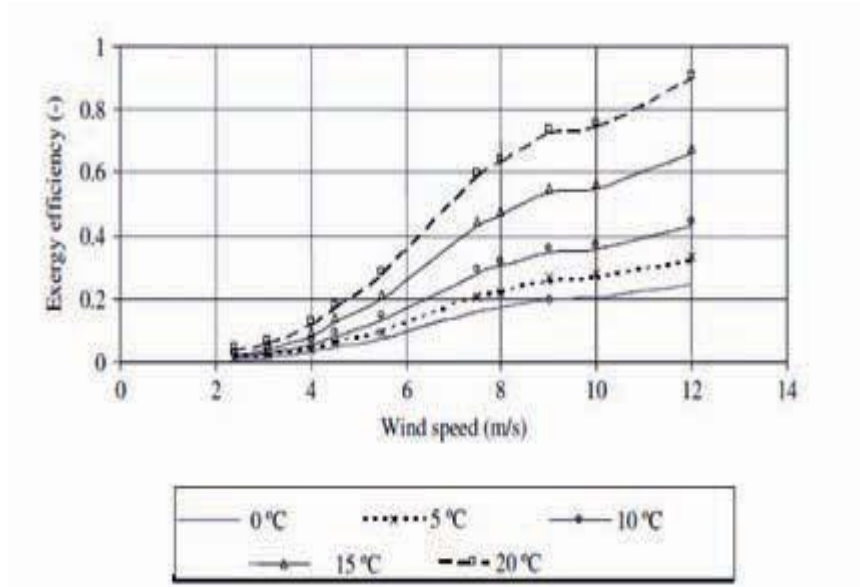
$$Ex^W = \dot{W} \quad (8)$$

Rüzgar enerjisinin ekserjisi, iş ekserji ifadesi ile tahmin edilebilir , çünkü ısı veya künyasal bileşenler yoktur [38].

Ekserji verimliliği ise;

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{products}}{Ex_{in}} \quad (9)$$

$Ex_{products}$ , sistemden elde edilen faydalı işe ait ekserjiyi,  $Ex_{in}$  ise sisteme giren toplam ekserjiyi belirtmektedir. Ekserji analizinde verime etki eden parametreler incelendiğinde giren kütleyle ilgili basınç, nem ve sıcaklık değerlerinin direkt olarak entalpi, yoğunluk, entropi gibi termodinamik özelliklere etkidiği görülmüştür. Bu sebepten, herhangi bir rüzgâr türbini veya rüzgâr enerji santralinin ekserji analiz incelemesi yapılırken, sistemin etkileşimde olduğu ortam şartlarının dikkate alınması gerekir [39].



**Şekil 9.1:** Değişik rüzgâr hızlarındaki sıcaklık değişiminin ekserji verimliliğine etkisinin incelenmesi [39]

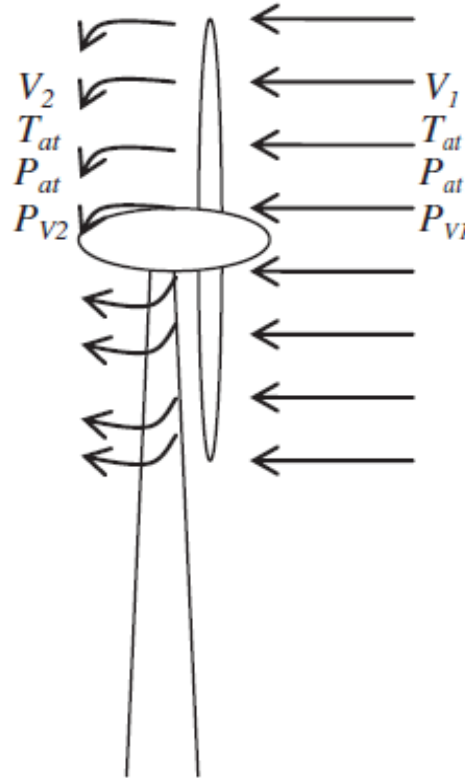
## 9.1 Enerji ve Ekserji Verimliliği

Ekserji verimlilikleri genellikle enerji verimliliklerinin bir fonksiyonu olarak yazılabilir. Bir rüzgâr enerjisi sisteminde elektrik üretimi için verimlilik iki önemli adımı içerir;

**İş milinin çalışmasından elektrik üretimi:** Bir rüzgâr enerjisi sisteminde iş milinin çalışmasından elde edilen elektrik üretim için verimlilik, hem üretilen elektrik enerjisinin şaft iş girişine oranına eşittir.

**Rüzgârın kinetik enerjisinden şaft iş üretimi:** Rüzgârla çalışan bir sistemin kinetik enerjisinden şaft iş üretimi için verimlilik, madde akışındaki  $m_s$ , kinetik enerji değişikliği  $\Delta ke$ , üretilen şaft çalışma oranına eşit olur.

Aşağıdaki şekilde sistemin giriş ve çıkış değişkenleri gösterilmektedir. Çıkış rüzgâr hızı süreklilik denklemi kullanılarak tahmin edilir. Toplam elektrik üretimi rüzgâr potansiyelindeki azalma ile ilgilidir. Toplam potansiyelden üretilen gücü çıkarmak, rüzgâr türbini arkasındaki rüzgâr potansiyelini verir.



**Şekil 9.2:** Rüzgâr türbini ve rüzgâr enerjisi girdi çıktı değişkenleri

$$V_2 = \sqrt[3]{\frac{2(E_{potential} - E_{generated})}{\rho A t}} \quad (1)$$

Buna ek olarak, toplam kinetik enerji farkı üretilen elektriği verir, bu da şu şekilde yazılabilir;

$$\Delta KE = E_{generated} \quad (2)$$

Zamanla hava kütlesi akışı rüzgâr hızı ve yoğunluğuna bağlıdır ve şu şekilde gösterilebilir;

$$\dot{m} = \rho A V \quad (3)$$

Madde akışının ekserjisi, hava akışının  $(T_2, P_2)$  durumundan  $(T_1, P_1)$  ortam durumuna geçtiğinde elde edilebilecek maksimum iş olarak tanımlanır. Durum 1 ve durum 2 den entalpi değişikliği  $\Delta H$ , aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\Delta H = \dot{m} C_p (T_2 - T_1) \quad (4)$$

$m$ , zamana bağlı olan havanın kütle akış oranıdır;  $T_1$ , rüzgâr türbini girişindeki rüzgâr soğutma sıcaklığıdır ve  $T_2$ , rüzgâr türbini çıkışındaki rüzgâr soğutma sıcaklığıdır. Sistemin toplam entropisi ve entropi farkı, havanın ideal gaz ve özgül ısının sabit olduğu varsayılarak şu şekilde yazılabilir;

$$\Delta S = \Delta S_{system} + \Delta S_{surround} \quad (5)$$

$$\Delta S = \dot{m} T_{at} \left( C_p \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) - \frac{Q_{loss}}{T_{at}} \right) \quad (6)$$

$$P_i = P_{at} \pm \frac{\rho}{2} V^2 \quad (7)$$

ve

$$Q_{LOSS} = \dot{m} C_p (T_{at} - T_{average}) \quad (8)$$

Burada  $\Delta S$  ifadesi entropi değişikliğidir,  $T_{at}$ , atmosferik sıcaklığı,  $P_2$ , bir  $V_2$  rüzgâr hızı için rüzgâr türbini çıkışındaki basıncı,  $P_1$  bir  $V_1$  rüzgâr hızı için rüzgâr türbini çıkışındaki basıncı,  $Q_{loss}$  rüzgâr türbininden ısı kaybını temsil eder ve  $T_{average}$ , rüzgâr girdi ve çıktı soğutma sıcaklıklarının ortalama değeridir. Böylece rüzgâr enerjisi için toplam ekserji ifadesi şu şekilde ifade edilebilir;

$$Ex = E_{generated} + \dot{m}C_p(T_2 - T_1) + \dot{m}T_{at} \left( C_p \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) - \frac{Q_{loss}}{T_{at}} \right) \quad (9)$$

Denklemin sağ tarafındaki ilk terim üretilen elektriği temsil etmektedir. İkinci ve üçüncü kısımlar sırasıyla entalpi ve entropi katkılarıdır [38].

## 10. TAHMİNİ YILLIK ENERJİ ÜRETİMİ HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

Rüzgâr türbinlerinde yıllık enerji üretim hesaplaması için iki farklı girdi değerine ihtiyaç vardır. Bu değerlerden ilki, rüzgâr türbini güç eğrisi verileridir. Güç eğrisi verileri, türbin kanat dizaynına, elektriksel ve mekanik kayıp değerlerine bağlıdır. Her rüzgâr türbini modeli farklı bir kanat profili ve bunun sonucunda da farklı güç eğrisi değerlerine sahiptir. Rüzgâr türbininin yıllık enerji üretim miktarını hesaplamak için ikinci veri olarak da, bölgeye ait rüzgâr verilerinin bilinmesi gerekmektedir. Aşağıdaki denklemde, yıllık enerji üretim değerlerinin genel hesaplama yöntemi gösterilmektedir.

$$E_{tot} = \int_{V_{min}}^{V_{max}} P_g \times f(v) \times 8760 \times dv$$

*E<sub>tot</sub>*: Yıllık üretilebilecek total enerji miktarını gösterir. (kW saat)

*P<sub>g</sub>*: Türbin güç eğrisi fonksiyonunu ifade eder. (kW)

*f(v)*: Rüzgâr sürati olasılık fonksiyonunu ifade eder.

*V<sub>max</sub>*: Rüzgâr türbininin hareketini durdurma (devreden çıkma) hızını belirtir. (m/s)

*V<sub>min</sub>*: Rüzgâr türbininin harekete geçme (devreye girme) hızını belirtir. (m/s)

Yukarıdaki denklemde de belirtildiği gibi, integral içindeki kısım, bölgedeki rüzgâr verilerine ait *f(v)* değerinin rüzgâr türbinine ait güç eğrisi değerlerinin (*P<sub>g</sub>*), birbiri ile çarpma işlemi uygulanarak bulunmaktadır. Bu hesaplama işleminde dikkat edilecek sınır değerleri, rüzgâr türbinine ait devreye girme verisi ve devreden çıkma verileridir. Rüzgâr hızı olasılık fonksiyonunun hesaplanması için günümüzde genel olarak iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki Weibull olasılık dağılımı, diğeri ise Rayleigh olasılık dağılım yöntemleridir [40].

## 10.1 Rüzgâr türbininin güç eğrisi

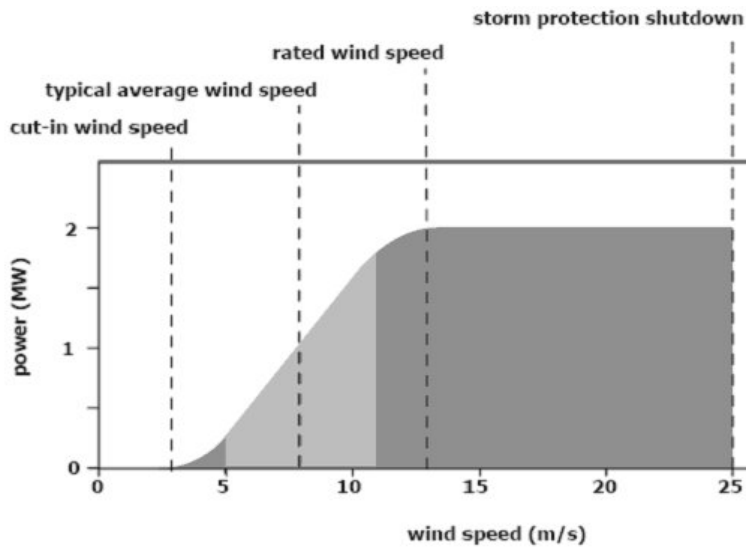
Bir türbinin güç eğrisi ortalama verileriyle üretebileceği güç değeri hesaplanabilir. Güç eğrisi, elde edilebilecek ortalama güç değerinin ortalama rüzgâr şiddetine bağlılığını ifade eder. Aşağıdaki güç eğrisinde de görüldüğü gibi 4 durum meydana gelir.

Birinci durum; Türbinin çalışmadığı düşük rüzgâr hızlarının aralığıdır. Kanatları döndürmek için rüzgârda yeterince enerji yok ve türbin dönmediğinden enerji üretmez ve hareketsiz kalır. Yani ortalama rüzgâr şiddeti, başlama (cut-in) hızından (türbinin devreye girme) düşükse elektrik üretimi gerçekleşmez.

İkinci durum; Bu, türbin  $C_p$  'sının rüzgâr hızına bağlı olarak değişeceği ara rüzgâr hızları aralığıdır. Ortalama rüzgâr şiddeti başlama (cut-in) hızından fazlaysa kanatlar dönmeye başlar ve istem elektrik üretir. Ancak türbinden elde edilebilecek en fazla elektrik için ihtiyaç duyulan hız, kontrol sistemi yardımıyla ayarlanmaya çalışılır.

Üçüncü durum; Türbinin nominal gücünde çalışacağı rüzgâr hızlarının aralığıdır. Ortalama rüzgâr şiddeti en fazla elektrik üretilecek değeri geçerse türbin sisteminde yer alan fren sistemi vasıtasıyla türbinin dönüş hızı en uygun hız değerine indirilir.

Dördüncü durum; Rüzgâr hız değeri, türbinin hesapladığı en yüksek (cut-off) hız değerini aştığı takdirde sistem kesinlikle kapatılması gerekmektedir ve aksi takdirde türbinde hasarlanmalar oluşabilir. Bu durumda enerji elde edilemez [41].



Şekil 10.1: Türbin güç eğrisi grafiği



## 10.2 Rüzgâr Hızı Dağılımı

### 10.2.1 Olasılık Yoğunluğu Fonksiyonu

Rüzgâr hızlarının oluşma sıklığı, rüzgâr hızının olasılık yoğunluk fonksiyonu  $p(U)$  ile tanımlanabilir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu,  $U_a$  ve  $U_b$  arasında oluşan bir rüzgâr hızının olasılığını ifade etmek için kullanılabilir.

$$p(U_a \leq U \leq U_b) = \int_{U_a}^{U_b} p(U) dU \quad (1)$$

Ayrıca, olasılık yoğunluk eğrisi altındaki toplam alan şu şekilde verilir;

$$\int_0^{\infty} P(U) dU = 1 \quad (2)$$

Eğer  $p(U)$  biliniyorsa, aşağıdaki parametreler hesaplanabilir;

Ortalama rüzgâr hızı,  $\bar{U}$

$$\bar{U} = \int_0^{\infty} U p(U) dU \quad (3)$$

Rüzgâr hızının standart sapması,  $\sigma_U$ ;

$$\sigma_U = \sqrt{\int_0^{\infty} (U - \bar{U})^2 p(U) dU} \quad (4)$$

Ortalama rüzgâr enerjisi yoğunluğu,  $\bar{P}/A$ ;

$$\bar{P}/A = (1/2)\rho \int_0^{\infty} U^3 p(U) dU = (1/2)\rho \bar{U}^3 \quad (5)$$

Burada  $\bar{U}^3$  rüzgâr hızının küpü için beklenen değerdir [33].

### 10.2.2 Kümülatif Dağılım Fonksiyonu

Kümülatif dağılım fonksiyonu,  $F(U)$ , rüzgâr hızının belirli bir rüzgâr hızına,  $U$ , eşit veya küçük olduğu, zaman fraksiyonunu veya olasılığını temsil eder.  $F(U) =$  Olasılık ( $U' \leq U$ ), burada  $U'$  göstermelik değişkendir. Aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$F(U) = \int_0^U P(U') dU' \quad (6)$$

Ayrıca kümülatif fonksiyonunun türevi, olasılık yoğunluk fonksiyonuna eşittir;

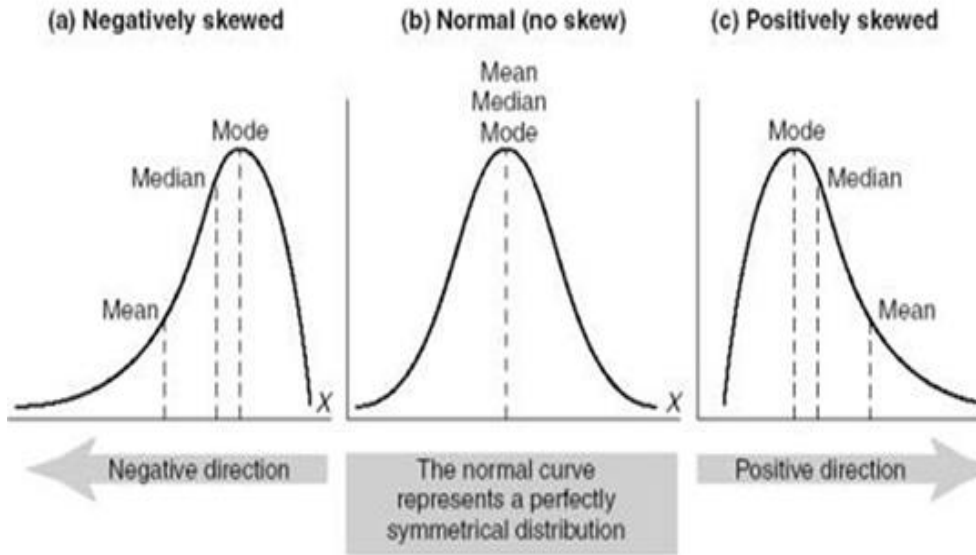
$$p(U) = \frac{dF(U)}{dU} \quad (7)$$

Hız süresi eğrisi, kümülatif dağılımla yakından ilişkilidir.

### 10.3 Sık Kullanılan Olasılık Dağılımları

Rüzgâr verisi analizinde yaygın olarak iki olasılık dağılımı kullanılır. Bunlar Rayleigh ve Weibull dağılımlarıdır. Rayleigh dağılımı bir parametre kullanır, o da ortalama rüzgâr hızıdır.

Weibull dağılımı iki parametreye dayanır ve bu nedenle daha çeşitli rüzgâr rejimlerinde daha iyi sonuç verir. Hem Rayleigh hem de Weibull dağılımlarına, yalnızca sıfırdan büyük değerler için tanımlandıklarından bunlara çarpık dağılım denir [26].



Şekil 10.2: Normal dağılım ve çarpık dağılım

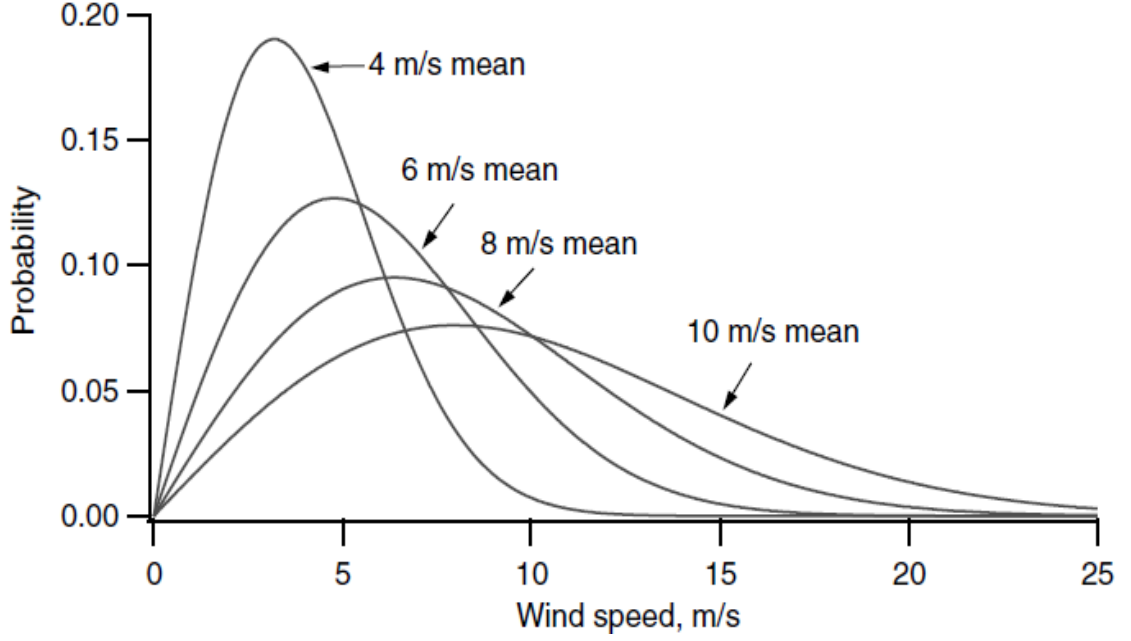
#### 10.3.1 Rayleigh Olasılık Dağılımı

Sadece ortalama rüzgâr hızı,  $\bar{U}$ , bilgisi gerekli olduğundan, rüzgâr kaynağını temsil eden en basit hız olasılığı dağılımıdır. Olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılımı şu şekilde verilir;

$$p(U) = \frac{\pi}{2} \left( \frac{U}{\bar{U}} \right) \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2\right] \quad (2)$$

Farklı ortalama rüzgâr hızları için bir Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonunu göstermektedir. Ortalama rüzgâr hızlarından daha büyük bir değer daha yüksek rüzgâr hızları olasılığını verir [26].



Şekil 10.3: Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu örneği

### 10.3.2 Weibull Olasılık Dağılımı

Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanımı iki parametre bilgisi gerektirir;  $k$  şekil faktörü ve  $c$  ölçek faktörleridir. Bu parametrelerin her biri,  $U$  ve  $\sigma_u$  fonksiyonlarının parametreleridir.

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

$P(U)$ : Rüzgâr Hızı Olasılık Yoğunluğu Fonksiyonu ve Rüzgâr Şiddeti Frekansı

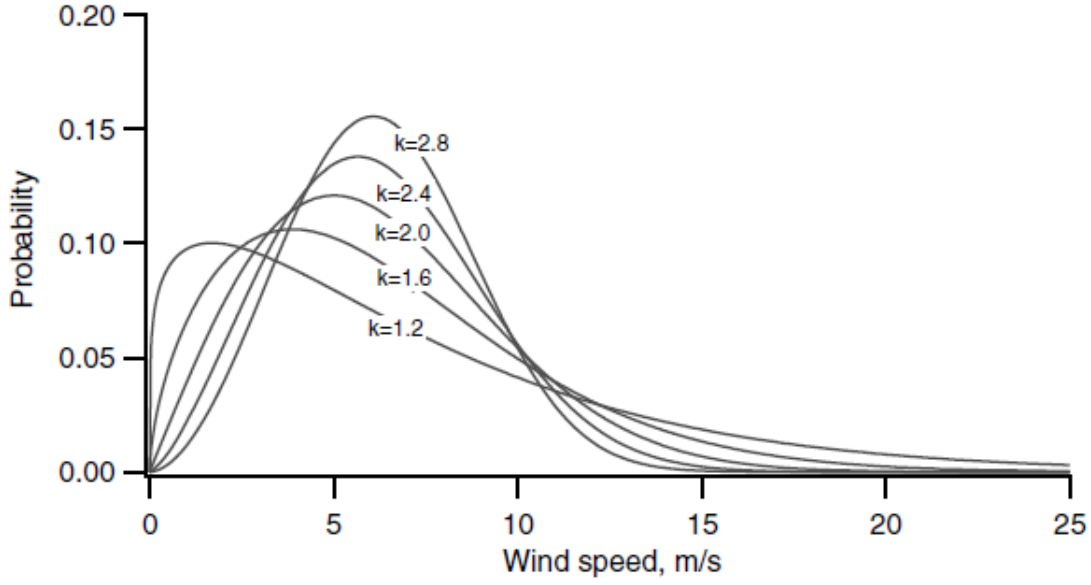
$c$ : Ölçek Parametresi (Rüzgâr Hızı İçin Bağlı Kümülatif Frekans)

$k$ : Şekil Parametresi (Rüzgâr Hızı Dağılım Şeklini Gösteren Parametre)

$U$ : Rüzgâr Şiddeti(m/s)

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

Bir Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu örnekleri,  $k$ ' nın çeşitli değerleri için aşağıda verilmiştir.  $k$  şekil parametresi, rüzgarın sıklığını gösteren bir ifadedir. Bir bölgede rüzgâr hız değerinde değişiklik çok olmuyorsa, yani rüzgâr yaklaşık olarak sabit bir hızla esiyor ise ( düşük veya yüksek olabilir)  $k$  parametresi büyüktür.  $k$  değeri arttıkça, eğri daha keskin bir tepe noktasına sahiptir ve bu da rüzgar hızı değişiminin daha az olduğunu gösterir [26-42].



**Şekil 10.4:**  $U = 6 \text{ m/s}$  için Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunun örneği

$U$  ve  $\sigma_u$ ' dan  $k$  ve  $c$ ' yi belirleme yöntemleri aşağıda gösterilmiştir. Weibull dağılımı için denklem 1 kullanılarak, ortalama hız aşağıdaki gibi belirlenebilir;

$$\bar{U} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3)$$

Burada  $\Gamma(x)$ = gama fonksiyonu  $= \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$

$$\Gamma(x) = (\sqrt{2\pi x})(X^{x-1})(e^{-x})\left(1 + \frac{1}{12x} + \frac{1}{288x^2} - \frac{139}{51840x^3} + \dots\right) \quad (4)$$

Weibull dağılımı;

$$\sigma_u^2 = \bar{U}^2 \left[ \frac{\Gamma(1+2/K)}{\Gamma^2(1+2/k)} - 1 \right] \quad (5)$$

$\bar{U}$  ve  $\sigma_u$  terimlerinden  $k$  ve  $c$  elde etmek basit bir süreç değildir. Bununla birlikte kullanılabilir bir kaç tane yaklaşım vardır.

$1 < k < 10$ ,  $k$  için iyi bir yaklaşımdır;

$$k = \left( \frac{\sigma_U}{\bar{U}} \right)^{-1.086} \quad (6)$$

Denklem 3, daha sonra  $c$  parametresini çözmek için kullanılabilir;

$$c = \frac{\bar{U}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (7)$$

Bu metot hala gama fonksiyonunun kullanımını gerektirir.

$k$ ' yı bulmak için denklem 6 kullanılır. Daha sonra aşağıdaki yaklaşımdan  $c$  bulunur;

$$\frac{c}{\bar{U}} = (0.568 + 0.433/k)^{-\frac{1}{k}} \quad (8)$$

Bu yöntem kullanılarak,  $\log - \log$  kâğıdının  $y$  ekseninde  $\log F(U)$  ve  $x$  ekseninde düz bir çizgi, rüzgâr hızı grafiği boyunca çizilir. Düz çizginin eğimi  $k$  ifadesini verir.

$k=1$  iken bölge çoğu gün rüzgârsız geçmektedir.

$k=2$  iken birçok bölgeden hesaplanan tipik rüzgâr dağılımıdır.

$k=3$  iken eşit oranda yüksek veya düşük rüzgâr hızına sahip olduğunu gösterir. Şekil normal çan eğrisine benzer.

$k$  ifadesi 1' e eşit iken Weibull olasılık dağılımı üstel bir fonksiyon olup, güvenilirlik analizinde sıklıkla tercih edilir.  $k$  ifadesi 3 değerinden büyük ise daha çok çan eğrisi veya gauss dağılımına yaklaşırlar.  $k$  ifadesi 2' ye eşit iken Rayleigh dağılımına yaklaşırlar [33-42].

$c$  (ölçek parametresi), bağıl kümülatif rüzgar hızı frekansını ifade etmektedir. Başka bir ifadeyle,  $c$  parametresi ortalama rüzgâr hızına bağlı olarak değişiklik gösterir. Ortalama rüzgâr hızı yüksek ise  $c$  parametre değeri de yüksek olacaktır [26-43].

Weibull dağılımını kullanarak,  $c$  ve  $k$  değerlerinin bilinmekte olduğunu varsayarsak, rüzgâr hızının küpünün beklenen değeri,  $U^3$ , aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$\overline{U^3} = \int_0^{\infty} U^3 p(U) d(U) = c^3 \Gamma(1 + 3/k) \quad (9)$$

Enerji modeli faktörü,  $K_e$  (rüzgârdaki mevcut toplam güç miktarı, ortalama rüzgâr hızının küpünden hesaplanan güç ile bölünür), aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$K_e = \frac{\overline{U^3}}{(\overline{U})^3} = \frac{\Gamma(1+3/k)}{\Gamma^3(1+1/k)} \quad (10)$$

#### 10.4 Aşırı Rüzgâr Hızları (Gumbell Olasılık Dağılımı)

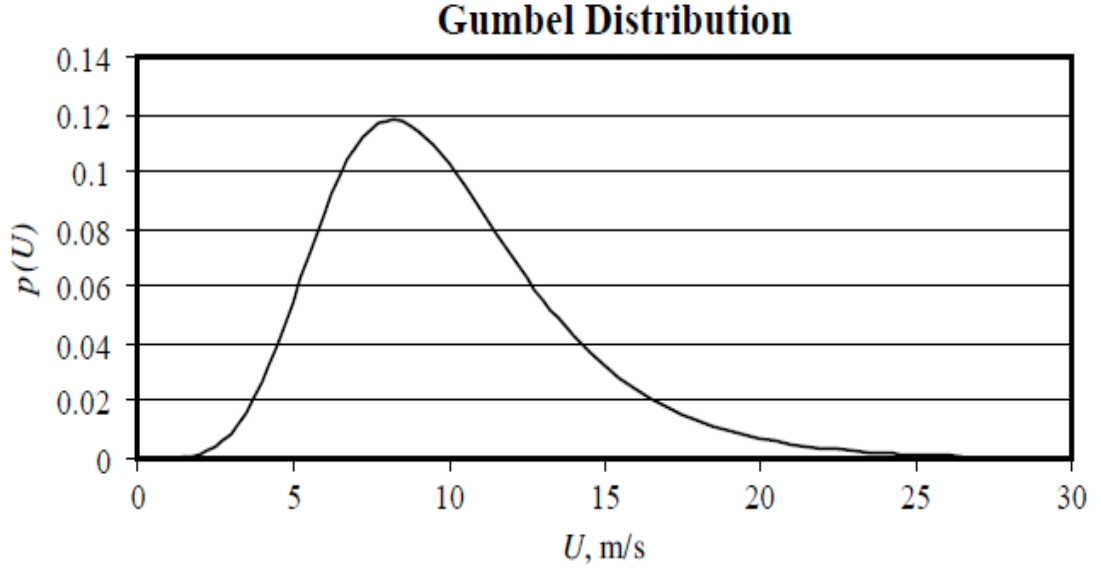
Olası bir rüzgâr türbini alanının değerlendirilmesinde birincil meteorolojik faktör, ortalama rüzgâr hızıdır. Bir diğer önemli husus, beklenen aşırı rüzgâr hızıdır. Aşırı rüzgâr hızları, tasarım sürecinde özel bir endişe kaynağıdır. Çünkü türbin olması muhtemel ancak nadir koşullara karşı dayanıklıdır.

Aşırı rüzgâr hızları genellikle tekrarlama veya geri dönüş periyotları ile tanımlanır. Özellikle, aşırı bir rüzgâr, uygun zaman aralığı boyunca ortalaması alınmış, en uygun rüzgâr hızı değeridir. Aşırı rüzgâr hızlarının gerçek ölçümlerle belirlenmesi zordur, çünkü uzun bir süre boyunca ölçümler gerektirecektir. Bununla birlikte, aşırı rüzgâr hızlarını belirli bir zaman aralığında uygun bir istatistiksel model ile birlikte kullanarak tahmin etmek mümkündür. Aşırı rüzgâr hızlarını tahmin etmek için en yaygın istatistiksel model Gumbel dağılımıdır. Gumbel dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonu aşağıda gösterilmiştir.

$$p(U_e) = \frac{1}{\beta} \exp\left(\frac{-(U_e - \mu)}{\beta}\right) \exp\left(-\exp\left(\frac{-(U_e - \mu)}{\beta}\right)\right) \quad (1)$$

Burada  $U_e$  henüz tanımlanmamış bir zaman periyodu boyunca ki aşırı rüzgâr miktarını ifade etmektedir,  $\beta = (\sigma_e \sqrt{6})/\pi$ ,  $\mu = U_e - 0.577\beta$ ,  $U_e$ , uç(aşırı) değerler kümesi ortalaması ve  $\sigma_e$ , o kümenin standart sapmasıdır.

$$F(U_e) = \exp\left(-\exp\left(\frac{-(U_e - \mu)}{\beta}\right)\right) \quad (2)$$



**Şekil 10.5:** Gumbel Dağılım Gösterimi

Ortalama 10 m/s hızların da ve standart sapması 4 m/s olan bir Gumbel olasılık yoğunluk fonksiyonu yukarıdaki grafikte gösterilmiştir [33].

### 10.5 Weibull ve Rayleigh Dağılımlarının Karşılaştırılması

Model Enerji ve Pars Makina mühendislerinin yazdığı ve geliştirmekte olduğu Visual Basic lisansında yazılmış olan kodun, Weibull ve Rayleigh olasılık dağılım fonksiyonlarını kullanarak hesaplanan yıllık enerji üretim değerleri aşağıda görülmektedir. Bu hesaplamalarda kullanılan bölgedeki rüzgâr hızı verileri:

Bölgenin ortalama hız değeri: 7,963 m/s

k parametre değeri: 2,244

A parametre değeri: 8,993

Havanın yoğunluğu: 1,225 m/sn<sup>2</sup>

Aşağıdaki çizelgede model enerjiye ait ME82/1,65 modeli türbininin hem Weibull olasılık dağılım fonksiyonu hem de Rayleigh olasılık dağılım fonksiyonları kullanılarak bölgede üreteceği tahmini yıllık enerji üretim değerleri aşağıda görülmektedir [41].



M.Torres Desarrollos Energéticos S.L. / M.Torres TWT 1.65-82 / 1,65 MW wind turbine generators / Parque Eólico Experimental La Caya & La Fraila, Olite, Navarra, Spain

**Şekil 10.6:** M.Torres TWT 1.65-82 Türbini [44]

Türbin özellikleri aşağıdaki verilmiştir.

Rotor Çapı: 82 m

Taranan Alan: 5365 m<sup>2</sup>

Kanat Sayısı: 3

Maksimum Rotor Hızı: 18 U/dak

Uç Hız: 77,3 m/s

Nominal Güç: 1650 Kw

Devreye Girme Rüzgâr Hızı: 3 m/s

Nominal Rüzgâr Hızı: 15 m/s

Devreden Çıkma Rüzgâr Hızı: 25 m/s (34)

**Çizelge 10.1:** Weibull ve Rayleigh fonksiyonlarına göre tahmini yıllık enerji üretimi

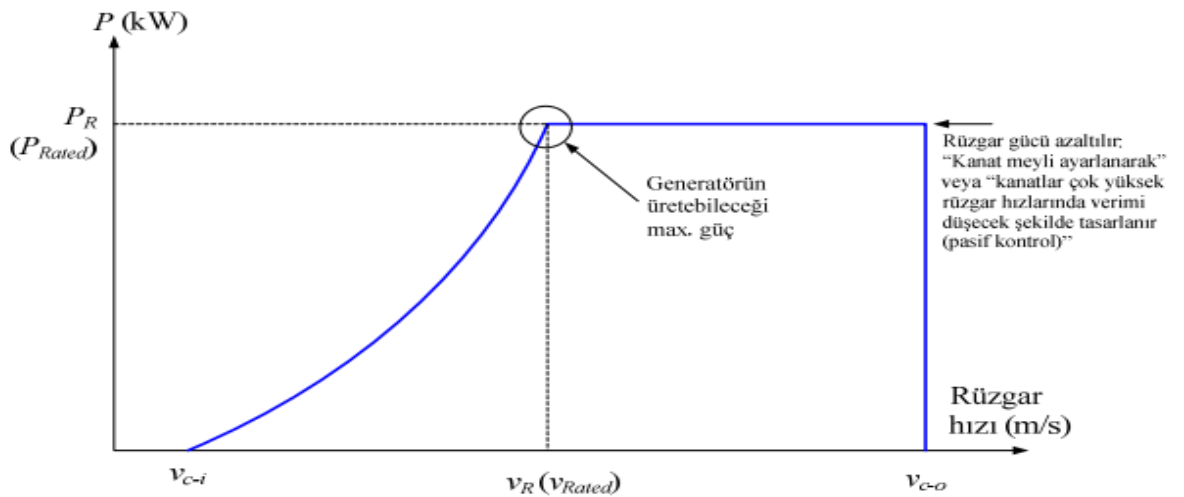
Dağılım	YEÜ (kWsaat)
Weibull	7.059.157,598
Rayleigh	7.072.512,471



Weibull ve Rayleigh olasılık dağılımları kullanılarak tahmini yıllık üretilebilecek enerji hesaplama verileri yukarıdaki çizelgede görülmektedir. Çizelgede dikkat edilmesi gereken bazı durumlar vardır. İlk önce bölgenin basınç, nem ve sıcaklık değerleri göz önünde bulundurularak yoğunluk hesaplamaları yapılmalıdır. Rüzgâr türbini üreticileri güç eğrisi değerlerini belirtirken, yoğunluk değeri olarak deniz seviyesindeki, yani  $1.225m/s^2$  değeri ile hesaplama yapmaktadır. Ancak, yoğunluk azaldıkça bu güç değerlerinde azalmalar meydana gelecektir. Rüzgâr türbinlerinde diğer kayıplardan bazıları ise şöyledir; şebekeye iletim esnasında meydana gelen kayıplar, aşırı soğuma veya sıcaklık yükselmesi bağlı kayıplar, bakım sürecinde meydana gelebilecek kayıpları ve türbinin devreden çıkma kayıplarıdır. Sonuç itibariyle; günümüzde yıllık enerji üretim hesaplamaları yapılırken Weibull olasılık dağılım fonksiyonları tercih edilmektedir. Çünkü Weibull dağılımında bölgedeki rüzgârın sıklık değerleri dikkate alınmıştır. Ancak Rayleigh dağılımında ise fonksiyon sadece ortalama hız değerleri göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur[40].

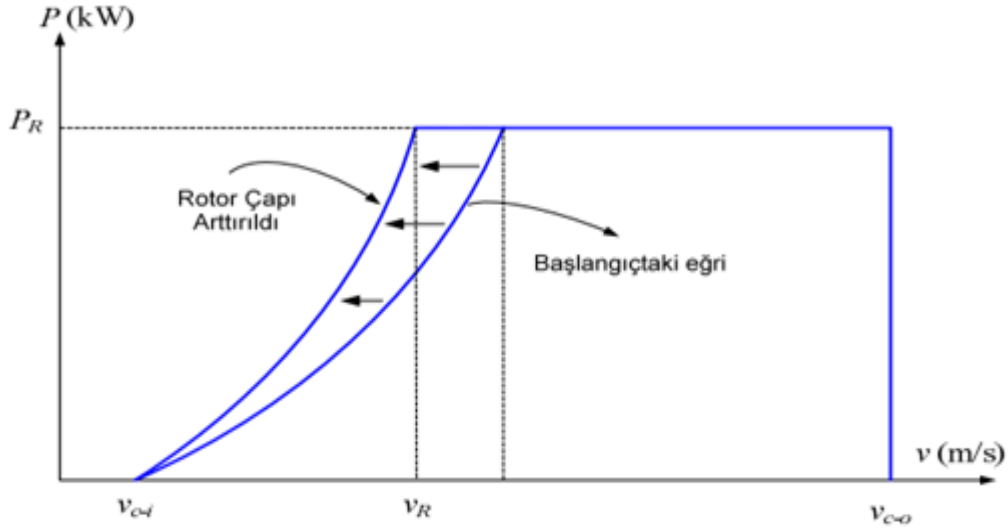
## 10.6 Rotor Alanının ve Üreteç Nominal Gücünün Optimizasyonu

İdealize edilmiş güç eğrisi vasıtasıyla bir rüzgâr türbini için en önemli teknik bilgiler sağlanır. Bu güç eğrisi jeneratör, rüzgâr hızı ve türbin elektriksel çıkışı arasındaki ilişkinin nasıl olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 10.7: İdeal Güç Eğrisi

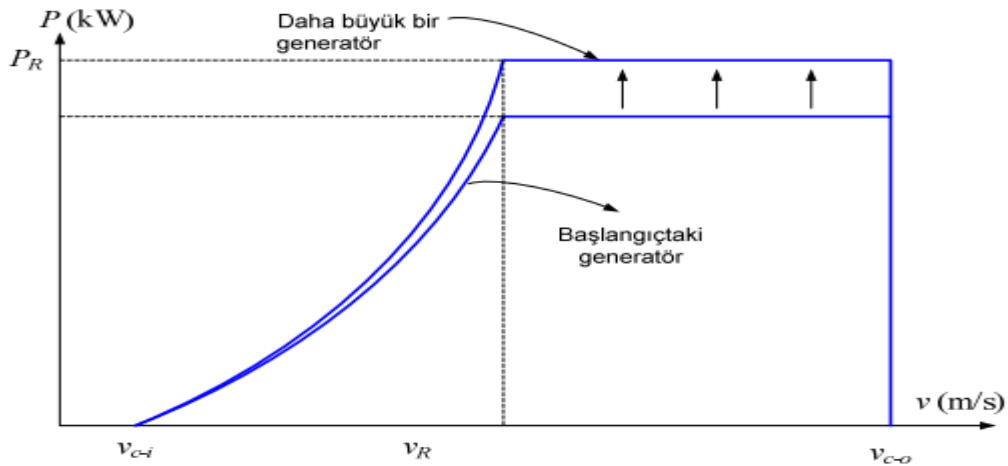
Verilmiş olan bu ideal güç eğrisi, jeneratör ve rotor çapı boyutunun birbirleri ile alan değişimleri karşısında, rüzgâr türbininden elde edilebilecek uygun bir enerji seviyesi konusunda bilgilendirir. Jeneratör boyutu aynı kalmak kaydıyla rotor çapı arttırılırsa güç eğrisi yukarı doğru kayma gösterir. Bu şekilde nominal güç değerine daha düşük rüzgâr hızlarında ulaşılmış olunur.



**Şekil 10.8:** Rotor çapı arttırıldığında güç eğrisindeki meydana gelen değişim

Görüldüğü gibi bu dizayn değişimi düşük rüzgâr hızlarında nominal gücü artırır. Bu şekilde türbin daha düşük rüzgar hızlarında nominal güce ulaşabilir.

2) Rotor çapı aynı kalmak kaydıyla jeneratör büyüklüğü arttırılırsa güç eğrisi yeni bir nominal güç seviyesi oluşturacak şekilde yukarıya doğru genişleme yapacaktır.



**Şekil 10.9:** Jeneratör kapasitesi arttırıldığında güç eğrisinde meydana gelen değişim

Rüzgâr hız değerleri az olduğunda çok küçük değişiklikler meydana gelirken rüzgâr hızı değeri fazla olduğunda büyük değişiklikler meydana gelir. Bu sebepten, bu yöntem yüksek rüzgâra sahip bölgelerde tercih edilebilir [44].

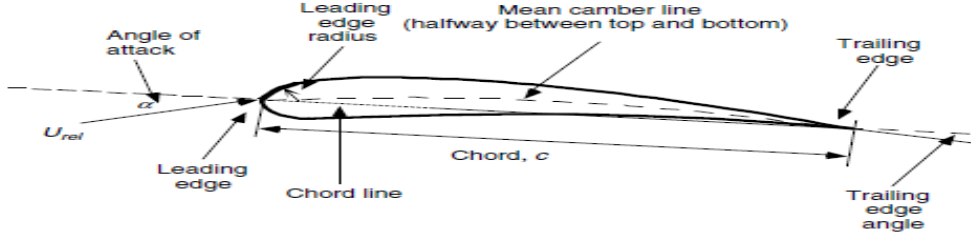


## 11. KANAT TASARIMININ AERODİNAMİK ESASLARI

Kanat profilleri, kanadın bağıl hareketi ve onu çevreleyen bir akış vasıtasıyla en uygun taşıma ve sürüklenme oranını vermek için tasarlanmış, mekanik güç üreten, özel geometrik şekilli yapılardır. Rüzgâr türbini kanat tasarımı yapılırken, dikkat edilecek iki önemli ölçüt aerodinamik ve kuvvettir.

### 11.1 Kanat Terminolojisi

Kanat profilini karakterize etmek için bir kaç terim kullanılmaktadır. Kamburluk (kamber veya eğiklik) hattı, profilin üst ve alt yüzeyleri arasında, tam orta kısmında noktaları birleştiren yerdir. Kanadın kambur olan üst bölgesinde akışkanın kat etmesi gereken mesafe, alt bölgesinden daha fazladır. Bu sebepten üst bölgesinde akışkan daha hızlı hareket eder. Bernoulli prensibine göre havanın hızı artmasıyla bağlantılı olarak statik basıncı azalır. Bir cismin birbirine zıt iki yüzeyinde farklı hız değerlerinde hareket eden hava, basınç farkı meydana getirerek aerodinamik bir kuvvet oluşturur. Ortalama kamber çizgisinin ileri ve geri noktası sırasıyla hücum kenarı ve firar kenarı bulunmaktadır. Ön ve arka kenarları birleştiren düz çizgi, kanadın veter hattıdır (kord çizgisi). Bu çizgi, kanat profilinde hücum ve firar kenarlarından geçen doğrudur. Hücum kenarı (en küçük yarıçap noktası) ve firar kenarı arasındaki uzaklığa ise veter uzunluğu olarak tanımlanır. Kanat profiline göre veter hattının bir bölümü kanat üzerinde yer almayabilir. Hücum açısı,  $\alpha$ , aerodinamikte akış çizgileri (bağıl rüzgâr  $U_{rel}$ ) ile kanat profilinin veter çizgisi arasında yer alan açıdır. Profil etrafında akışkanın hızı ve yönü değişme göstereceğinden, uzakta bir noktadaki hız vektörü kullanılır. Taşıma kuvveti, hücum açısının büyüklüğü ile yakından ilişkilidir [26].

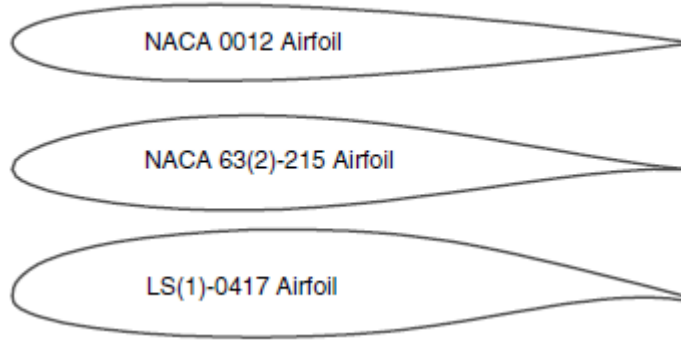


**Şekil 11.1:** Kanat terminolojisi gösterimi

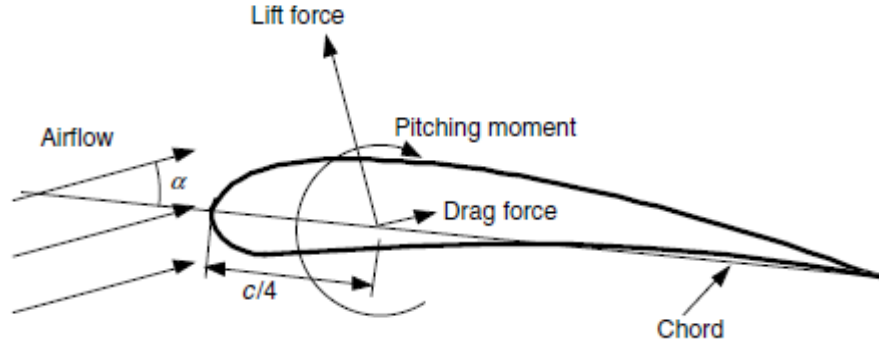
Bir kanat profilinin aerodinamik performansı üzerinde etkiye sahip geometrik parametreler; hücum kenarı açısı, kamber (eğiklik) hattı, maksimum kalınlık, profilin kalınlık dağılımı ve firar kenarıdır.

## 11.2 Kaldırma Kuvveti, Sürüklenme Kuvveti ve Boyutsuz Parametreler

Bir kanat profili üzerindeki hava akışı, kanat profili üzerinde kuvvet dağılımını oluşturur. Kanatçıklar üzerindeki akış hızı, konveks yüzey boyunca artmakta ve kanadın içbükey veya basınç tarafıyla karşılaştırıldığında kanadın emme tarafında daha düşük ortalama basınç elde edilir. Bu arada, kanat profil yüzeyi ile hava arasındaki viskoz sürtünme, hava akışını yüzey üzerinde bir dereceye kadar yavaşlatır.



**Şekil 11.2:** Kanat profil örnekleri



**Şekil 11.3:** Bir kanat kesiti üzerindeki kuvvetler ve momentler;  $c$ , kord;  $\alpha$ , hücum açısı. Pozitif kuvvetlerin ve momentlerin yönü, ok yönü ile gösterilir.

Sürtünme ve basınç kuvvetlerinin tamamı genellikle iki kuvvete ve hücum açısından  $c/4$  uzaklıkta verter hattı (kord) boyunca hareket eden bir momente dönüştürülür.

**Kaldırma kuvveti;** Kanadın kaldırma kuvveti, kanada akış yönüne dik olarak etkiyen kuvvete denir. Örnek olarak uçakların havalanması kanadın kaldırma kuvveti ile meydana gelmektedir. Maksimum kaldırma kuvveti kanat akış yönüne paralel konumlandırıldığında oluşur. İdeal bir kanat tasarımında kaldırma kuvvetinin yüksek olması istenir. Kaldırma kuvveti, kanat profilinin üst ve alt yüzeyleri üzerindeki eşit olmayan basıncın bir sonucudur.

**Sürüklenme kuvveti;** Kanada akış yönünde paralel olarak etkiyen kuvvettir. İdeal bir kanatta sürüklenme kuvvetinin minimum olması istenir. Bunun içinde kanat dizaynı yapılırken yağmur damlasını andıran şekiller kullanılmaktadır. Sürüklenme kuvveti, kanat profili üzerindeki viskoz sürtünme kuvvetleri ve kanat yüzeylerine doğru gelen eşit olmayan basınca bağlıdır.

Yunuslama momenti (pitching moment); taşıma ve sürüklenme düzlemi içerisinde etkiyen moment bileşenine denir.

Teori ve araştırmalar göstermektedir ki, birçok akış problemleri boyutsuz parametreler vasıtasıyla karakterize edilmiştir. Akışkan akış koşullarının karakteristiklerini tanımlayan en önemli boyutsuz parametre Reynolds sayısıdır ve  $Re$  ile tanımlanır;

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{\text{Inertial force}}{\text{Viscous force}}$$

Burada  $\rho$ , akışkan yoğunluğu,  $\mu$  akışkan viskozite,  $\nu = \mu / \rho$ , kinematik viskozite,  $U$  ve  $L$  akışın ölçөгünü karakterize eden bir hız ve uzunluktur. Bunlar, gelen akış hızı  $U_{rüzgar}$  ve kanat profili üzerindeki kord uzunluğu olabilir. Örneğin;  $U_{rüzgar}$  65 m/s,  $\nu$  değeri 0,000013 m<sup>2</sup>/s ve kord uzunluğu 2 m ise Reynold sayısı 10 milyondur.

Reynold sayısının fonksiyonları olan ek boyutsal olmayan kuvvet ve moment katsayıları, rüzgâr tüneli testlerine dayalı olarak iki veya üç boyutlu cisimler için tanımlanabilir. Üç boyutlu kanat profillerinin sınırlı bir yayılımı vardır ve moment katsayıları, kanat profil sonunun etrafındaki akıştan etkilenir. Öte yandan, iki boyutlu kanat profili verilerinin sonsuz bir aralık olduğu varsayılmıştır (son etkileri yoktur). İki boyutlu veriler, test bölümündeki kanat profil sonunda gerçekten hava akışı olmayacak şekilde gibi ölçülür. İki boyutlu cisimlerin etrafındaki akış için kuvvet ve moment katsayıları genellikle, iki boyutlu sürüklenme katsayısı için  $C_d$ ' de olduğu gibi küçük harfli bir alt simge ile gösterilir. Bu durumda ölçülen kuvvetler birim aralıktaki kuvvetlerdir. Üç boyutlu nesnelerin etrafındaki akış için ölçülen kaldırma ve sürüklenme katsayıları genellikle,  $C_D$ ' deki gibi büyük harfli bir simge ile gösterilir. Rotor tasarımı genellikle rüzgâr tüneli testlerinde bir dizi hücum açısı ve Reynold sayısı için belirlenen, iki boyutlu katsayılar kullanır. İki boyutlu kaldırma katsayısı şu şekilde tanımlanır;

$$C_l = \frac{L/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\text{Lift force/unit length}}{\text{Dynamic force/unit length}} \quad (1)$$

İki boyutlu sürüklenme katsayısı şu şekilde tanımlanır;

$$C_d = \frac{D/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\text{Drag force/unit length}}{\text{Dynamic force/unit length}} \quad (2)$$

ve yunuslama moment katsayısı;

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 A c} = \frac{\text{Pitching moment}}{\text{Dynamic moment}} \quad (3)$$

Burada  $\rho$ , hava yoğunluğu,  $U$  bozulmamış hava akışının hızı,  $A$ , öngörülen kanat alanı (kord  $x$  mesafe),  $c$ , kanat profili kord uzunluğu ve  $l$ , kanat genişliğidir. Rüzgâr türbinlerinin analizi ve tasarımı için önem taşıyan diğer boyutsuz katsayılar arasında güç ve itki katsayıları ve uç hız oranı, basınç katsayısı bulunmaktadır [26].



$$C_P = \frac{p-p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{\text{Static pressure}}{\text{Dynamic pressure}} \quad (4)$$

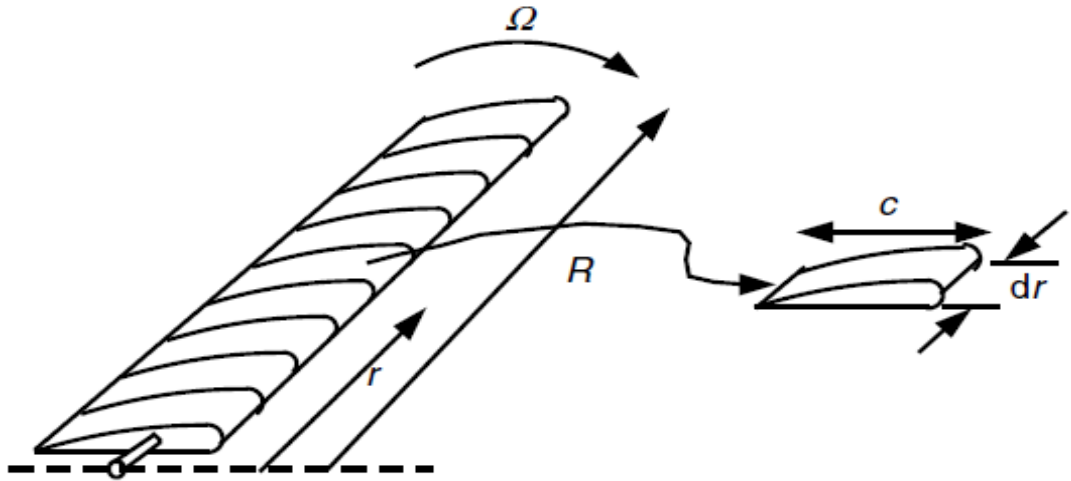
Kanatçık akışını analiz etmek için kullanılan yüzey pürüzlülük oranı;

$$\frac{\varepsilon}{L} = \frac{\text{Surface roughness height}}{\text{Body length}} \quad (5)$$

### 11.3 Kanat Elemanı Teorisi

Bir rüzgâr türbini kanatları üzerindeki kuvvetler, kaldırma, sürüklenme katsayıları ve hücum açısının bir fonksiyonudur. Teori, kanat profiline bağlı olarak kanada etki eden aerodinamik kuvvetleri göstermektedir. Bu analiz için aşağıdaki şekilde, kanadın N bölüme (veya elemanlara) bölünmüş olduğu varsayılmıştır. Buna ilaveten aşağıdaki kabuller yapılmıştır;

- Elemanlar veya bölümler arasında herhangi bir aerodinamik etkileşim bulunmamaktadır ve bu sebepten radyal akış yoktur.
- Kanatlar üzerindeki kuvvetler, yalnızca, kanat profil şeklinin kaldırma ve sürüklenme özelliklerine göre belirlenir.



Şekil 11.4: Kanat elemanlarının şematik yapısı;

c, kanat profil kord uzunluğu;

dr, elemanın radyal uzunluğu;

r, yarıçap;

R, rotor çapı;

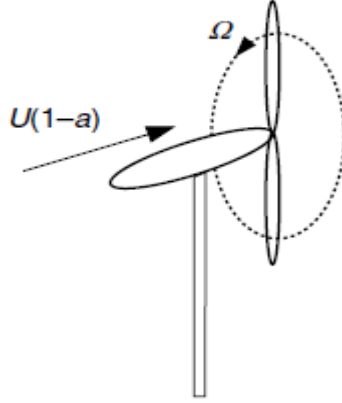
$\Omega$ , rotor açısal hızı

Kanat bölümündeki kuvvetleri analiz ederken, etkili ve bağıl rüzgâr için kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin sırasıyla dik ve paralel olduğu dikkat çekmektedir. Bağıl rüzgâr, rotordaki rüzgâr hızının vektörel toplamı,  $U(1-a)$  ve kanatların dönüşüyle meydana gelen rüzgâr hızıdır. Bir kanat  $r$  kesitinde, akışkanın dönme nedeniyle sağladığı hız, rotorun dönmesiyle elde edilen hız,  $\Omega r$  ve açısal momentumu korumak için kanatlardaki indüklenen hız,  $\omega r/2$ , bileşkesi olacaktır. Elde edilen ekstra açısal hız,  $\omega$ , değeri momentum korunumu prensibinin kanatlara uygulanması ile elde edilebilir;

$$\Omega r + (\omega/2)r = \Omega r + \Omega a' r = \Omega r(1 + a') \quad (1)$$

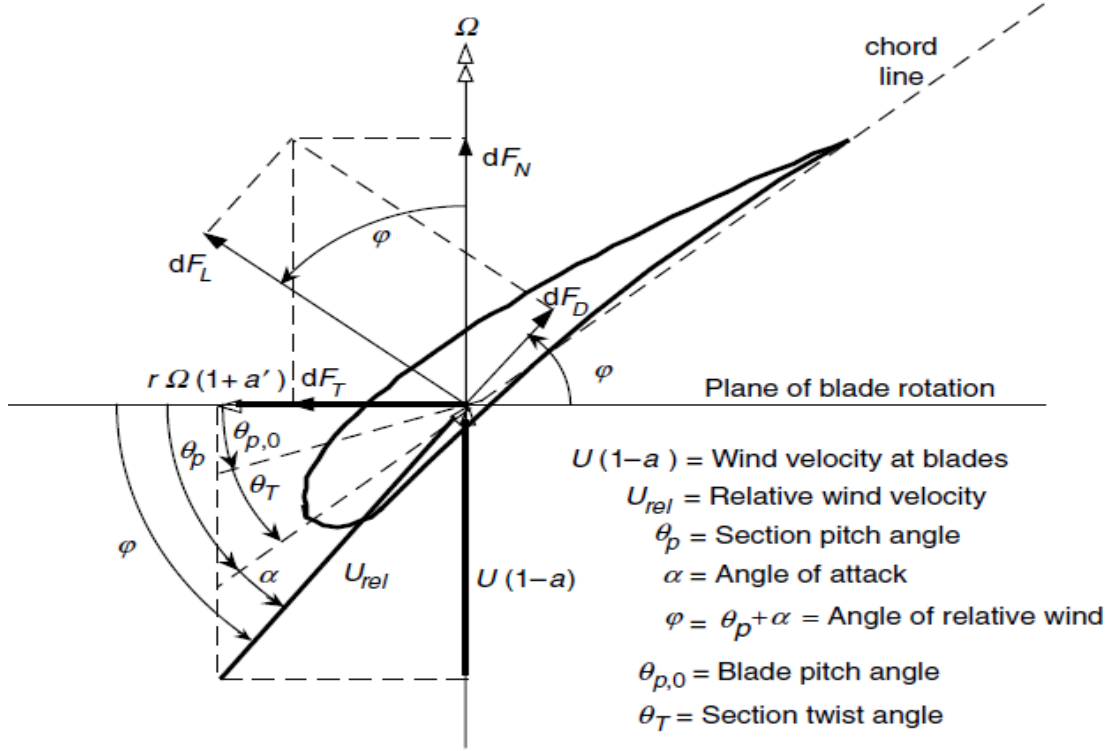
Toplam akış durumu aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Kanat bükülme açısı  $\theta_T$ , kanat ucuna göre tanımlanmıştır. Böylece;

$$\theta_T = \theta_p - \theta_{p,0} \quad (2)$$



**Şekil 11.5:** Bir rüzgâr yönünde yatay eksenli rüzgâr türbini için genel geometri;  $a$ , aksenal indüksiyon faktörü;  $U$ , bozulmamış akışın hızı;  $\Omega$ , rotorun açısal hızı

Serbest akış ortamında dönen bir kanat profili ve bu kanat profiline etki eden kuvvetler ve geometrik ifadeler aşağıdaki şekilde görülmektedir.



**Şekil 11.6:** Yatay eksenli rüzgâr türbininin analizi için kanat geometrisi

Burada;

$\theta_p$ , kanat kesit pitch açısı (kanadın dönme düzlemiyle kanat genişliği çizgisi (kord çizgisi) arasında kalan açı);

$\theta_{p,0}$ , kanat ucundaki pitch açısı;

$\theta_T$ , kanat büküm açısı;

$\alpha$ , hücum açısı (bağlı rüzgâr ve kord çizgisi arasındaki açı);

$\varphi = \theta_p + \alpha$ , bağlı rüzgâr hızı açısı;

$dF_L$ , artımlı kaldırma kuvveti;

$F_D$ , artımlı sürüklenme kuvveti;

$dF_N$ , dönme düzlemine etkiyen normal artımlı kuvvet (itkiye katkıda bulunur)

$dF_T$ , kanada etki eden torku oluşturan teğetsel kuvvet

$U(1-a)$ , kanattaki rüzgâr hızı

$U_{rel}$ , bağlı rüzgâr hızı

Bağlı rüzgâr açısı, hücum açısı ve kanat kesit pitch açısının toplamıdır;

$$\varphi = \theta_p + \alpha \quad (3)$$

Yukarıdaki kanat geometrisinden elde edilebilecek ifadeler;

$$\tan \varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r} \quad (4)$$

$$U_{rel} = U (1 - a) / \sin \varphi \quad (5)$$

Kanada etki eden kaldırma, sürüklenme ve teğetsel kuvvetler aşağıdaki gibidir;

$$dF_L = C_l \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (6)$$

$$dF_D = C_d \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (7)$$

$$dF_N = dF_L \cos \varphi + dF_D \sin \varphi \quad (8)$$

$$dF_T = dF_L \sin \varphi - dF_D \cos \varphi \quad (9)$$

denklemleri ile gösterilir. Bu kuvvetlerden normal kuvvet kanada etkiyen itki kuvvetini meydana getirir. Teğetsel kuvvet ise kanada etkiyen torku üretir.

Eğer rotor B adet kanada sahipse, merkezden, bir r mesafedeki kesite etkiyen normal kuvvet;

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) c dr \quad (10)$$

Merkezden r mesafesi uzaklıkta etki eden, teğetsel kuvvetten elde edilen diferansiyel tork;

$$dQ = BrdF_T \quad (11)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) c r dr \quad (12)$$

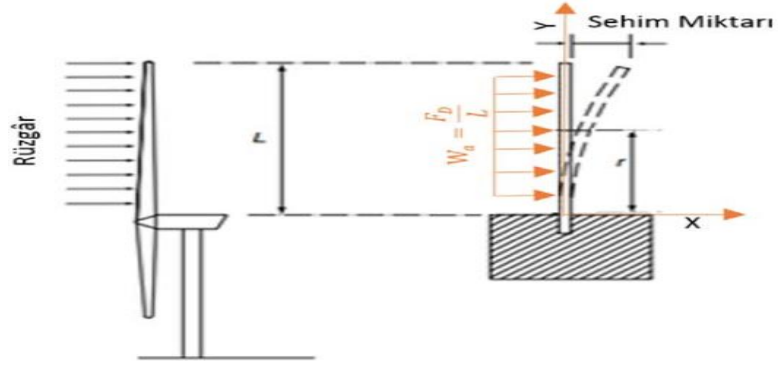
Denklemden de anlaşıldığı gibi kanada etkiyen sürüklenme etkisinin torku ve dolayısıyla buna bağlı olarak da güç değerini azaltır, fakat buna karşın kanada etkiyen normal kuvvet veya itme yükünü arttırır.

Kanat eleman teorisinden, kanat profil karakteristikleri ve kanatlardaki akış açılarının bir fonksiyonu olarak dairesel rotor kesitinde, normal kuvvet (itki kuvveti) ve teğetsel kuvvet olmak üzere iki denklem elde edilir [26].

## 11.4 Kanatta Zorlanmalara Bağlı Meydana Gelen Gerilmeler

### 11.4.1 Aerodinamik yüklenmelere bağlı meydana gelen eğilme

Rüzgâr türbini bıçakları, türbinin ön tarafından etki eden aerodinamik yükler sebebiyle türbin bıçaklarında eğilme momenti oluşur. Bıçağın eğilme durumunun incelenmesi için bıçak bir ankastre kiriş olarak düşünülebilir. Bıçağın aerodinamik yükler sebebiyle meydana gelen eğilme durumunu belirten yapısal model aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



**Şekil 11.7:** Aerodinamik yükler sebebiyle rüzgâr türbini bıçağında meydana gelen eğilme

Bıçaklar, sürüklenme kuvvetinin ( $F_D$ ) etkisiyle eğilmeye zorlanmaktadır. Etki eden bu kuvvet bıçağın tüm yüzeyi boyunca eşit oranda etkiyeceği için yayılı yük olarak düşünülmektedir ( $W_a = F_D/L$ ). Bıçağın herhangi bir noktasındaki ( $r$ ) eğilme momenti hesaplaması;

$$M_B = \frac{-1}{2} W_a (L - r)^2$$

denklemleri ifade edilmektedir.

Bıçak kesitinde elastik eğilme gerilmesinin hesaplanması aşağıdaki formülasyonu ile yapılmaktadır;

$$\sigma_e = \frac{M_B y}{I_{xx}} = \frac{E y}{\rho}$$

İfadedeki E elastisite modülünü, y tarafsız eksene uzaklığı,  $\rho$  eğrilik yarıçapı, I atalet momentini belirtmektedir.

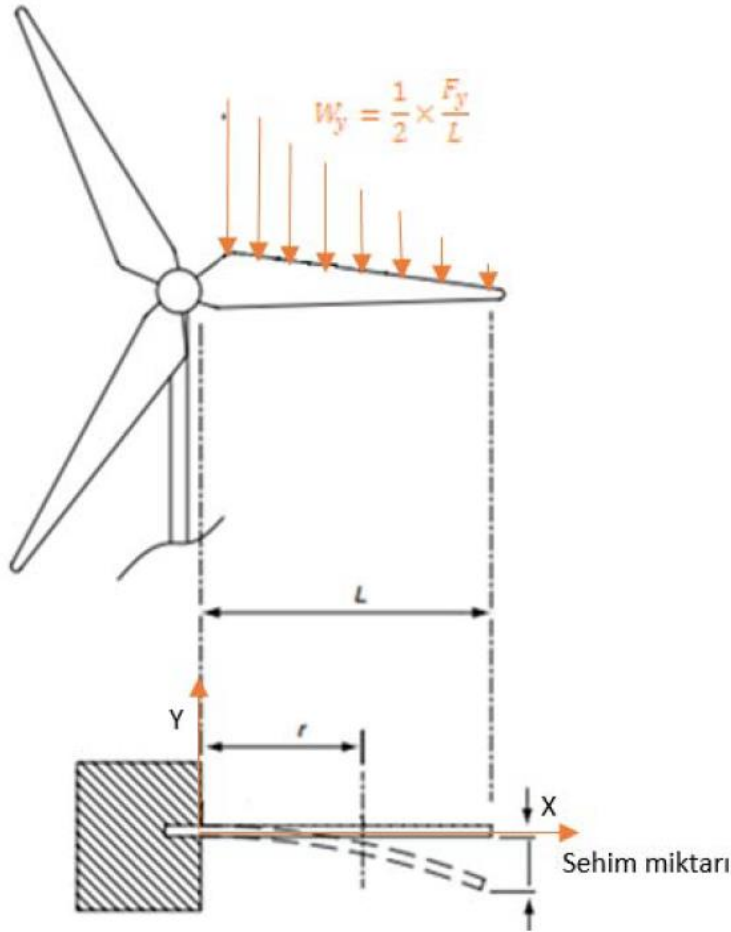
x eksenine göre kesit atalet moment ifadesi;

$$I_{xx} = \iint (y - y_1)^2 d_x d_y$$

şeklindedir.  $y_1$  belirli bir bölgenin ağırlık merkezini,  $(y - y_1)$  ağırlık merkezinden olan uzaklığı belirtir [36].

#### 11.4.2 Yerçekimi Yüklenmelerine Bağlı Meydana Gelen Eğilme

Rüzgar türbini bıçakları, bıçağın kendi ağırlığına bağlı olarak yerçekimi kuvvet yüklenmeleri sebebiyle de eğilmeye zorlanır. Eğilme durumunun incelenmesi için bıçak bir ankastre kiriş biçiminde kabul edilmiş olup eğilme durumu için yapısal model aşağıdaki gibidir.



Şekil 11.8: Yerçekimi yükleri sebebiyle bıçağın eğilme durumu

Bıçağın ağırlığı, bıçak bağlantı noktasından bıçağın uç kısmına doğru azaldığından, bıçak ağırlığı üçgen şeklinde uç kısma doğru azalan yayılı yük olarak belirlenmiş ve bıçağın kendi ağırlığı sebebiyle meydana gelen eğilme momenti ifadesi;

$$M_B = \frac{-1}{2} W_y (L - r)^2$$

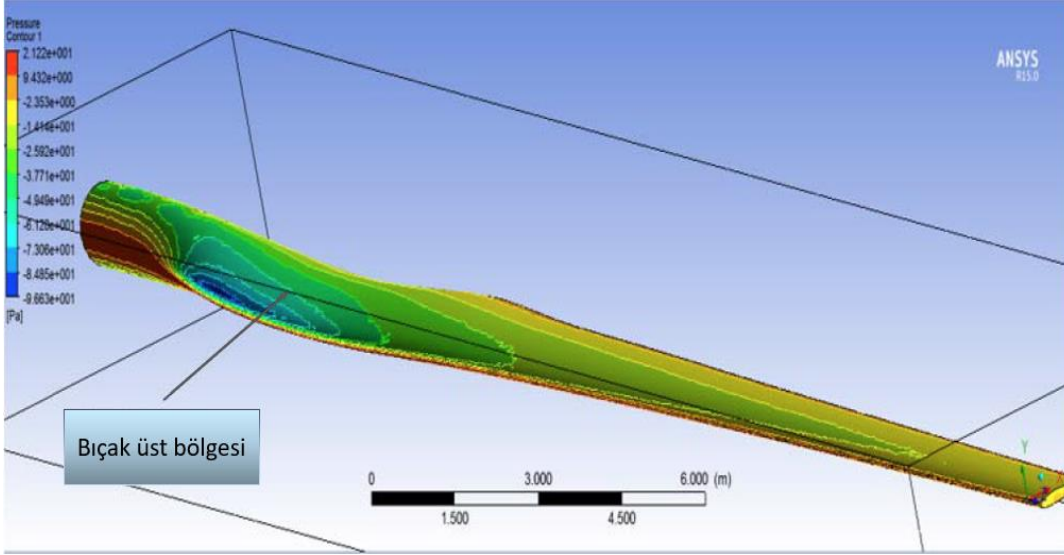
şeklinde gösterilir. Bıçağın kesitindeki elastik eğilme gerilmesi ifadesi ve atalet momenti gibi hesaplamalarda yukarıdaki formüllerden yararlanılmaktadır.

Bıçaklara sadece statik yükler etki etmez. Yani bıçaklar kullanım ömürleri boyunca sürekli yüklere de maruz kaldıkları için malzeme yorulması olayı ortaya çıkar. Bıçaklarda yorulmaya sebep olan yükler yerçekimi kaynaklı yüklerdir. Büyük boyutlu kanatlara etkileyen yerçekimi kuvvetleri küçük boyutlara göre daha fazladır. Bu sebepten bıçakların mekanik dizaynında yorulma analiz incelemeleri yapılmalıdır[45].

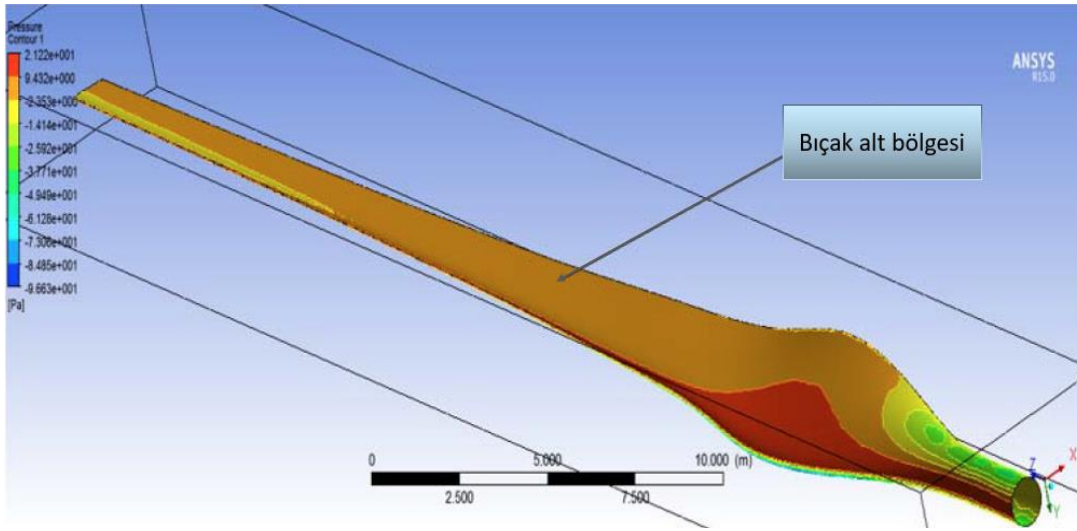
### **11.5 Ansys Destekli Kanat Mekanik Analizi**

Analizde akış ortamındaki akışkan olarak rüzgâr hızı, akış ortamında bulunan bıçağın profilini sabitlemek için bıçağın bağlantı yeri duvar olarak belirlenir. Hava hacminin alt, üst ve sol yüzey bölgeleri seçilerek akış analizi için sınır şartları tanımlanmış olunur.

Bıçağa 5 m/s' lik akışkan hızında etki eden basınçlar aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Bıçağın alt bölgesinde pozitif basınç, üst bölgesinde ise negatif basınçlar meydana gelmektedir ve bu durum neticesinde bıçaklarda kaldırma kuvveti oluşmaktadır.



**Şekil 11.9:** 5 m/s' lik akışkan hızında bıçak üst bölgesinde meydana gelen basınç dağılımı



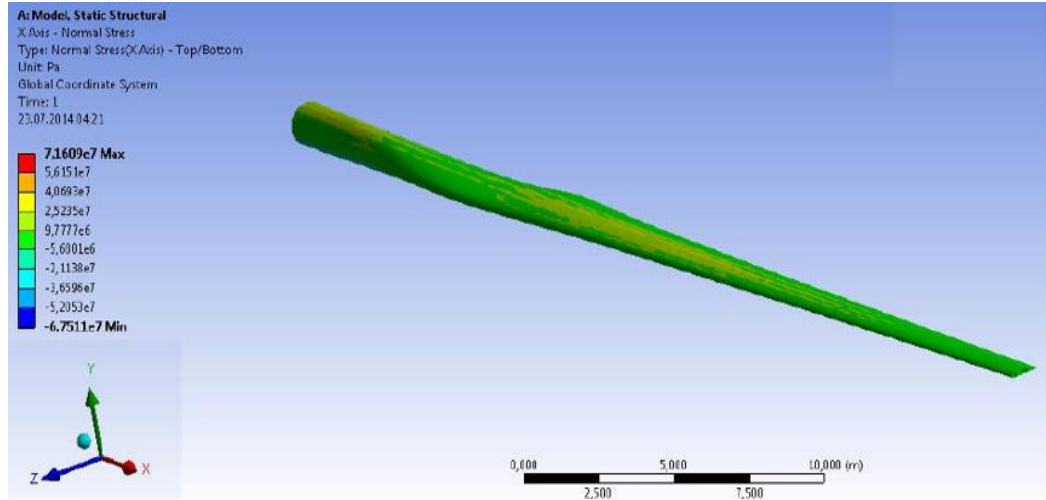
**Şekil 11.10:** 5 m/s' lik akışkan hızında bıçak alt bölgesinde meydana gelen basınç dağılımı

Bıçağın üst bölgesinde basınç değerinin 96,63 Pa değerine kadar çıktığı, alt bölgesindeki basıncın ise 21,22 Pa olduğu teorik olarak gözükmemektedir. Elde edilen basınç verileri sonucunda bıçağın aerodinamik olarak hareketinin bıçağın geometrik tasarımıyla doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür.

Türbinin mekanik davranış incelemesinde, bıçakların maruz kaldığı yükler sebebiyle kayma gerilmeleri ve normal gerilmeler meydana gelmekte, bu gerilmeler sınır değerini aştığı zaman hasarlanmalar oluşmaktadır. Aşağıdaki rüzgâr olmayan ortam

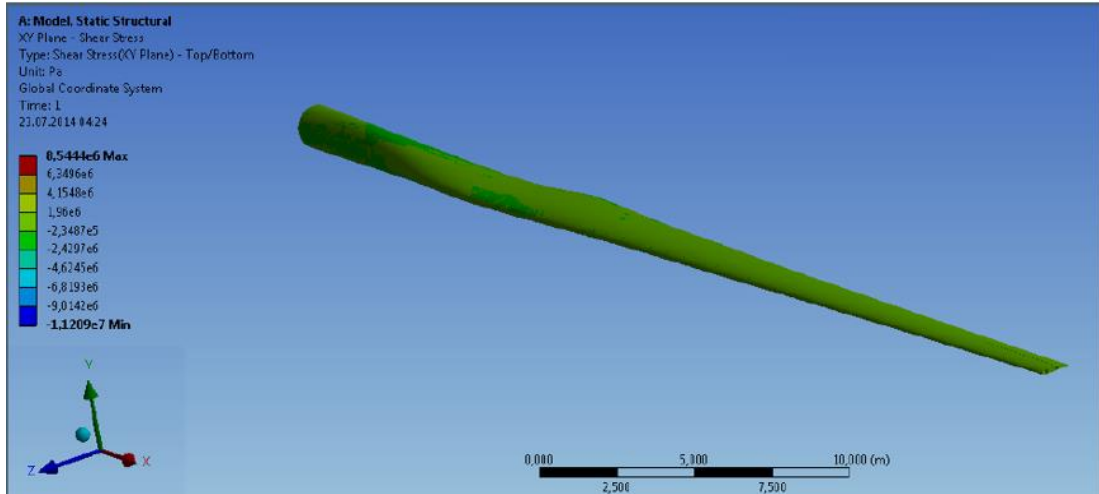


analizinde, bıçaklara herhangi bir aerodinamik kuvvetin etkilediği sadece bıçaklara yerçekimi yüklenmeleri sebebiyle oluşan gerilmeler gözükmektedir.



**Şekil 11.11:** Hava akışsız (rüzgâr olmayan) ortamda meydana gelen normal gerilmeler

Teorik olarak gerilme değerinin 71,6 Mpa ile -67,5 Mpa arasında değişim gösterdiği görülmüştür. Ancak bıçaklarda farklı rüzgâr hızlarında meydana gelecek gerilmeler daha farklı olacaktır. Aşağıdaki şekilde bıçaklarda meydana gelen kayma gerilmeleri gözlenmektedir.



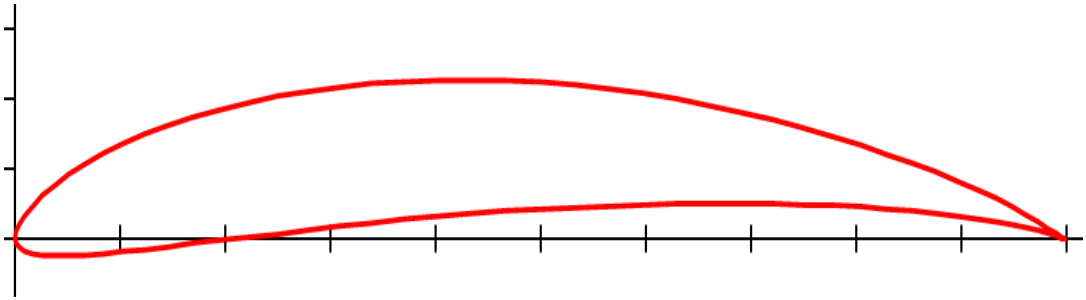
**Şekil 11.12:** Hava akışsız (rüzgâr olmayan) ortamda meydana gelen kayma gerilmeleri

Hava akışsız ortamda meydana gelen kayma gerilmelerinin 8,54 Mpa ve 1,12 Mpa arasında değiştiği görülmektedir [45].

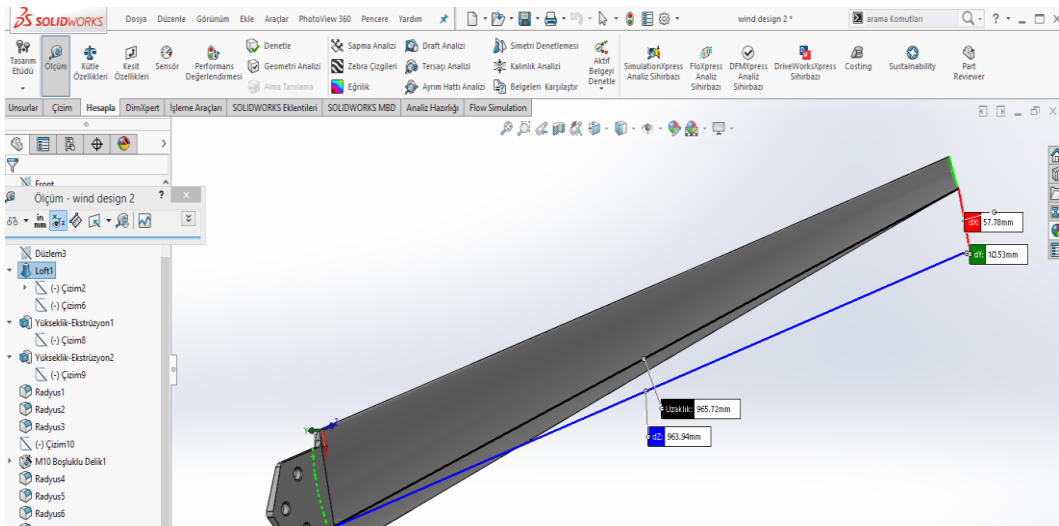


## 12. RÜZGAR TÜRBİNİ BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMI

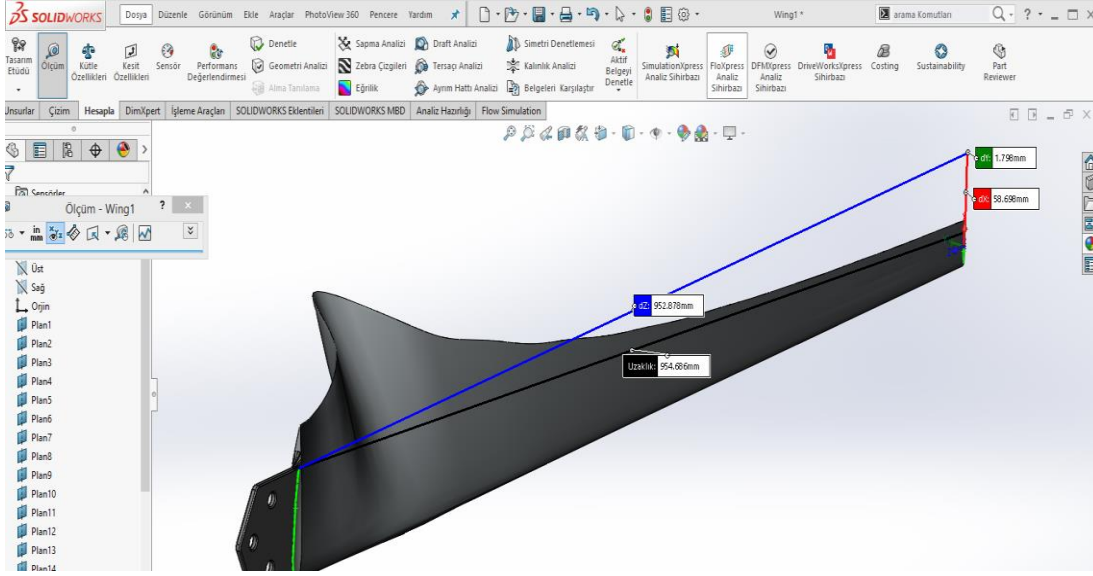
UIUC Havacılık ve Uzay Mühendisliği Departmanı verilerine göre AH79-100 C kanat modeli dizayn edilmiştir. Dizayn aşamasında kanat dizaynının damla profili çıkarılmış ve onun üzerinden Solidworks yazılımı vasıtasıyla katı model elde edilmiştir. Oluşturulan katı modellemede kanat boyunun prototip boyutlarda olmasına dikkat edilmiştir. Diğer kanat tasarımı ise tamamen kendi belirlediğim bir kanat profilidir.



Şekil 12.1: Kanat damla modeli



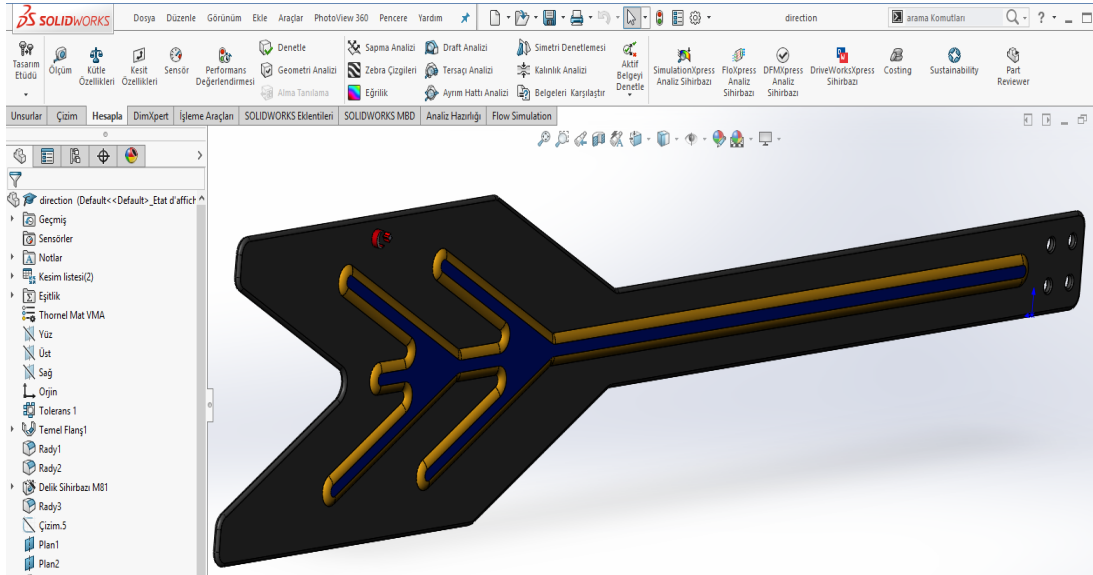
Şekil 12.2: AH79-100 C kanat katı modeli



Şekil 12.3: Kanat katı modeli 2

## 12.1 Kuyruk Modellemesi

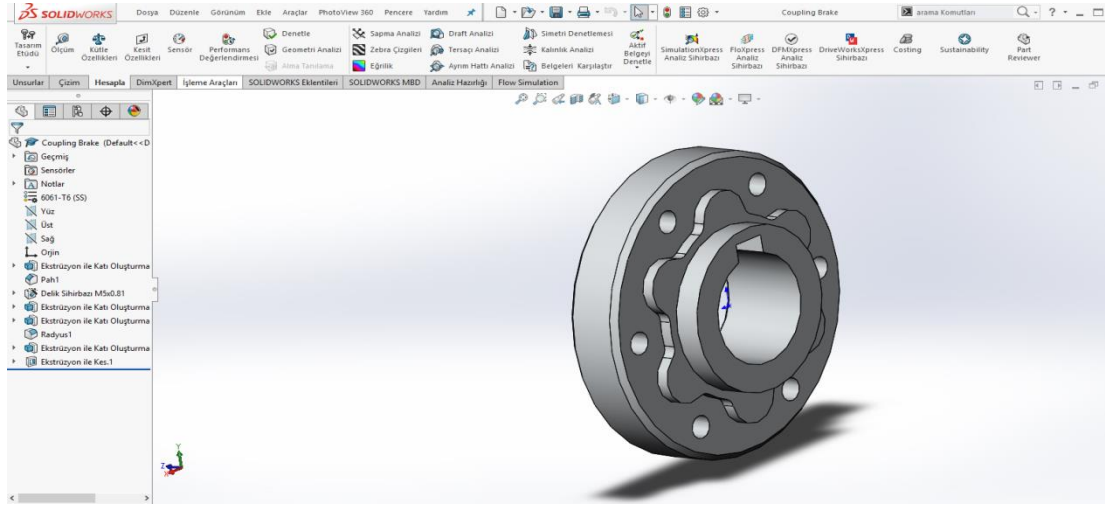
Yönlendirme kuyruğu, rüzgâr yönünün, rüzgâr türbinine doğru yönlendirerek türbinin daha fazla rüzgâr elde etmesini sağlar. Yani rüzgâr yön değiştirdiğinde kuyruk yüzeyine çarpıp, türbinin rüzgârı dik doğrultuda alacak şekilde yön değiştirmesine neden olur.



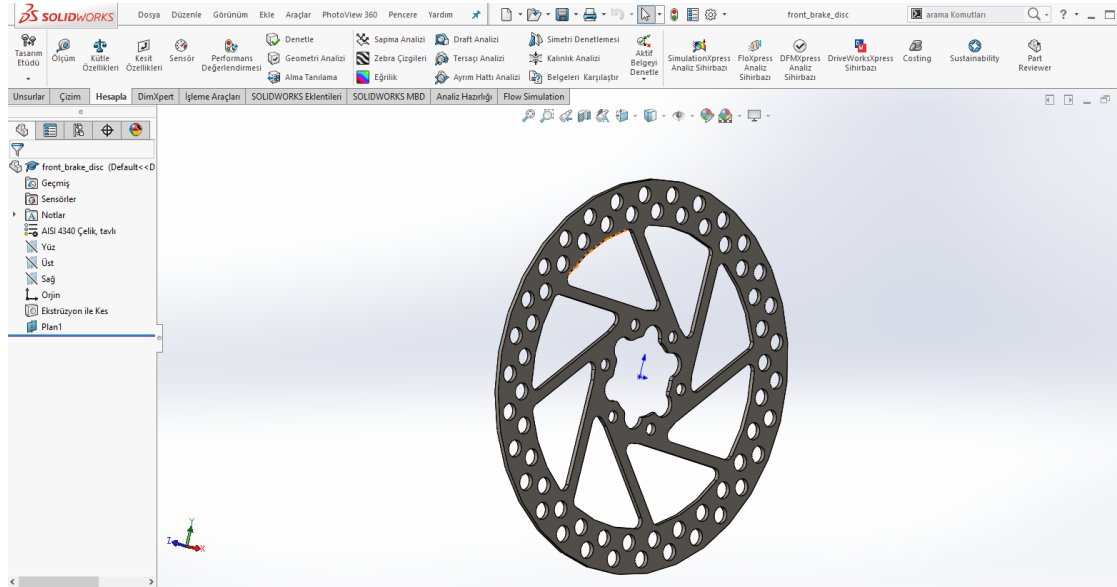
Şekil 12.4: Rüzgâr türbini kuyruk modellemesi

## 12.2 Fren Sistemi Modellemesi

Disk fren mekanizmasında ki kavrama bileziği modellemesidir. Türbindeki dönme milinin aşırı rüzgâr hızlarında kavrayarak yavaşlamasını sağlar.



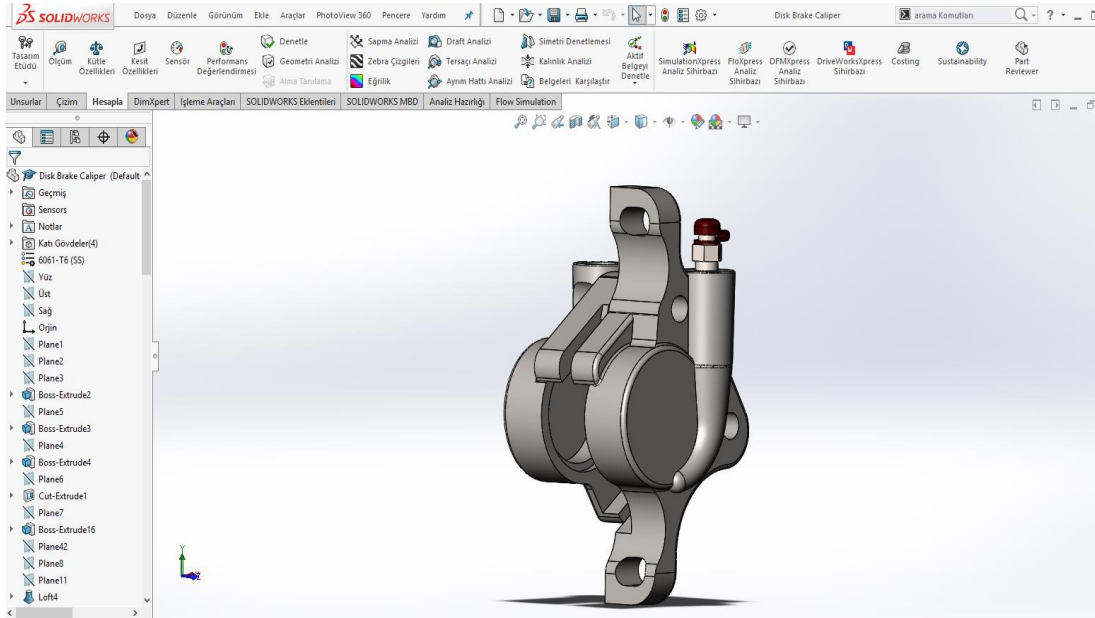
Şekil 12.5: Fren disk tutucu



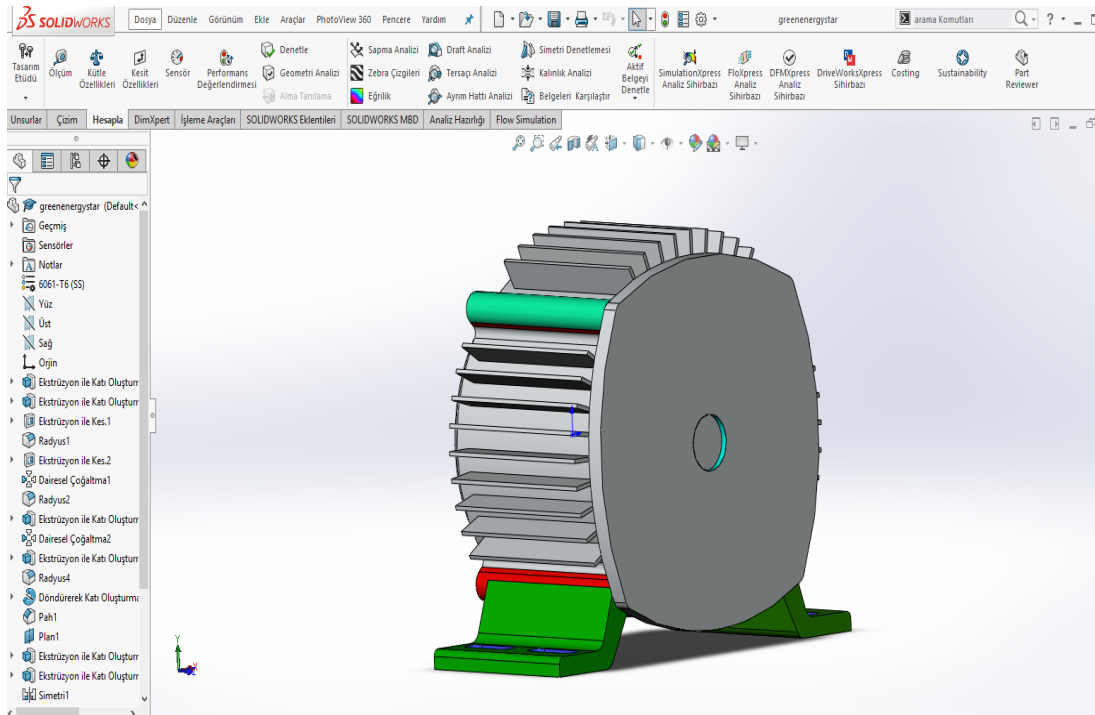
Şekil 12.6: Fren diski

Fren diski, kavrama bileziği ve fren kaliperiyle bağlantılı çalışır. Aşırı rüzgâr hızlarında, rüzgâr türbinin zarar görmemesi için kaliper vasıtasıyla türbin milinin yavaşlamasını sağlar.

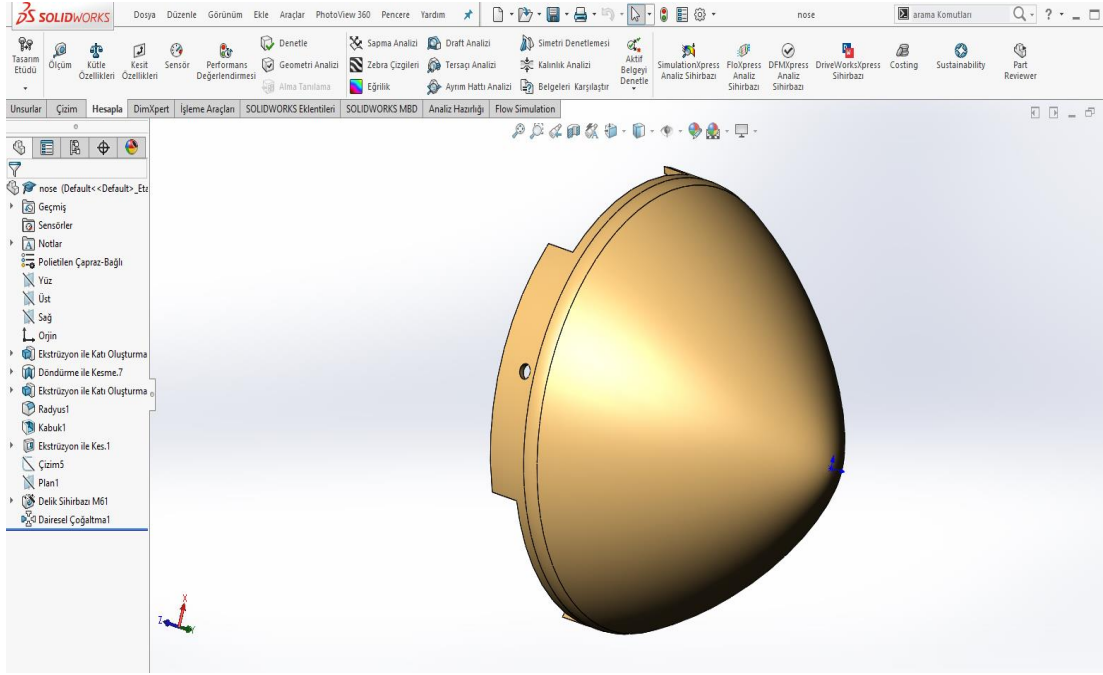
Fren kaliperleri, türbinin durdurma gücünün üretilebilmesi için diske basmaya başlayacak balataya yataklık eden, diske doğru ileri-geri gerekli hareketini sağlayan parçalardır. Bu şekilde fren diskinin iki yüzeyine de baskı oluşturularak frenleme gerçekleştirilir.



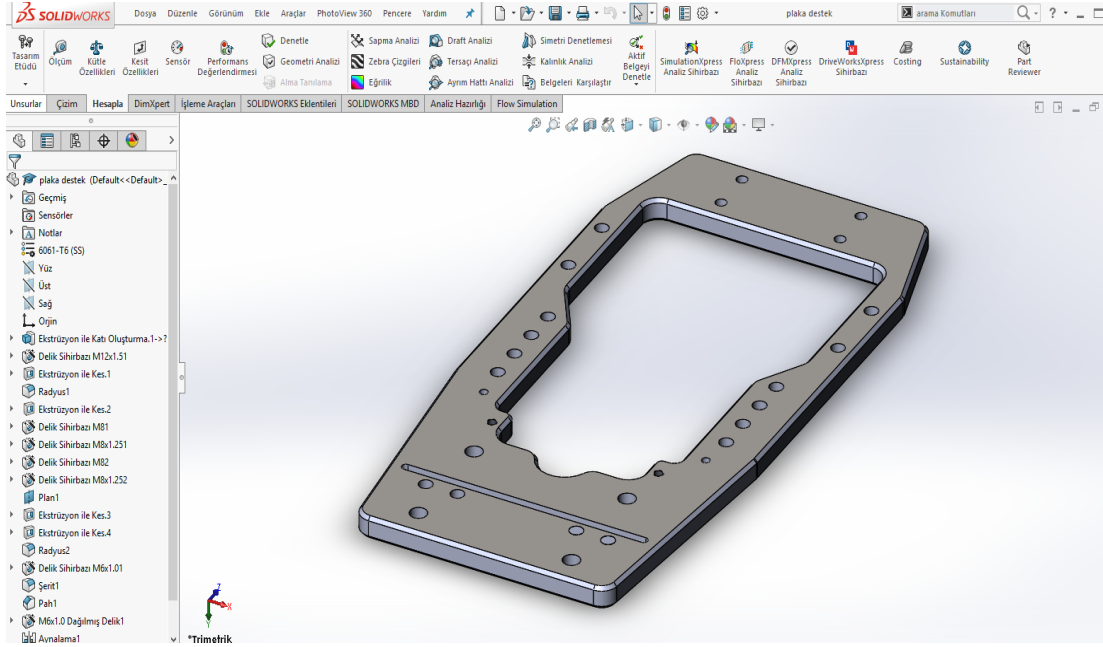
Şekil 12.7: Hidrolik fren kaliperi



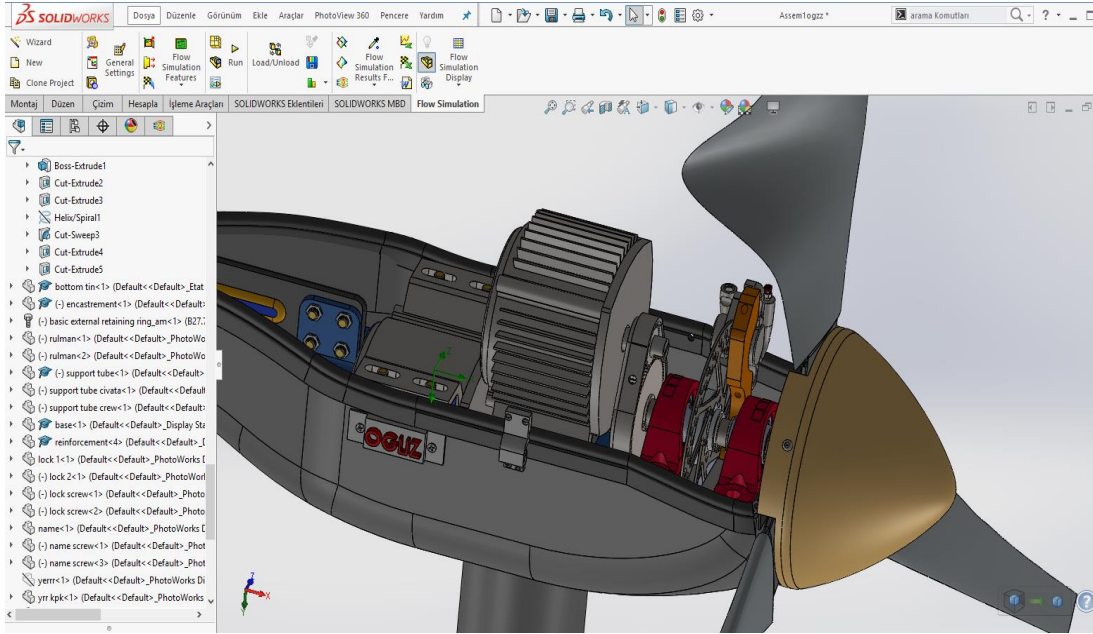
Şekil 12.8: Alternatör modellemesi



Şekil 12.9: Burun modellemesi



Şekil 12.10: Destek plakası

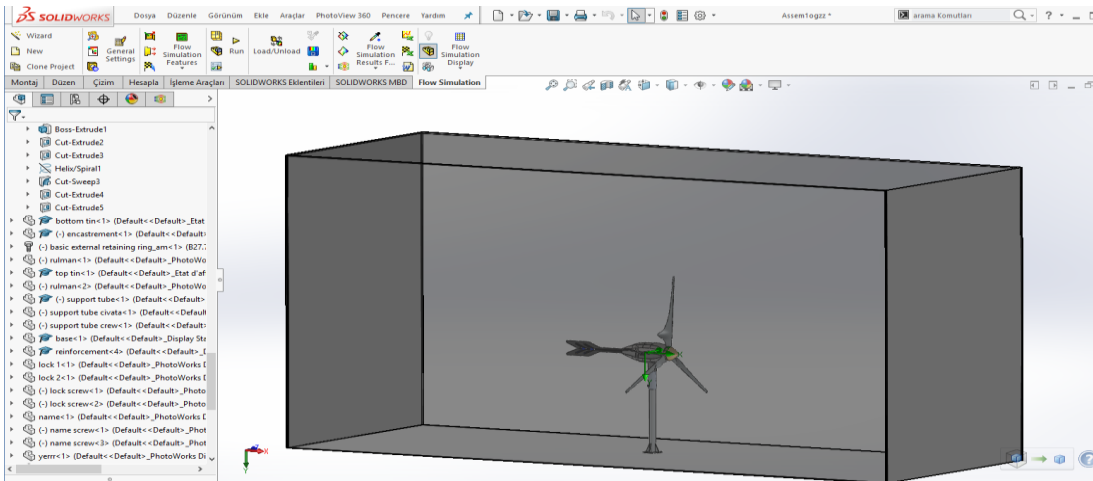


Şekil 12.11: Genel görünüş

Montajlama işlemi çizimden sonra gerçekleştirilmiştir ve simülasyon için hazır hale getirilmiştir. Yapılan kanat tasarımlarında rüzgâr dağılımı incelenmiştir.

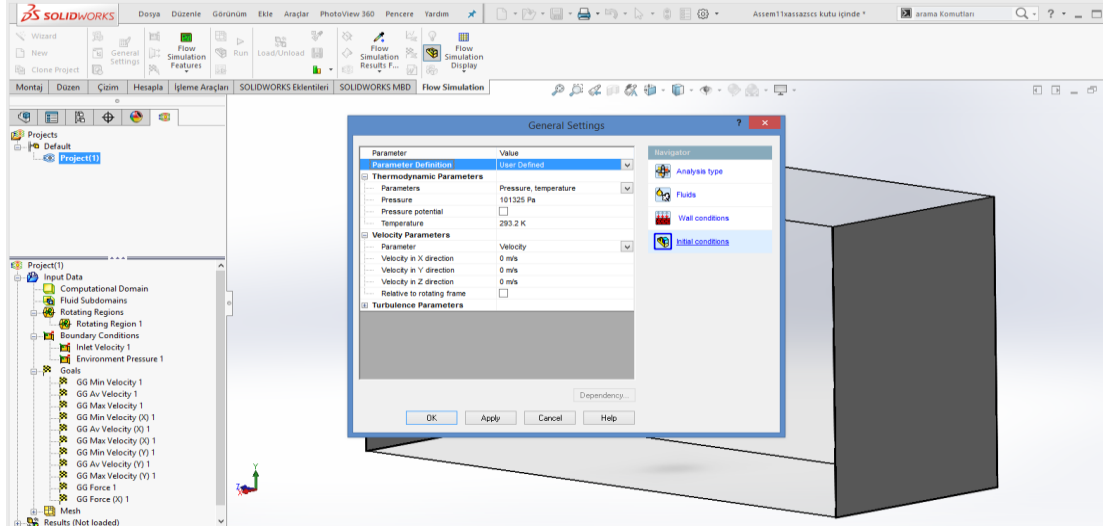
### 12.3 Akış Analizi

Rüzgâr türbininin bulunduğu yere hava hacmi modellenmiştir. Modelleme şekilde gösterilmiştir. Hava hacminin 3D modellenmesi ve simülasyonu Solidworks yazılımı vasıtasıyla yapılmıştır. Modellenen hava hacmine belli yönde belli rüzgâr hızı verilmiştir. Simülasyon, bu değerler temel alınarak gerçekleştirilmiş ve kanatlardaki rüzgâr, basınç dağılımı incelenmiştir.



Şekil 12.12: Solidworks' te modellenen hava hacmi





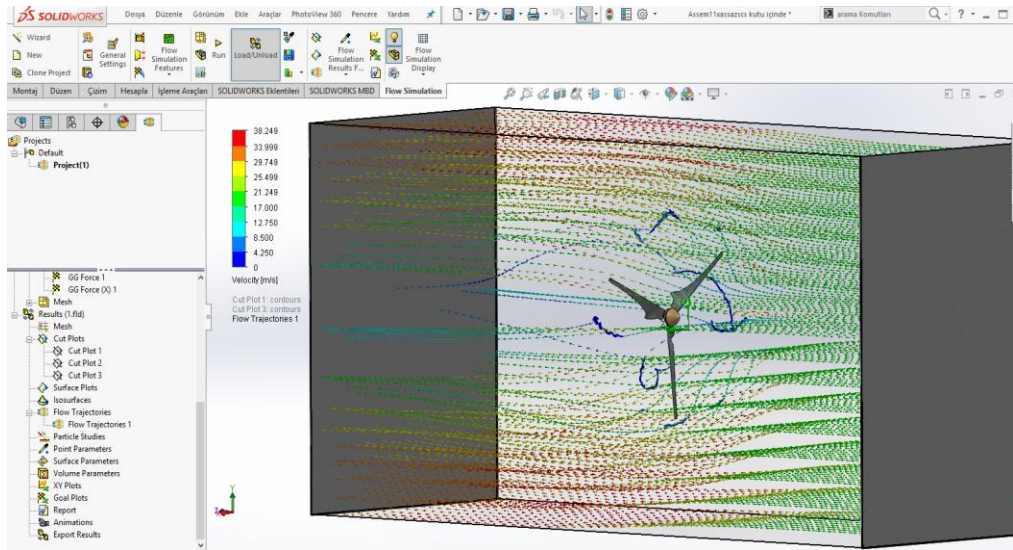
Şekil 12.13: Genel parametreler

Hava hacmi için parametreler, sabit atmosfer basıncı ve oda sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Diğer parametreler simülasyon işlemi için Solidworks yazılımının belirlediği değerlerdir.

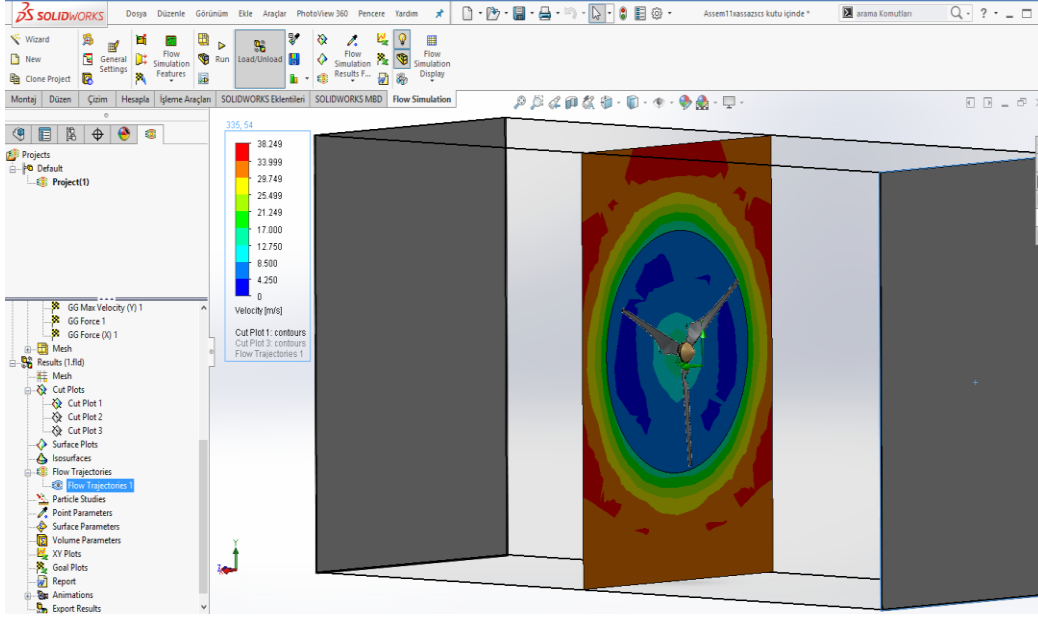
## 12.4 Kanat Modeli 1

Sınır şartları olarak, rüzgârın giriş hızı 20 m/s ve çıkış değeri olarak atmosfer basıncı belirlenmiştir. Türbin dönme hızı 50 rad/s verilmiştir. Simülasyon sonunda rüzgâr hızındaki değişim, dağılım ve atmosfer basıncındaki değişiklik gözlenmiştir.

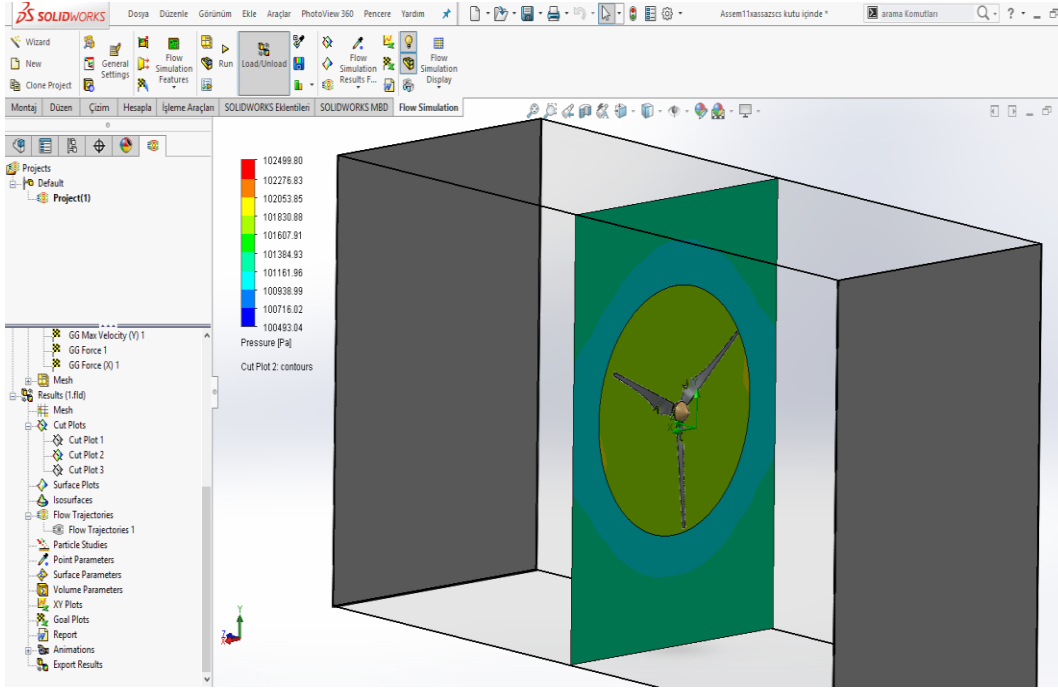
Simülasyon sonucunda da görüldüğü gibi kanat bölgesinde rüzgâr hızı 4.25 m/s civarına kadar düşmüştür. Kanadın çevresinde ise 38.249 m/s ' ye çıkmıştır.



Şekil 12.14: Model 1 için akış analizi

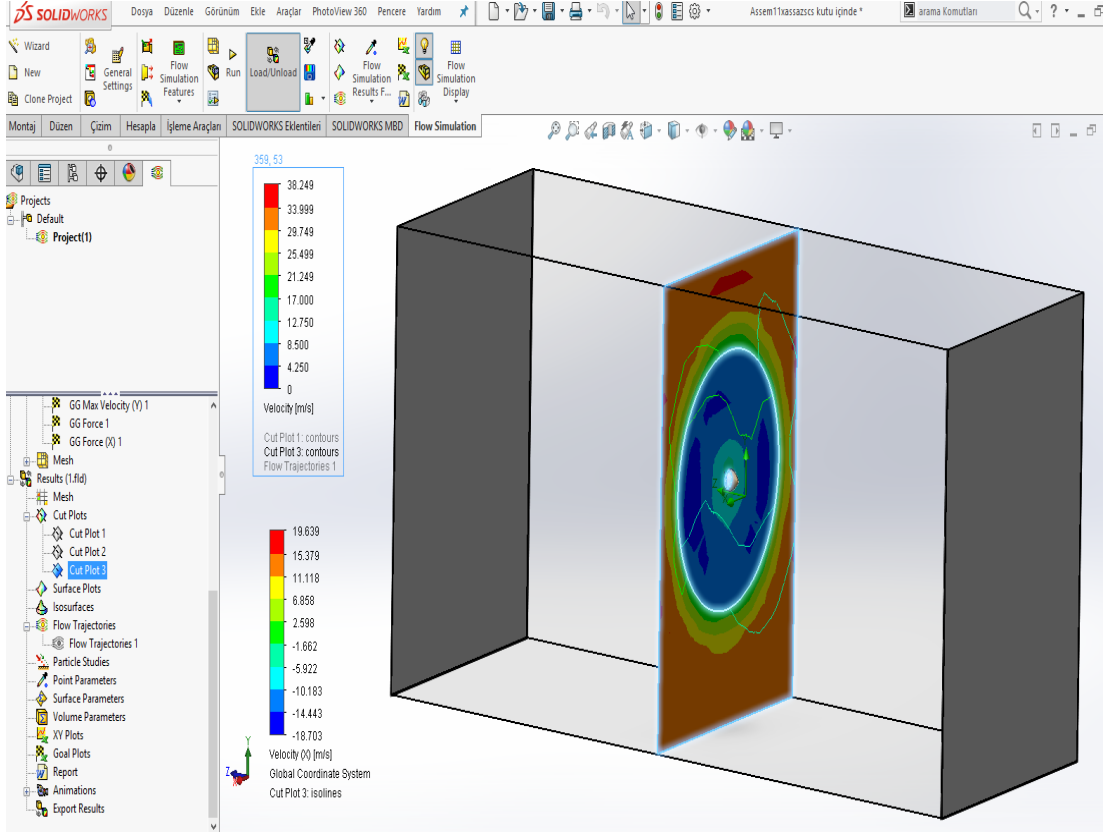


**Şekil 12.15:** Hızın kesitsel görünümü ( Model 1)



**Şekil 12.16:** Kanat çevresinde basıncın kesitsel görünümü

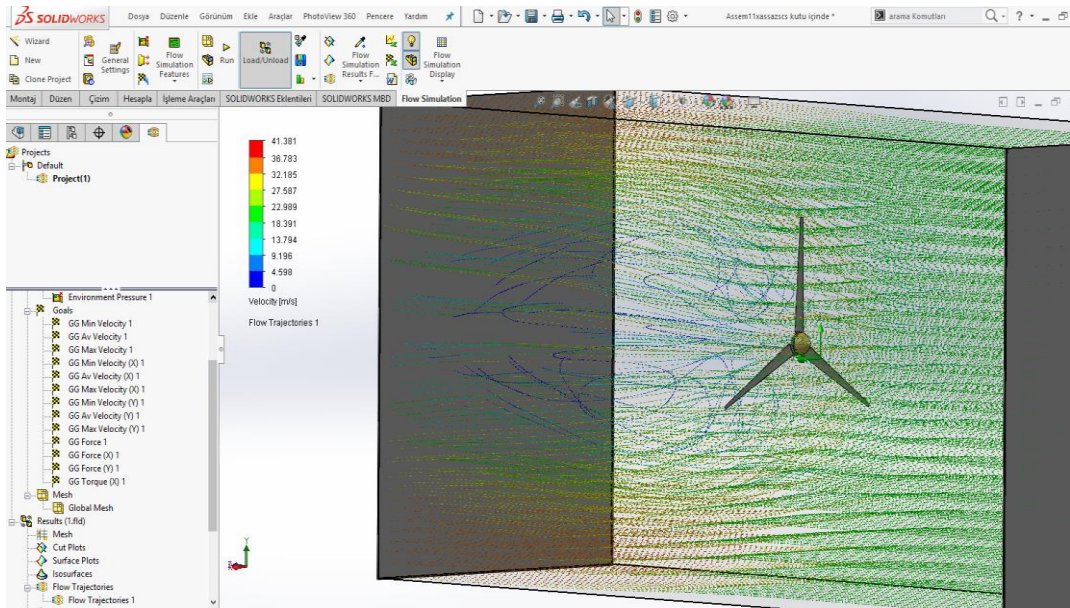
Rotor bölgesine yakın kısımlarda basıncın arttığı uzaklaştıkça basıncın azaldığı görülmektedir. Bu şekilde türbinin ön ve arkasında yüksek basınç alçak basınç bölgeleri oluşmaktadır.



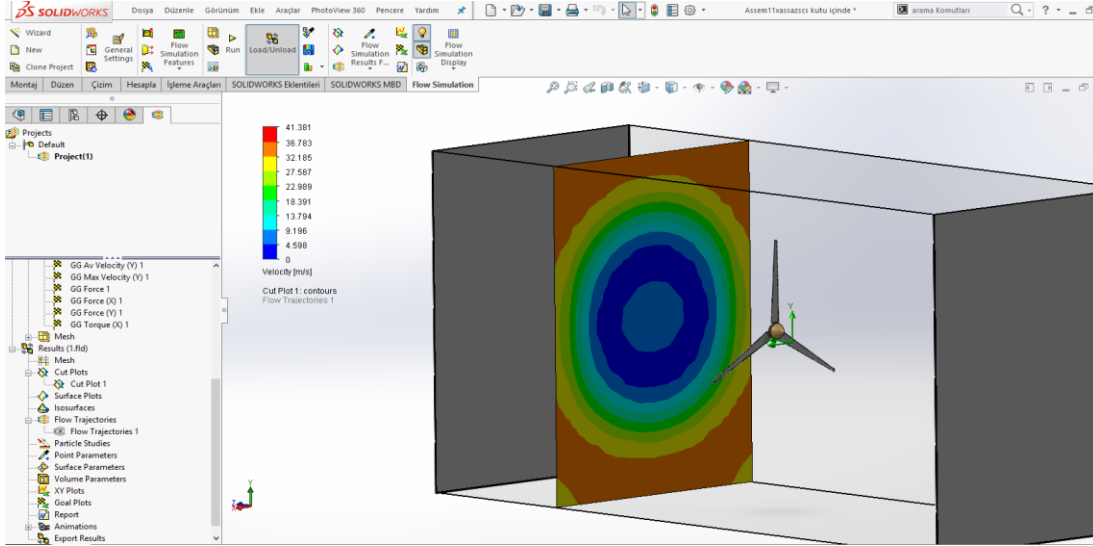
Şekil 12.17: X yönünde ki rüzgâr hızı

## 12.5 Kanat Modeli 2

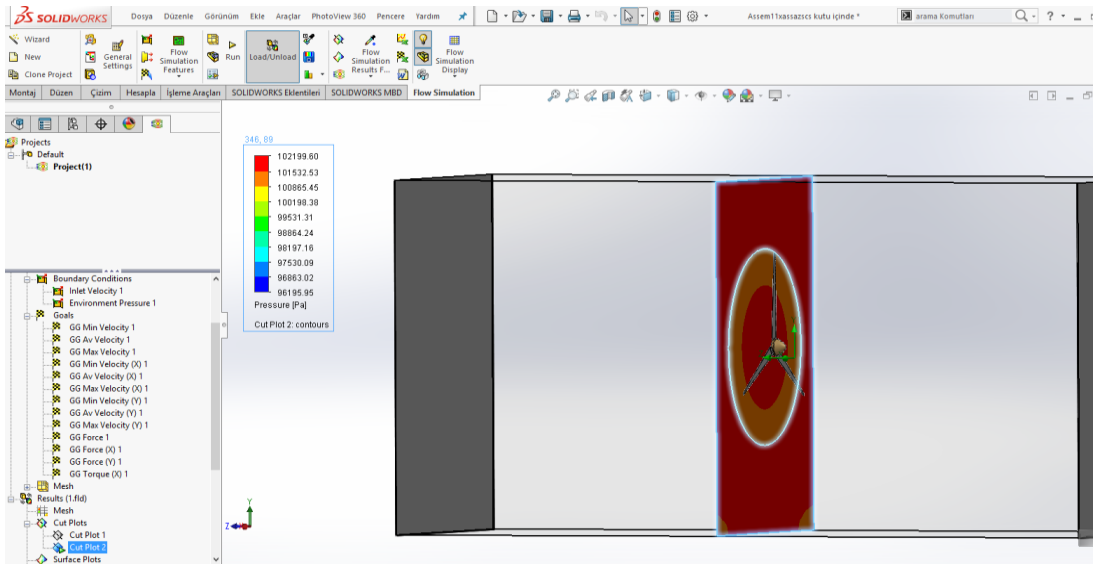
AH-79-100C model kanat tasarımı için aynı sınır şartları verilmiştir ve iki simülasyon sonucu karşılaştırılmıştır.



Şekil 12.18: AH79-100C kanat modeli için akış dağılımı



**Şekil 12.19:** AH79-100C kanat modeli için kesit görünümü

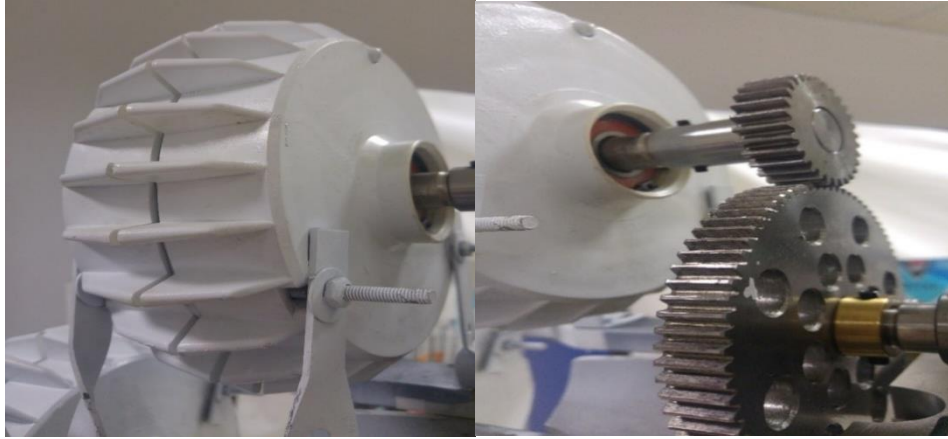


**Şekil 12.20:** AH79-100C kanat çevresindeki basınç değişimi

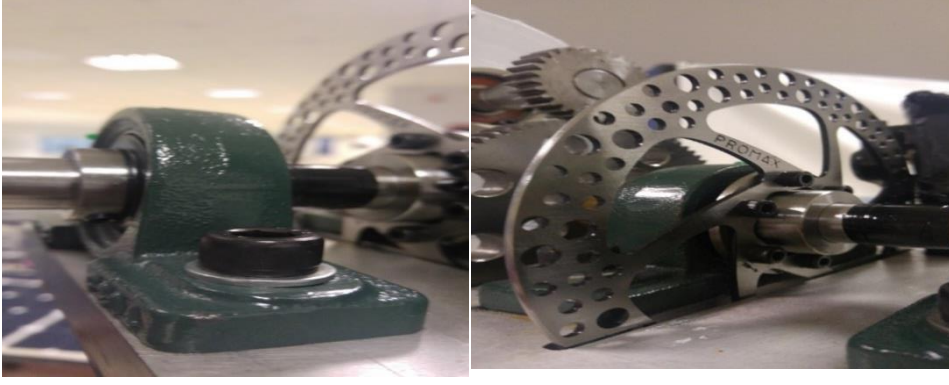
Aynı hız ve ortam şartlarında simülasyon hesaplaması yapılan iki kanat tasarımı da farklı dönüş hızlarına eriştiği ancak AH79-100C kanat modelinde elde edilen verilerin daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Diğer kanat modeline göre AH79-100C kanadı yüzeyinde hava akışının diğer kanat dizaynına göre daha iyi olmasından dolayı diğer kanat modeli rotorunun türbülanslı akışa meyilinin daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

### 13. TASARIMIN PROTOTİP İMALATI

Solidworks aracılığıyla tasarlanan rüzgâr türbininin yapım aşamasında her bir parçanın ölçülere yakın değerlerde imal edilmesine dikkat edilmiştir. İlk olarak tasarım doğrultusunda imal edilecek parçalar belirlenmiş ve teknik resimleri çıkarılmıştır. Parçaların üretim aşamasında tornalama, frezeleme makineleri yardımıyla mil yapımı, destek elemanlar, dişli ve direk yapımlarında yararlanılmıştır. 20 mm çapındaki miller yataklı rulmanlar ile sabitlenip millerin salgı yapması önlenmiştir. Lazer kesim makinesiyle kuyruk imali, kaynak ve testere makineleriyle türbin ayakları üretilmiştir. Kanatlar, rulmanlar, kanat bağlantı diski, burun, alternatörler, şarj kontrol cihazı, bisiklet hidrolik fren disk sistemi ve bağlantı elemanları özel olarak temin edilmiştir. Parçaların imali ve temininden sonra montaj aşamasına geçilmiştir.



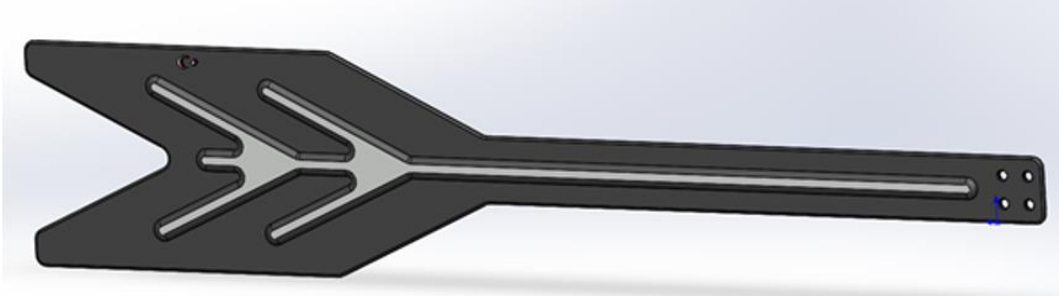
**Şekil13.1:** Alternatör ve dişli görünümü



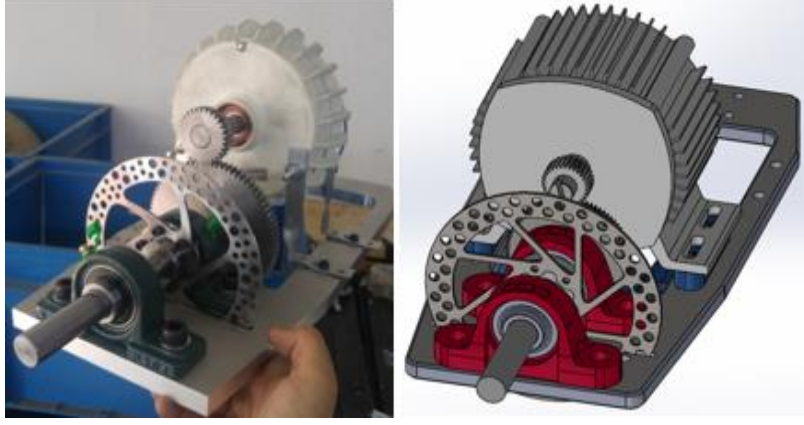
**Şekil 13.2:** Rulman ve hidrolik disk fren sistemi



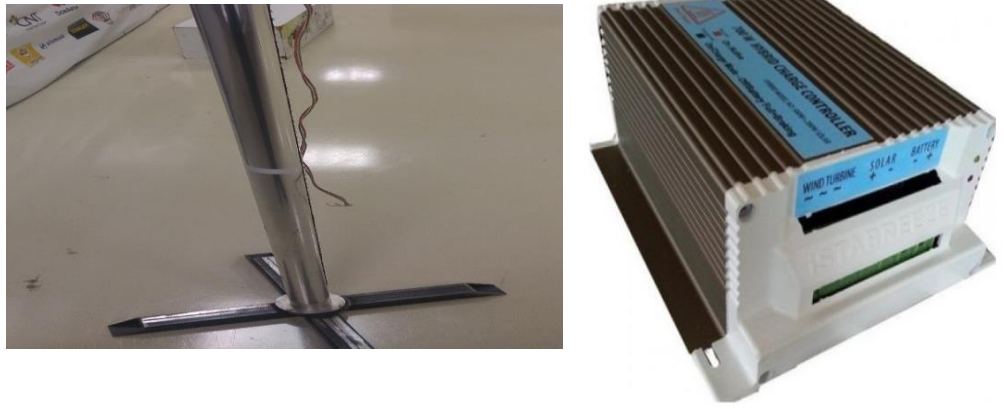
**Şekil 13.3:** Kanat görünümü



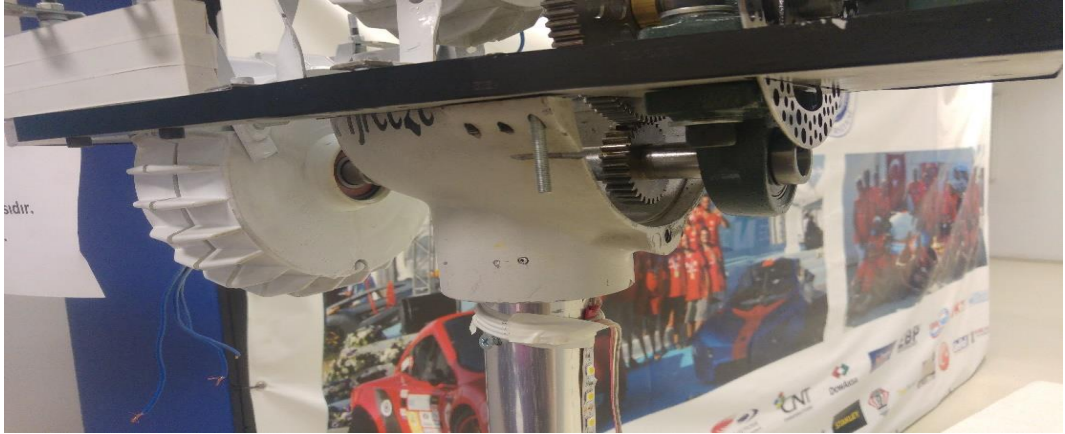
**Şekil 13.4:** Kuyruk görünümü



Şekil 13.5: Plaka destek, mil ve ilk montaj görünümü



Şekil 13.6: Direk, ayak görünümü ve şarj kontrol cihazı



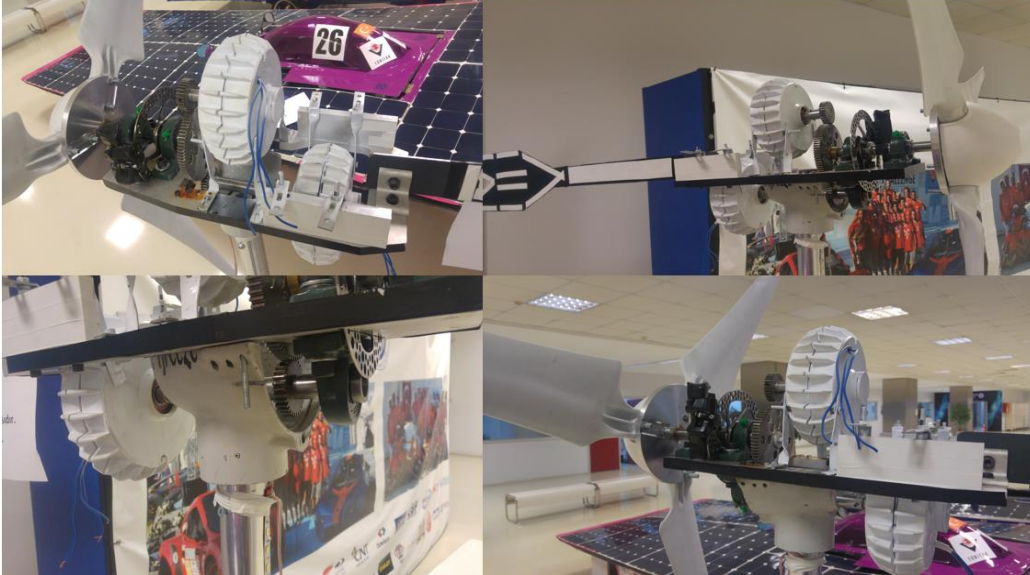
Şekil 13.7: Sistemin rüzgâr yönüne göre dönmesine sağlayan parça

Her bir parça için kısım kısım montajı yapılmıştır. En son olarak direk kısmına bağlantısı yapıp montaj işlemi tamamlanmıştır. Dişlilerin mile bağlantısı yapılırken setskur bağlantı elemanından yararlanılmıştır.



**Şekil 13.8:** Rüzgâr türbininin tasarım ve montaj ilk görünümü

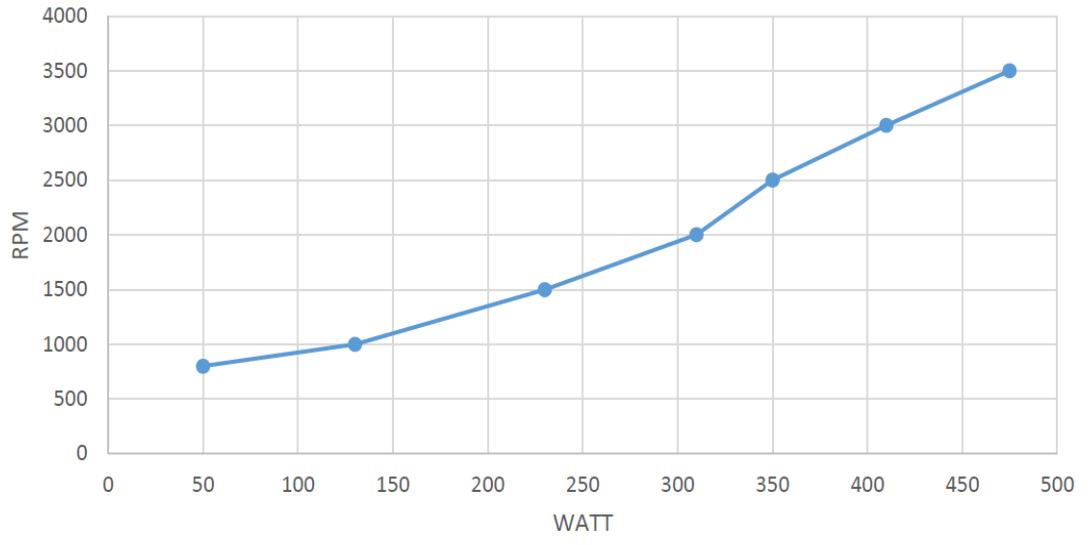
Üretimi aşamasında 2 adet 500 W gücünde 24 volt 20 amper dinamolu alternatörler dişli sistemi, miller yardımıyla tek bir sistemde birleştirilmiştir ve 1 kW gücünde rüzgâr türbini imali yapılmıştır. Kanatların uzunlukları 1 metre ve rotor çapı 2,1 metre olan rotor vasıtasıyla sistemin rüzgâr yakalaması, ayrıca dişliler vasıtasıyla rotorun bir tur dönmesine karşılık sistemin üç tur dönmesi sağlanarak alternatörlerden elde edilecek güç miktarı artırılması hedeflenmiştir. Bu şekilde tek bir sistemde hem iki alternatör kullanılması hem de dişliler yardımıyla sistemden tek seferde 6 katı güç alımı sağlanmıştır. 360<sup>0</sup> derece rüzgâr yönüne göre serbestçe dönebilme özelliğine sahip kuyruk vasıtasıyla rüzgârın akış yönü yakalanmıştır.



**Şekil 13.9:** Rüzgar Türbin Son Montajlanmış Görünümü



**Çizelge 13.1:** 500 watt alternatör için üretebileceği güç verileri





## 14. SONUÇLAR

Simülasyon çalışması sonuçlarına göre UIUC Havacılık ve Uzay Mühendisliği Departmanı verilerinden alınan AH79-100 C kanat modeli çevresinde rüzgâr hızının 41.381 m/s ve Solidworks yazılımı ile herhangi bir verilere dayanmayarak hazırlanmış rüzgâr türbin kanadı etrafındaki rüzgâr hızının, 38.249 m/s olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı üzere AH79-100C kanat çevresinde rüzgâr hızının daha fazla olması kanat dönüşünün daha fazla olduğunu gösterir. Bu kanat modeliyle türbinden daha fazla enerji elde edilebileceği anlaşılmıştır. Basınç değişiminin kanadın ön tarafına geldikçe arttığı ve bu esnada türbinin rüzgârı dağıttığı için arka tarafa geçerken basıncın düştüğü gözlenmiştir. Türbin girişindeki rüzgârın taşıdığı toplam kinetik enerjinin bir kısmı türbin kanatları üzerinden mekanik enerjiye dönüştürülmüştür ve enerjinin korunumu yasasına göre türbin çıkışındaki kinetik rüzgâr enerjisi miktarı da türbin girişine göre azalmak durumundadır. Buna ilaveten tasarım ve simülasyon çalışmalarından sonra aynı ölçülerde prototip bir rüzgâr türbini imal edilmiştir. Farklı tasarımlar ile türbin veriminin artırılması sağlanmıştır. Yapılan incelemelerde türbinin verimini etkileyen rüzgâr hızı, yoğunluğu, türbülanslı akış gibi birçok gözlem yapılmıştır. Farklı rüzgar hızlarındaki kanat simülasyon analizlerinde kanatların güç üretiminde rüzgar yakalaması, türbülansa sebep olmaması gibi faktörlerin önemi anlaşılmış ve oluşturulan prototip türbinde de verimi etkileyen mekaniksel sürtünmelerin en çok nerede olduğu incelenmiştir. Yukarıdaki grafikte türbin alternatörleri için güç verileri verilmiştir. Türbinin 1000 rpm dönüş hızında dişli sistemi ile alternatörlere 3000 rpm olarak iletilmiş ve tek bir alternatörden yaklaşık 400 W güç ürettiği gözlemlenmiştir. 1000 rpm dönüş hızında toplam sistemden elde edilen güç diğer alternatör ile beraber 800 W olmuştur.



## KAYNAKLAR

- [1] **Kurniadi, F. E.**, Key Factors Influencing the Competitiveness of Wind Energy in the Electricity Market, Freiburg University of Mining and Tecnology, Faculty of Business Administration and Economics, Master Thesis, Freiburg 2002.
- [2] **Solar Akademi**, < <http://www.solar-academy.com/menus/Enerji-Uretiminde-Ruzgar-Kaynagin-Ustunlukleri.024221.pdf>>, (ET: 27.07.17).
- [3] **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel M¼d¼rl¼đ¼**, <<http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar>>, (ET:03.08.17)
- [4] **Solmaz ,S., Turan, A. R.**, Ortalama Geçmiş R¼zg¼r Verileri Üzerinden R¼zg¼r Enerjisi Santralleri için Ön Fizibilite Yapılması, İzmir R¼zg¼r Sempozyumu, 8-10 Ekim 2015, İzmir 2015, s.73-75.
- [5] **Turkish Wind Energy Association**: Türkiye R¼zg¼r Enerjisi İstatistik Raporu, (2017 Ocak), s.4-5.
- [6] **Ngihem, A., Mbistrova, A.**, Avrupa' da R¼zg¼r Enerjisi Yıllık Değerlendirme Araştırması, **Pineda, I., Tardieu, P.**, (Haz./Ed.), WindEurope, The European Wind Energy Association, Brussels, 2017, s.6-13.
- [7] **Elektrikport M¼hendislik Portalı**, <<http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/ruzgar-enerjisinin-gelisimi-ve-tarihi/4309#ad-image-0>>, (ET: 27.07.17).
- [8] **Wikipedia**, <[https://tr.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCzg%C3%A2r\\_t%C3%BCrbini](https://tr.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCzg%C3%A2r_t%C3%BCrbini)>, (ET: 27.04.16).
- [9] **Manyonge, A. W., Ochieng, R. M., Onyango, F. N., Shichika, J. M.** (2012). Mathematical Modelling of Wind Turbine in a Wind Energy Conversion System: Power Coefficient Analysis, Applied Mathematical Sciences, Vol. 6, No. 91, 4527-4536.
- [10] **Antipollutionist**, < <http://growththeor.blogspot.com.tr/>>, (ET: 27.07.17).
- [11] **Wind Energy Technologies Office**, The Inside of a Wind Turbine, < <https://energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine-0>>, (E.T: 03.08.17)
- [12] **Rodrigues, S., Restrepo, C., Katsaouris, G., Pinto, R. T., Soleimanzadeh, M., Bosman, P., Bauer P.** (2016). A Multi-Objective Optimization Framwork for Offshore Wind Farm Layouts and Electric Insfrastructures, Energies, Vol. 9, No. 3, 216, doi:10,3390/en9030216.
- [13] **Deniz, O.**, Türkiye' de R¼zg¼r Enerjisi ve Maliyet Analizi, < <https://www.slideshare.net/denizokan/rzgar-enerjisi-11664699>>, (E.T: 03.08.17), s.22.
- [14] **Elektrikport M¼hendislik Portalı**, <<http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/ruzgar-turbinlerinin-cesitleri-ve-birbirleriyle-karsilastirilmesi/8178#ad-image-0>>, (ET: 27.07.17).
- [15] **Centurion Energy**, <<http://centurionenergy.net/types-of-wind-turbines>>, (ET: 27.07.17).

- [16] **Danish Wind Industry Association**, <<http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/powerreg.htm>>, (ET: 27.07.17).
- [17] **Çelikdemir, S., Özdemir, F.**, Rüzgar Türbin Sistemlerinin Karşılaştırılması, Ursi-Türkiye 2014 VII. Bilimsel Kongresi, 28-30 Ağustos 2014, Elazığ.
- [18] Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, (2012, Haziran), **The International Renewable Energy Agency**, Vol. 5, No. 5, p. 7-8.
- [19] **Özarlan, A.**, Yenilenebilir Enerji Kaynakları için Büyük Ölçekli Enerji Depolama Yöntemleri, Türkiye 12. Enerji Kongresi, 14-16 Kasım 2012, ODTÜ-Ankara.
- [20] **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü**, <<http://www.eie.gov.tr/teknoloji/bataryalar.aspx>>, (ET: 27.07.17).
- [21] **Elektrikport Mühendislik Portalı**, <<http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/fazla-ruzgar-enerjisini-depolamak-icin-temiz-cozumler/8112#ad-image-0>>, (ET: 27.07.17).
- [22] **Alternative Energy Tutorials**, <<http://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/wind-turbine-generator.html>>, (ET: 27.07.17).
- [23] **Yenilenebilir Enerji Teknolojileri**, Milli Eğitim Basımevi, Ankara, 2012.
- [24] **Akyazı, Ö., Akpınar, A. S.**, "Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Jeneratörler", Makinatek, s.126 (2014).
- [25] **Hugh, D., Young and Roger A. F.**, (2008). University Physics, 12th edition. Addison-Wesley. s. 329. ISBN 978-0-321-50130-1.
- [26] **Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L.**, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, 2nd Edition, Jon Wiley and Sons, Great Britian 2009, p. 92-105, 118-121.
- [27] **Wikipedia**, Tip Speed Ratio, <[https://en.wikipedia.org/wiki/Tip-speed\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Tip-speed_ratio)>, (ET: 03.08.17).
- [28] **Minnesota Muncipal Power Agency** <<http://mmpa.org/wp-content/uploads/2015/09/Tip-Speed-Ratio-Provided-by-Kid-Wind-PDF.pdf>>, (ET: 27.07.17)
- [29] **Wikipedia**, Sıcaklık ve Basınç için Standart Koşullar, <[https://tr.wikipedia.org/wiki/S%C4%B1cakl%C4%B1k\\_ve\\_Bas%C4%B1n%C3%A7\\_%C4%B0%C3%A7in\\_Standart\\_Ko%C5%9Fullar](https://tr.wikipedia.org/wiki/S%C4%B1cakl%C4%B1k_ve_Bas%C4%B1n%C3%A7_%C4%B0%C3%A7in_Standart_Ko%C5%9Fullar)>, (ET: 01.08.17).
- [30] **HyperPhysics**, <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/barfor.html>> (E.T: 03.08.17)
- [31] **Wikipedia**, <[https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric\\_pressure](https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_pressure)>, (E.T: 03.08.17)
- [32] **Johnson, G. L.**, (2001). Wind Energy Systems, 2nd Edition, Prentice-Hall, Manhattan KS.
- [33] **Wikimedia**, <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind\\_generator\\_comparison.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_generator_comparison.svg)>, (E.T: 03.08.17)
- [34] **Hartwanger, D., Horvat, A., T.**, 3D Modelling of a Wind Turbine Using CDF, Engineering Simulation: Effective Use and Best Practice, 10-11 Haziran 2008, NAFEMUS Konferans, Cheltenham, United Kingdom, s.4-6.

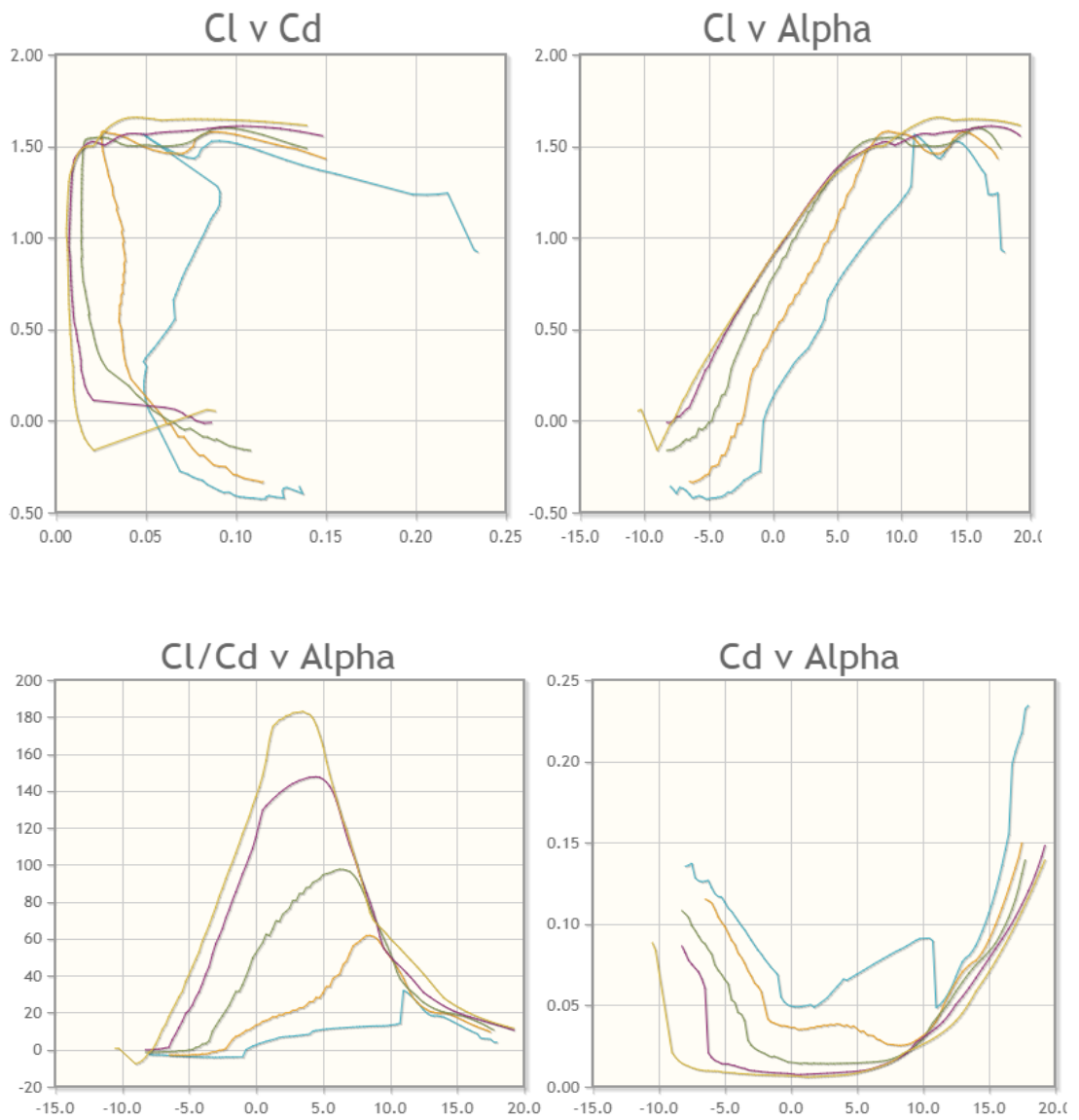
- [35] **Gorban, A. N., Gorlov, A. M., Silantyev, V. M.** (2001). Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow. *Journal of Energy Resources Technology*. Vol. 123, p. 313-317, doi: 10.1115/1.1414137.
- [36] **Önder, M.** (2006). Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini Kanadının Bilgisayar Destekli Tasarımı. Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara. s. 16-17.
- [37] **Mario, G. S., Constantine, H. H.** (2012). *Wind Energy Systems: Control Engineering Design*. Taylor&Francis Group Amerika, p. 285.
- [38] **Dincer, İ., Rosen, M.** (2013). *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*, 2nd Edition. Elsevier Ltd, Great Britian. ISBN: 978-0-08-097089-9. p.218-223.
- [39] **Kökey, İ.** (2013). Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi ve Rüzgâr Enerji Santrallerinin Performans Değerlendirmesinde Ekserji Analizinin Önemi. Uluslararası Enerji ve Çevre Fuarı ve Konferansı, İstanbul. s.77.
- [40] **Şekerci, E., Monier, E., Albasan, C.** (2009). Rüzgâr Türbini Yıllık Enerji Üretim Hesaplama Yöntemleri ve Araziye Uygun Rüzgâr Türbin Seçimi. Elektrik Mühendisleri Odası. s.4-5.
- [41] **Mcensustainableenergy**, < <http://mcensustainableenergy.pbworks.com/w/page/20638217/Wind%20Desig>>, (E.T: 03.08.17).
- [42] **Mukund, R. P.** (1999). *Wind and Solar Power Systems*, CRC Press LLC. Washington. ISBN: 0-8493-1605-7. p. 58-61.
- [43] **Wind Turbine Models**, < <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/804-m.torres-twt-1.65-82>>, (E.T: 03.08.17)
- [44] **Tanrıöven, M.** Materyaller Ders Notları < [http://www.yarbis1.yildiz.edu.tr/web/userCourseMaterials/tanriov\\_80841e33304c15b5cc5907d54b912c4b.pdf](http://www.yarbis1.yildiz.edu.tr/web/userCourseMaterials/tanriov_80841e33304c15b5cc5907d54b912c4b.pdf)>, (E.T: 03.08.17).
- [45] **Kaya, K., Koç, E.**, Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Kanatlarının Mekanik Tasarım Esasları – Teorik Model, İzmir Rüzgar Sempozyumu, 8-10 Ekim 2015, İzmir 2015.





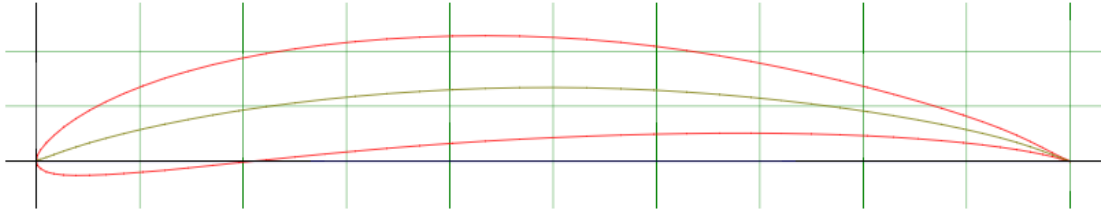
## EKLER

### EK 1



Plot	Airfoil	Reynolds #	Ncrit	Max Cl/Cd
<input checked="" type="checkbox"/>	ah79100c-il	50,000	9	32.2 at $\alpha=11^\circ$
<input type="checkbox"/>	ah79100c-il	50,000	5	31.5 at $\alpha=10^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/>	ah79100c-il	100,000	9	61.7 at $\alpha=8.5^\circ$
<input type="checkbox"/>	ah79100c-il	100,000	5	61.5 at $\alpha=7^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/>	ah79100c-il	200,000	9	97.6 at $\alpha=6.25^\circ$
<input type="checkbox"/>	ah79100c-il	200,000	5	97 at $\alpha=4.75^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/>	ah79100c-il	500,000	9	147.6 at $\alpha=4.5^\circ$
<input type="checkbox"/>	ah79100c-il	500,000	5	137.7 at $\alpha=3^\circ$
<input checked="" type="checkbox"/>	ah79100c-il	1,000,000	9	183 at $\alpha=3.5^\circ$
<input type="checkbox"/>	ah79100c-il	1,000,000	5	161.4 at $\alpha=2.75^\circ$

## AH79-100C Airfoil Shape



x	y	
0.000000	0.000000	0.000000 0.000000
0.0010700	0.0056500	0.0010700 -0.0037600
0.0042800	0.0105800	0.0042800 -0.0067900
0.0096100	0.0167600	0.0096100 -0.0096000
0.0170400	0.0235700	0.0170400 -0.0113300
0.0265300	0.0311100	0.0265300 -0.0124700
0.0380600	0.0386500	0.0380600 -0.0128400
0.0515600	0.0463300	0.0515600 -0.0126900
0.0669900	0.0539200	0.0669900 -0.0121000
0.0842700	0.0613800	0.0842700 -0.0111300
0.1033200	0.0685100	0.1033200 -0.0097400
0.1240800	0.0753700	0.1240800 -0.0081500
0.1464500	0.0816900	0.1464500 -0.0060500
0.1703300	0.0876000	0.1703300 -0.0037200
0.1956200	0.0929700	0.1956200 -0.0012400
0.2222100	0.0978100	0.2222100 0.0013000
0.2500000	0.1020300	0.2500000 0.0039600
0.2788600	0.1056900	0.2788600 0.0066000
0.3086600	0.1086600	0.3086600 0.0092300
0.3392800	0.1110200	0.3392800 0.0117500
0.3705900	0.1126800	0.3705900 0.0141500
0.4024500	0.1136800	0.4024500 0.0163600
0.4347400	0.1139900	0.4347400 0.0183300
0.4673000	0.1136000	0.4673000 0.0200600
0.5000000	0.1124900	0.5000000 0.0215200
0.5327000	0.1106200	0.5327000 0.0227800
0.5652600	0.1079700	0.5652600 0.0238100
0.5975500	0.1045600	0.5975500 0.0246300
0.6294100	0.1005000	0.6294100 0.0251700
0.6607200	0.0958200	0.6607200 0.0255000
0.6913400	0.0906600	0.6913400 0.0255400
0.7211400	0.0851200	0.7211400 0.0253200
0.7500000	0.0792900	0.7500000 0.0248500
0.7777900	0.0732500	0.7777900 0.0241000
0.8043801	0.0670500	0.8043801 0.0231000
0.8296700	0.0607800	0.8296700 0.0218700
0.8535500	0.0544600	0.8535500 0.0204000
0.8759201	0.0481600	0.8759201 0.0187100
0.8966800	0.0419300	0.8966800 0.0168800
0.9157300	0.0358300	0.9157300 0.0148800
0.9330100	0.0297600	0.9330100 0.0128000
0.9484400	0.0237400	0.9484400 0.0106200
0.9619400	0.0178300	0.9619400 0.0084500
0.9734700	0.0123900	0.9734700 0.0063000
0.9829600	0.0077300	0.9829600 0.0042800
0.9903900	0.0043000	0.9903900 0.0023500
0.9957200	0.0018400	0.9957200 0.0009700
0.9989300	0.0003800	0.9989300 0.0001600
1.0000000	0.0000000	1.0000000 0.0000000



## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad-Soyad** : Oğuzhan TOSUN  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 14.02.1990, Bakırköy/İSTANBUL  
**E-posta** : oguzhantosun10@gmail.com

## **ÖĞRENİM DURUMU:**

**Lisans** : 2014, Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Makina Mühendisliği Bölümü.

**Yüksek Lisans** : 2016, Cracow University of Technology, Engineering  
Faculty Department.

## **MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:**

Plastik enjeksiyon ve talaşlı üretim konularında mesleki tecrübeleri bulunmaktadır.