



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RÜZGAR ENERJİSİ SİSTEMLERİNDE OPTİMİZASYON**

**Elektrik-Elektronik Müh. Fatma İkbal TEMİZ**  
**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman**  
**Prof.Dr. Ayten KUNTMAN**

**Ocak, 2010**

**İSTANBUL**

Bu çalışma 27/01/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik – Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Danışman Adı (Danışman) : Prof Dr. Ayten KUNTMAN

İstanbul Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Jüri Adı: Prof.Dr. Sıddık B. YARMAN

İstanbul Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Jüri Adı: Prof.Dr. Osman Nuri Uçan

İstanbul Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Jüri Adı: Prof.Dr. İlhan KOCAARSLAN

İstanbul Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Jüri Adı: Prof.Dr. Ahmet SERTBAŞ

İstanbul Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

## **ÖNSÖZ**

Bu tezde emeği geçen, beni y6nlendiren, destekleyen ve bilgilerini paylaşan hocam Sn. Prof. Dr. Ayten KUNTMAN'a ve değerli katkılarından dolayı sayın hocam Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN'a teşekk6rlerimi sunarım.

**Ocak, 2010**

**Fatma İkbal TEMİZ**

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	I
İÇİNDEKİLER .....	II
ŞEKİL LİSTESİ.....	III
TABLO LİSTESİ .....	IV
SEMBOL LİSTESİ .....	V
ÖZET .....	VI
SUMMARY .....	VII
1.GİRİŞ .....	1
2.GENEL KISIMLAR .....	4
2.1 ENERJİNİN TANIMI .....	4
2.2 ENERJİNİN KULLANIMI .....	4
2.3 ENERJİ KAYNAKLARI .....	5
2.3.1 Yenilenemeyen Enerji Kaynakları .....	6
2.3.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları .....	6
2.4 RÜZGAR ENERJİSİ KULLANIMI.....	8
2.4.1 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminin Tarihi.....	9
2.4.2 Dünyada Ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Kullanımı.....	11
2.4.3 Rüzgar Enerjisi Dönüşümü Ve Rüzgar Türbinleri .....	12
2.4.4 Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	14
2.4.5 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	15
2.4.6 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Çalışma Şekli .....	16
2.5 YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ ELEMANLARI VE TEKNOLOJİSİ .....	17
2.5.1 Rotor .....	21
2.5.2 Aktarma Organları .....	26
2.5.3 Türbin Kontrol Elemanları .....	27
2.5.4 Yönlendirici.....	30
2.5.5 Elektrik Sistemi.....	30

2.5.6 Frekans Dönüştürücü .....	33
2.5.7 Transformatör.....	33
2.5.8 Güç Elektronik Sistemleri .....	33
2.5.9 Şebekeye Bağlantı Şekilleri.....	35
2.6 RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE GÜÇ ÇIKIŞI VE VERİM .....	36
2.6.1 Verimi Düşüren Faktörler .....	42
2.6 RÜZGARTÜRBİNİ TASARIMI VE PARAMETRELERİ.....	43
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	54
4. BULGULAR .....	60
5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....	70
KAYNAKLAR.....	72
ÖZGEÇMİŞ.....	76

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: Yıllara göre dünya rüzgar enerjisi santralleri kurulu güçleri.....	12
Şekil 2.2	: Yatay ve düşey eksenli rüzgar türbinleri konfigürasyonu.....	13
Şekil 2.3	: Savonius tipi rüzgar türbini rotoru.....	15
Şekil 2.4	: Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi.....	16
Şekil 2.5	: Rüzgar türbinin iç yapısı.....	18
Şekil 2.6	: Üç, iki ve tek kanatlı türbin şekilleri .....	23
Şekil 2.7	: Kanat boyutları .....	24
Şekil 2.8	: Kanat üzerine etkiyen kuvvetler .....	24
Şekil 2.9	: Rotor veriminin uç hız oranına göre değişimi .....	26
Şekil 2.10	: Rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılan jeneratör sistemleri .....	31
Şekil 2.11	: Değişken hızlı bir rüzgar türbinindeki güç elektroniği düzeneği.....	34
Şekil 2.12	: Değişken hızlı rüzgar türbini sistemi .....	35
Şekil 2.13	: Bir rüzgar türbininin maruz kaldığı rüzgar kanalı boyunca oluşan rüzgar hızları.....	38
Şekil 2.14	: Hızları ve yönleri gösteren kanat kesiti .....	38
Şekil 2.15	: $C_p$ 'nin $\lambda$ ile değişimi .....	41
Şekil 2.16	: Kanat düzleminde oluşan açılar .....	46
Şekil 2.17	: Kanatlarda oluşan kaldırma ve sürüklenme.....	48
Şekil 2.18	: Kanata etkiyen kuvvetlerin vektörel gösterimi ve hücum açısı .....	49
Şekil 2.19	: Kanatta kritik hücum açısı ( $\alpha_{critical}$ ).....	49
Şekil 2.20	: Kanatta stall durumu .....	50
Şekil 2.21	: Kanatta oluşan açılar ve sürüklenme-kaldırma kuvvetinin x-y düzleminde gösterimi.....	50
Şekil 2.22	: Rotor-jeneratör oranlarına göre enerji üretim miktarları .....	53
Şekil 3.1	: Marmara bölgesi ortalama rüzgar hızları .....	54
Şekil 3.2	: Değişken ve sabit hızlı rotorların farklı rüzgar hızlarına göre mevcut rüzgar enerjisinden faydalanma yüzdeleri .....	58
Şekil 3.3	: İdeal rüzgar türbini güç eğrisi .....	60
Şekil 4.1	: Hücum açısının kaldırma katsayısı ve $C_L/C_D$ oranına göre değişimi....	65
Şekil 4.2	: Tasarlanan giriş uzunluğu ve yarıçap değişimi.....	65
Şekil 4.3	: Kanat profilinin kalınlığının yarıçapa göre değişimi .....	65
Şekil 4.4	: Kanat düzlemindeki burulma açısı ve yarıçap değişimi .....	66
Şekil 4.5	: Eksenel indüksiyon faktörü.....	66
Şekil 4.6	: Kaldırma/Sürüklenme oranı .....	66
Şekil 4.7	: Orijinal tek hat şeması .....	67
Şekil 4.8	: Konverter sisteminin global taslağı .....	68
Şekil 4.9	: Tasarlanan türbinin güç eğrisi .....	69

## TABLO LİSTESİ

<b>Tablo 2.1</b>	: Yenilenebilirliğine Göre Enerji Türleri.....	6
<b>Tablo 2.2</b>	: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması.....	7
<b>Tablo 2.3</b>	: Elektrik enerjisi üretiminde küresel ısınma ve asit yağmurlarına neden olan CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> .....	8
<b>Tablo 2.4</b>	: Rüzgar Türbinlerinin Tarihsel Gelişiminin yıllara göre sıralanması...	11
<b>Tablo 2.5</b>	: Rüzgar türbinlerinin güçlerine göre sınıflandırılması.....	13
<b>Tablo 2.6</b>	: Ortalama kanat boylarına göre türbinin maksimum güç çıkışı.....	25
<b>Tablo 2.7</b>	: Kutup sayılarına ve şebeke frekansına göre jeneratör devir sayıları...	32
<b>Tablo 3.1</b>	: Jeneratör seçiminde kutup sayısı ve dönüş hızı .....	58
<b>Tablo 4.1</b>	: 500kW'lık rüzgar türbininin üç farklı rüzgar hızındaki kanat çapı.....	61
<b>Tablo 4.2</b>	: Belirli bir rüzgar hızına göre kanat çapı ve üretilen maksimum güç...	62
<b>Tablo 4.3</b>	: Kanat tasarım parametreleri .....	67
<b>Tablo 4.4</b>	: Bulunan tasarım parametreleri .....	70
<b>Tablo 4.5</b>	: 500 kW kapasiteli SoyutWind marka rüzgar türbini özellikleri	

## SEMBOL LİSTESİ

<b>a</b>	: Eksenel indüksiyon faktörü
<b>A</b>	: Rotor süpürme alanı (m <sup>2</sup> )
<b>B</b>	: Kanat sayısı
<b>c</b>	: Kanat giriş mesafesi (m)
<b>C<sub>D</sub></b>	: Sürüklenme kuvveti katsayısı
<b>C<sub>L</sub></b>	: Kaldırma kuvveti katsayısı
<b>C<sub>P</sub></b>	: Kanat verim faktörü (güç katsayısı)
<b>D</b>	: Sürüklenme kuvveti
<b>E</b>	: Enerji (kWh)
<b>f</b>	: Frekans (Hz, 1/s)
<b>F<sub>i</sub></b>	: Uç kayıp faktörü
<b>L</b>	: Kaldırma kuvveti
<b>m</b>	: Hareket halindeki havanın birim zamandaki kütlesi (kg)
<b>N</b>	: Rotor rotasyonel (dönme) hızı (rpm) ; Jeneratör verimi
<b>P</b>	: Güç (watt)
<b>P<sub>k</sub></b>	: Rotor kanatlarının yakaladığı mekanik güç (watt)
<b>P<sub>ort</sub></b>	: Üretilen ortalama güç (watt)
<b>P<sub>w</sub></b>	: P <sub>wind</sub> (Rüzgarın içerdiği güç miktarı)
<b>R</b>	: Rotor çapı (m)
<b>r</b>	: Rotor yarıçapı (m)
<b>Re</b>	: Reynolds sayısı
<b>s</b>	: Yarıçapın yarısı (m)
<b>V</b>	: Rüzgar hızı (m/s)
<b>V<sub>a</sub></b>	: Görünür rüzgar hızı (m/s)
<b>V<sub>i</sub></b>	: Rüzgarın rotor kanatlarına girmeden önceki hızı (m/s)
<b>V<sub>k</sub></b>	: Rotor kanatları düzlemindeki rüzgar hızı (m/s)
<b>V<sub>o</sub></b>	: Rotor kanatlarının çıkışındaki rüzgâr hızı (m/s)
<b>V<sub>ort</sub></b>	: Ortalama rüzgar hızı (m/s)
<b>V<sub>T</sub></b>	: Türbin hızı (m/s)
<b>α</b>	: Hücum açısı (°)
<b>α<sub>opt</sub></b>	: optimum hücum açısı
<b>α<sub>1</sub></b>	: relatif hız vektörü ile profil giriş hattı arasındaki açı
<b>α<sub>D</sub></b>	: tasarım hücum açısı (°)
<b>β</b>	: Rotor eğim (bükülme) açısı (°)
<b>Φ</b>	: Esmeye açısı; kanat burulma açısı (°)
<b>η</b>	: jeneratör verimi
<b>ρ</b>	: Hava yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> ),
<b>λ</b>	: Uç hız oranı
<b>λ<sub>opt</sub></b>	: optimum uç hız oranı
<b>λ<sub>i</sub></b>	: Yerel hız oranı
<b>γ</b>	: Kaldırma/Sürüklenme kuvveti oranı
<b>ω</b>	: Rotor açısal hızı (rad/s)
<b>ω<sub>m</sub></b>	: kanat mekanik açısal hızı (rad/s)
<b>Ω</b>	: Rotorun açısal hızı

## ÖZET

### Rüzgar Enerjisi Sistemlerinde Optimizasyon

Enerji, insanlığın varoluşundan bugüne kadar hayatın vazgeçilemez bir parçası olmuştur. Özellikle elektrik enerjisi, günümüzde tartışmasız bir öneme sahiptir. Gelişen teknolojiye paralel olarak ortaya çıkan çağdaş gereksinimlerden dolayı gün geçtikçe artan elektrik enerjisi ihtiyacı, elektrik üretiminde kullanılan fosil yakıt kaynaklarının sınırlı ve yakın zamana kadar tükenecek olması (atom enerjisinin kaynağı olan uranyumun 50 yıl, petrolün 44 yıl, doğal gazın 64 yıl ve kömürün de 185 yıl sonra tükenecek olması tahmin ediliyor), bu kaynaklardan elektrik üretirken çevreye verilen zararlar ve bu zararların küresel ısınmanın en büyük sebebi olması, insanoğlunu yeni enerji kaynakları aramaya itmiştir. Bunun sonucunda doğal (yenilenebilir) enerji kaynaklarına yönelme olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynakları tüm dünyada giderek artan bir ilgi ile karşılanmakta ve enerji gereksiniminin karşılanmasında önemli kaynaklar olarak görülmektedir.

Elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi kullanımı, dünya genelinde ve ülkemizde artmaktadır. Rüzgar enerjisi santrallerinin kullanımının ve kapasitesinin artmasıyla, rüzgar türbinlerinden elde edilen gücün kalitesi önem kazanmıştır. Güç kalitesinin artması için türbin, kurulacak bölgeye ve bölgenin rüzgar şartlarına uygun şekilde tasarlanmalı ve optimizasyonu yapılmalıdır. İlk kez 1891'de Danimarka'lı mühendis Paul Lacour'un rüzgar türbininden elektrik elde etmesinden bu yana geçen süre içinde rüzgar türbinlerinde değişik tasarımlar ve farklı kombinasyonlar kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında, rüzgar enerjisinden elektrik üretim sistemleri, rüzgar türbinleri ve tasarım parametreleri ayrıntılı olarak incelenmiş, Marmara bölgesinde etkin çalışabilecek, bu bölgelerin rüzgar şartlarına uygun yatay eksenli bir rüzgar türbini tasarımı yapılmıştır. Rüzgardan enerji elde etme prensipleri ve rüzgar türbinlerinin tarihsel gelişimi anlatılmış, yatay eksenli rüzgar türbinlerinde güç üretimini ve rotor boyutlarını etkileyen faktörler açıklanmıştır. Buradan yola çıkarak, rüzgar türbini tasarımındaki faktörler belirtilmiştir. Rotor boyutları hesaplama yöntemleri ayrıntılı olarak ele alınmış ve rotor tasarımı için gerekli hesaplar yapılmıştır. Hesaplamalarda ve parametrelerin belirlenmesinde bazı kabuller yapılmıştır.

Bölgenin ortalama rüzgar hızının, Kocaeli Meteoroloji Müdürlüğü aylık rüzgar hızı verilerine göre orta kuvvette ve sayısal olarak 7.8 m/s olduğu belirlenmiş, bu rüzgar hızına uygun jeneratör seçimi ve rotor, kanat, kule boyutlarının hesapları yapılmıştır. Bölgenin rüzgar hızı orta verimli olduğundan orta güçlü 500 kW gücünde rüzgar türbini tasarımı için gerekli hesaplar yapılmıştır.

## **SUMMARY**

### **Optimization of the Wind Power Systems**

Energy has been an indispensable part of life so far from human existence. Especially electrical energy today has an important dispute. Because of; electricity consumption increasing day by day parallel to technological developments, fossil fuels used in the electricity generation will be exhausted till near future (it is estimated that uranium will 50 years, oil 44 years, natural gas 64 year and coal 185 year later be exhausted), bringing damage during electricity generation from these fuels, and these damages are a major cause of global warming and climate changes, people have begun to seek new energy sources. As a result of this seeking, people are tending to nature (renewable) resources because renewable sources are boundless and nonpolluting energy sources. Renewable energy sources are being interested worldwide and considered as important energy sources for meeting the demands for electricity and other energy demands.

One of renewable energy sources of wind energy usage is growing worldwide and Turkey for electricity generation. As increase in wind farm installation and their capacity, generated power's quality become an important parameter. To improve the power quality, wind turbine should be designed and optimized for where it will be installed and that region's wind capacity. From 1891, when Danish engineer Paul LaCour first generated electricity from a wind turbine, to today different designs and combinations are used in the wind turbines.

In this thesis, systems of power generation from the wind energy, wind turbines and design parameters are analysed in detail and a horizontal axis wind turbine was designed that will operate in the Marmara region sufficiently and suitably for wind conditions of this region. Principles of power generation from wind and wind turbines historical development are explained, and the factors influencing the power and dimensions of horizontal axis wind turbines are explained. From this, the most important factors for design of a wind turbine are identified. Calculation of rotor dimensions analysed in detail and calculations for rotor design were performed. Some acceptances were taken into account for calculations and determination of the parameters.

Wind velocity of this region is in a medium level and numerically average 7.8 m/s according to the data from the meteorology station of Kocaeli. Generator and rotor selection and tower size were selected in accordance to the site's wind conditions. Because of the site's wind capacity is in a medium level, 500 kW capacity (medium power range) wind turbine was designed with necessary calculations.

## 1. GİRİŞ

Enerji kaynaklarının üretilmesinden tüketilmesine kadar her aşamada karşılaşılan en önemli engel çevre sorunudur. Elektrik üretiminde iki tür kaynak kullanımı mevcuttur: Birincisi; yenilenemeyen kaynaklar olan fosil yakıtlardan kömür, doğalgaz ve petrol, nükleer enerji; ikincisi ise yenilebilir doğal enerji kaynakları olan rüzgar, güneş, deniz, jeotermal, hidroelektrik enerjisidir.

2008 yılı sonu verilerine göre dünya genelinde elektrik üretiminde %70 oranında fosil yakıtlar olan kömür, petrol ve doğalgaz; %15 nükleer; %16 hidrolik ve %2 yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Ülkemizde ise çoğunluğa sahip fosil yakıtlar %68, hidrolik kaynaklar % 32, yenilenebilir kaynaklar % 1.68 oranında kullanılmaktadır (Elektrik Üretim A.Ş. - EÜAŞ). Bu oranlardan görüldüğü gibi hem ülkemizde hem de dünya genelinde elektrik üretiminde fosil yakıtların egemenliği vardır. Bu yüzden, elektrik üretilirken bir yandan da atmosfere zararlı gazlar salınmaktadır. Çevre kirlenmesinin nedenlerinden üçte birinin elektrik üretiminden kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu da küresel ısınmanın ve dünyadaki iklim değişikliklerinin en büyük nedenidir. Her ülkenin kendi doğal enerji kaynaklarına yönelmesiyle küresel ısınma yavaşlayacak ve önemli bir dünya sorunu ortadan kalkabilecektir. Örneğin, 1 kWh rüzgar elektriği; fosil yakıt kullanılarak elde edilen 1 kWh elektrik enerjisi ile karşılaştırıldığında, ortalama olarak 750-1250 gr karbondioksit, 40-70 gr kül, 5-8 gr kükürtdioksit, 3-6 gr azotoksit salınımını engellemektedir.

Üç tarafı denizlerle çevrili olan Türkiye, yenilebilir enerji kaynakları bakımından, özellikle rüzgar enerjisi bakımından, çok zengindir. Ülkemizdeki toplam rüzgar potansiyeli Enerji Bakanlığı verilerine göre 88 bin MW civarındadır. Bunun 8 bin MW'ı çok verimli, 40 bin MW'ı verimli sınıfındadır. Türkiye'nin elektrik üretiminde toplam kurulu gücü, 2009 yılı sonu itibarıyla 44,556 MW, tüketimi ise 207 milyar kWh

olmuştur (Enerji Bakanlığı). Ülkemizin verimli rüzgar potansiyelinin 48 bin MW olduğu gözönüne alınırsa, gerekli teknik hesaplamalar yapıldığında, elektrik ihtiyacımızın %55'ini rüzgar enerjisinden sağlayabileceğimiz görülmektedir. Böylece temiz, ucuz ve kaynağı tükenmeyen bir enerjiden kendi elektriğimizi üretmiş olacağız. Ayrıca elektrik üretiminde ve tüketiminde dışa bağımlılığımızı en aza indirebileceğiz.

Fosil kökenli yakıtların rezervlerinin azalması, hava kirliliği, asit yağmurları ve sera etkisi şeklinde ortaya çıkan çevresel sorunlar nedeni ile birlikte gelecekteki enerji açığı tehlikelerini önleyebilmek amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Fosil yakıtların şu anda tüketim hızı dünyada doğal fosil oluşum hızının 300,000 katıdır. Diğer bir deyişle, bir günde bin yıllık oluşumu tüketilmektedir (M.T.Gençoğlu, M.Cebeci, 2001). Ayrıca, fosil yakıtların fiyatlarındaki önlenemez yükselme ile birlikte Dünya Ulusları bakışlarını kendi öz kaynaklarına çevirmiştir.

Türkiye'de enerji ihtiyacı yıllık ortalama % 8 oranında artmaktadır. Artan enerji ihtiyacının ucuz, güvenilir ve sürekli olarak karşılanması, çevreye verilen zararın azaltılması gerekmektedir. Son dönemde, ülkemizde de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı konusundaki çalışmalar hızlanmıştır. Özellikle rüzgar enerjisinden elektrik üretim santrallerine yatırımlar artmaktadır. Günümüzde kullanımı ve teknolojisi en hızlı gelişen yenilenebilir enerji kaynağı rüzgar enerjisidir. Kullanımının yüksek olmasının nedenlerinden bazıları, diğer yenilenebilir kaynaklara göre maliyetinin daha düşük olması, kurulumunun daha kolay olması, santralin yapıldığı alanda arazinin sadece % 1'ini işgal etmesi ve geri kalan % 99'luk bölümün başka faaliyetler için kullanılabilmesi (tarım, piknik, gezi vb.) vardır.

Türkiye'de Marmara ve Ege kıyı şeridi, sürekli ve düzenli rüzgar alan bölgelerimizdir. Bu bölgelerdeki rüzgar verimli sınıfındadır. Türkiye'de 2008 yılı sonu verilerine göre işletmede 433.35 MW kurulu gücünde rüzgar santrali bulunmaktadır. İnşa halinde ise 402.40 MW gücünde rüzgar santrali bulunmaktadır. Ülkemizin elektrik üretiminde toplam kurulu gücünün 41100 MW olduğunu göz önüne alırsak, rüzgardaki toplam kurulu güç miktarının az olduğu anlaşılır.

Artan rüzgar enerjisi kullanımı, rüzgardan elektrik üretim sistemlerinin verimli kullanımı konusundaki çalışmaları artırmaktadır. Rüzgardan elektrik üretimini sağlayan makinelere rüzgar türbini denilmektedir. Rüzgar türbini teknolojisi aerodinamik, mekanik, meteoroloji ve elektrik mühendisliği disiplinlerini içinde barındıran bir konudur. Rüzgar türbininin, kurulacak bölgeye göre tasarlanması ve optimizasyonunun yapılması, rüzgar enerjisinin verimli kullanılmasında en büyük etkidir.

Bu tez çalışmasının amacı, ülkemizde ve dünya genelinde hızla artan rüzgar enerjisi santrallerinin teknolojisini ayrıntılı olarak incelemek, bölgeye özel tasarım mantığını araştırmak, mevcut sistem üzerinde incelemeler yaparak türbinin kurulacağı bölgeye uygun bir optimizasyonunu sağlamak ve mühendislerin rüzgar enerjisi konusunda kullanabileceği, somut örneklerle desteklenmiş bir çalışma ortaya koymaktır. Bölge olarak Marmara Bölgesi seçilmiş ve bu bölgede verimli şekilde çalışabilecek ve kurulabilecek bir rüzgar türbini tasarlanması amaçlanmıştır. Marmara bölgesinin rüzgar potansiyeli incelenmiş ve hangi tipte ve hangi büyüklükte türbin kullanılabileceği belirlenmiştir. Yapılan kabullerle orta ölçekte 500 kW'lık rüzgar türbini tasarımı yapılması amaçlanmıştır.

Genel anlamda rüzgar enerjisi, rüzgar türbinleri ve türbin tasarımı konusunun incelendiği, özelde ise Marmara Bölgesi örneğinin ele alındığı bu tez çalışmasında izlenen yöntem; enerji, enerji türleri, rüzgar enerjisi ve bunu kullanarak elektrik üretimi sağlayan rüzgar türbinleri ve türbin tasarımı ile ilgili teorik bilgiler vermek, bu bilgileri kullanarak Marmara bölgesinde verimli çalışabilecek bir türbin tasarımı örneği vermektir. Bu doğrultuda öncelikle, gerek bir çok üniversite kütüphanesinde, gerekse internet üzerinde geniş kapsamlı bir literatür araştırması yapılmıştır. Bunlara ek olarak, birçok mühendis, akademisyen ve bu konuda araştırma yapmış veya çalışan çeşitli kişilerin makalelerine başvurulmuştur.

## **2. GENEL KISIMLAR**

### **2.1. ENERJİNİN TANIMI**

Enerji, fizik biliminde, bir maddenin iş yapabilme yeteği ve depolanan iş olarak tanımlanır. Enerji, potansiyel enerji ve kinetik enerji olmak üzere iki çeşittir. Potansiyel enerji, cisimlerin bir alanda buldukları fiziksel durumlardan ötürü depoladığı kabul edilen enerjidir. Kinetik enerji, hareket eden cisimlerin sahip olduğu enerji şeklidir. Bir cismin kinetik enerjisi ne kadar büyükse cisim o kadar büyük iş yapar.

### **2.2. ENERJİNİN KULLANIMI**

18. yüzyıla kadar, hemen hemen tüm enerji yerel olarak su ve rüzgar gücünden yararlanma, odun, kömür, bitki artıkları, gübre, hayvan ve insan gücü gibi doğal enerji kaynaklarından tedarik edilmiştir. 16. yüzyılda kömür'ün büyük miktarda toprak altından çıkarılarak kullanıma girmesiyle, enerji kullanımında önemli bir artış olmuştur. Odunun yerine kömürün kullanılmasıyla, ısı enerjisinin kullanımında verim artmıştır. Kömürden elde edilen yüksek sıcaklıktaki ısı enerjisi ile insanoğlu, daha önceleri ergitip işleyemediği madenleri de büyük çapta işleme olanağı bulmuş, yeni metal işleme teknikleri geliştirerek sanayi devrimi olarak adlandırılan döneme girmiştir. Aynı zamanlarda buhar makinesi keşfedilmiştir. Daha sonraları 19. yüzyılda ısı biliminin yanında elektrik ve mıknatısla ilgili bilimsel bulguların yaygınlaşması ve uygulama alanlarına girmesiyle enerji kullanımı üst seviyeye çıkmış ve çevre kirliliği başlamıştır. 19.yüzyıl, bugün insan oğlunun teknolojik ürünlerin çoğunun geliştirildiği ve enerji kullanımının büyük ölçüde arttığı bir yüzyıl olmuştur. 20.yüzyıla gelindiğinde, insanoğlu hem 19.yüzyılda bulup geliştirdiği teknoloji ürünlerini kullanmayı daha da

yaygınlaştırmış, hem de bu ürünlere yenilerini eklemiştir. Artık daha güçlü makineler yapılmaya başlanmış, dolayısıyla daha fazla enerji kullanımı başlamıştır. Bunun sonucu da gerek kömür, gerekse petrol tüketimi hızla artarak çevre kirliliğine zemin hazırlamıştır.

Sanayileşme süreci ile çok yakın bağlantılı olarak çocuk ölümlerinde düşüş, ortalama yaşam süresinin uzaması, sağlık hizmetlerinde iyileşmeler ve buna bağlı olarak nüfus artışı gerçekleşmiştir. Nüfus artışıyla beraber tüketim artmış ve buna bağlı olarak çevre kirliliği artış göstermiştir. Günümüzde yaklaşık 5,5 milyar olan dünya nüfusunun 21. yüzyılın sonlarına doğru hızla artarak 10-12 milyar olacağı tahmin edilmektedir. Bununla beraber insanların yaşam düzeylerini sürekli yükseltmeleri, dünyanın enerji gereksinimini de sürekli artırmaktadır.

Özetle, insanoğlunun ateşle başlayan enerji kullanımı 20.yüzyılda doruklara çıkmış ve yanında bir çok sorun da getirmiştir. Kalkınma ve buna bağlı olarak enerji kullanımı artarak sürecektir. Ülkelerin ekonomik kalkınma düzeylerine göre enerji tüketim miktarları incelendiğinde, gelişmiş ülkelerdeki birey başına enerji tüketiminin, gelişmekte olan ülkelerdeki tüketimin on katından fazla olduğu tespit edilmiştir. Bununla beraber insanların yaşam düzeylerini sürekli yükseltmeleri, dünyanın enerji gereksinimini de sürekli artırmaktadır. Artan enerji ihtiyacını temiz enerji kaynaklarından sağlamak, küresel ısınmaya engel olabilecektir.

### **2.3. ENERJİ KAYNAKLARI**

Enerji ihtiyacını karşılamada kullanılan enerji kaynakları; dünyanın var olma süresi referans alındığında, yenilenebilir ve yenilenemeyen kaynaklar olmak üzere ikiye ayrılır. Dünyadaki enerjilerin kaynağı güneş enerjisi olup, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları enerjisini güneşten doğrudan veya dolaylı olarak almakta ve dolayısıyla bu kaynaklar sürekli olarak yenilendiklerinden tükenmemektedirler. Kömür, doğalgaz, petrol gibi fosil yakıtlar ve nükleer enerji gibi kaynaklar kullanıldıkça tükenir ve yenilenmesi çok uzun zaman aldıkları için yenilenemez enerji kaynağı olarak tanımlanırlar.

**Tablo 2.1** Yenilenebilirliğine Göre Enerji Türleri

<b>Yenilenemeyen Enerji Kaynakları</b>	<b>Yenilenebilir Enerji Kaynakları</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kömür, petrol, doğalgaz, nükleer ‘den elde edilen enerji</li> <li>• Kullanıldıklarında zararlı gazlar üreterek atmosferi ve çevreyi kirleterek küresel ısınmaya neden olur</li> <li>• Yakın zamanda tükenenlerdir</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Güneş, rüzgar, su (hidrolik), deniz akıntısı, dalga, jeotermal, biyokütleden elde edilen enerji</li> <li>• Çevreye hiçbir zararları olmaz,</li> <li>• Dünya ve güneş var olduğu sürece tükenmeyeceklerdir</li> </ul>

### 2.3.1. Yenilenemeyen Enerji Kaynakları

Yenilenemeyen enerji kaynakları, adından belli olduğu gibi doğa tarafından yenilenemeyen, daha doğrusu yenilenmesi çok uzun zaman alan ve zamanı gelince tükenen olan (dünyadaki petrol rezervleri 40 yıl, doğalgaz rezervlerinin 65 yıl ve kömür rezervleri 150 yıl sonra tükeneceği tahmin edilmektedir) fosil yakıtlardır. Bunlar kömür, petrol, doğalgaz ve atom enerjisidir. Fosil yakıtların yakıldıkları anda çevreye ve atmosfere yaydığı zararlı gazlardan CO<sub>2</sub>, sera gazı etkisi yapıp küresel ısınmaya ve bu da küresel iklim değişikliklerine neden olmaktadır. Fosil yakıt emisyonları arasında SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> ve çeşitli organik bileşikler, kurum ve partikül maddeler sayılabilir. Özellikle ormanların giderek azalmasıyla fosil yakıtlardan kaynaklanan havadaki CO<sub>2</sub>’in diğer zararlı gazlarla birlikte sera etkisi yaparak, güneş ışınlarını yeryüzüne yakın bir yerde tutması ve bu suretle yerküreyi ısıtıp iklimi değiştirmekte olduğu artık kabul edilmektedir.

### 2.3.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları, dünya var oldukça kendini yenileyen, tükenmeyen enerji kaynaklarıdır. 1970’li yıllarda ortaya çıkan petrol krizi, nükleer enerji santrallerine karşı oluşan toplumsal tepkiler ve fosil yakıtlarının kullanımı sonucu ortaya çıkan sera gazları olarak adlandırılan karbondioksit, metan ve azotoksit gazlarının atmosfere salınımıyla

oluşan çevre kirliliği; bilim insanlarını yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirmeye itmiştir. Bugünkü enerji kullanım biçiminin devam etmesi durumunda, atmosferdeki karbondioksit gazı miktarı, 2030 yılında ikiye katlanarak; atmosfer sıcaklığının 2.5°C, deniz seviyesinin ise yaklaşık 18 cm artmasına neden olacaktır (C.Seçkin AKSAY, O.KETENOĞLU, L.KURT - Küresel Isınma ve İklim Değişikliği). Bu da, yiyecek sıkıntısının doğması ve kıyılarda yaşayan binlerce insanın göç etmesi anlamına gelmektedir. Bu sorunlar, çevre dostu yenilenebilir enerjinin önünü açmıştır. Yenilenebilir enerjilerin çoğu direkt ya da endirekt olarak güneşten kaynaklanır. Yenilenebilir enerji kaynakları ve dönüşümleri Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.2** Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması (Yenilenebilir enerji kaynakları sempozyumu, İzmir 2001)

Ana Kaynak	Birincil Enerji Kaynakları	Doğal Enerji Dönüşümü	Teknik Enerji Dönüşümü	Kullanım Enerjisi
Güneş	Su	Buharlaşıma, Yağış	Su Güç Tesisleri (Hidroelektrik Santralleri)	Elektrik Enerjisi
	Rüzgar	Atmosferdeki Hava Hareketi	Dalga Enerjisi Tesisleri	Elektrik ve Mekanik Enerji
		Dalga Hareketi	Isı Pompaları	Elektrik ve Mekanik Enerji
	Güneş ışınları	Yer ve Atmosferin Isınması	Isı Pompaları	Isı Enerjisi
		Güneş Işınları	Kollektörler	Isı Enerjisi
			Solar Hücreler (Güneş Pilleri-Fotovoltaikler)	Elektrik Enerjisi
	Biyomas	Biyomas Üretimi	Isı Güç Tesisleri	Isı ve Elektrik Enerjisi
Dönüşüm Tesisleri			Yakıt Enerjisi	
Dünya	Yer Merkezi Isısı	Jeotermal Enerji	Jeotermal Güç Tesisleri	Isı ve Elektrik Enerjisi
Ay	Ay Çekimi Gücü	Gel-Git Olayı	Gel-Git Güç Santraller	Elektrik Enerjisi

Dünyada büyük ölçüde yenilenemeyen enerji kaynaklarının kullanılıyor olması, çevre sorunlarını önemli ölçüde artırmıştır. Bu nedenle çevresel etkileri az olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik her bakımdan avantajlı olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının hava kirliliğine etkisi Tablo 2.3’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.3** Elektrik enerjisi üretiminde küresel ısınma ve asit yağmurlarına neden olan CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> emisyonları

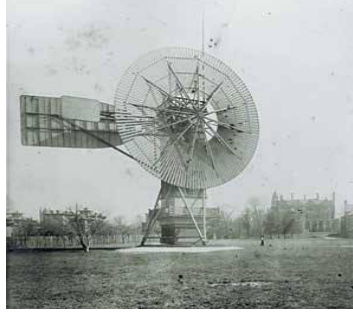
Enerji kaynağı	CO <sub>2</sub> (kg/1000 kWh)	SO <sub>2</sub> (kg/1000 kWh)	NO <sub>x</sub> (kg/1000 kWh)
Kömür	963	0.62	3.6
Doğalgaz	608	0.0032	2.1
Petrol	890	5.58	1.6
Rüzgar	0.0	0.0	0.0

[Kaynak: Çağlar, M., Canbaz M., “Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli”, IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul, 2002]

## 2.4. RÜZGAR ENERJİSİ VE KULLANIMI

İnsanlık yel değirmenlerinden, modern rüzgar santrallerine doğru uzanan teknolojik bir süreç yaşamıştır. Elektriğin keşfedilmesinden sonra teknolojik süreçler hızla ilerlemiştir. Elektrik kullanımıyla elektriğin üretildiği kaynaklar da zaman içinde önem kazanmış ve en çok tartışılan enerji konularının başına geçmiştir. Yüzyıllardır insanlığa hizmet eden rüzgar enerjisi, Ortaçağ Avrupası’nın da sembolü haline gelen yel değirmenlerinde kullanılmış; 1890’larda yine Avrupa’da rüzgar türbinlerinde elektrik enerjisine çevrilerek sonraki yıllarda kullanıma sunulmuştur. Binlerce yıldır teknelerin yelkenini şişiren, mısır ve buğday öğütmekte kullanılan rüzgar enerjisi, artık ortak enerji üretimi için esmektedir. 1970’lerdeki petrol kriziyle başlayan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim, günümüzde rüzgar enerjisi alanında büyük isimler haline gelen Danimarka, Almanya ve İspanya başta olmak üzere Avrupa ve Amerika’da dev bir enerji sektörüne dönüşümle sonuçlanmıştır. CO<sub>2</sub> emisyon oranı hemen hemen sıfır olduğu için küresel ısınmayı engellemeye yardımcı olan rüzgar enerjisi, bugün en hızlı büyüyen ve en ekonomik alternatif enerji kaynağı olarak konvansiyonel enerji kaynaklarıyla yarışabilir durumdadır. Elektrik üretilirken çevreye verilen zararlar, dünyadaki küresel ısınmanın ve iklim değişikliklerinin en büyük nedenlerinden biri olmuştur. Bunu önlemede, fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ilk çözüm olarak düşünülmektedir. Bu kaynaklardan rüzgar enerjisi dünyada en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Teknolojisinin gelişmesi, diğer kaynaklara göre kurulumunun kolay olması, maliyeti daha az olması, kurulan arazide daha az yer işgal etmesi gibi avantajları, rüzgar enerjisine talebi artırmıştır.

Rüzgar gücü, güneş enerjisinin dolaylı bir şeklidir. Bu güç, yeryüzünün her bölgesinin eşit şekilde ısınması ve buna bağlı olarak oluşan alçak ve yüksek basınç merkezlerinin karşılıklı etkileşim sürecinin eseridir. İlk olarak 1891 yılında Danimarkalı mühendis Paul la Cour'un inşa ettiği rüzgar enerjisinden elektrik üreten rüzgar türbinin keşfi ile rüzgardan elektrik üretimi başlamıştır. Rüzgarın kinetik enerjisinden rüzgar türbini aracılığıyla elektrik enerjisi elde edilmektedir.



**Resim 2.1** Dünyanın ilk otomatik çalışan elektrik üreten rüzgar türbini, Cleveland'da 1888 yılında Charles F. Brush tarafından yapılmıştır. Gücü 12 kW, ağırlığı 4 ton, yüksekliği 18 m, rotoru 17 m çapındadır. Dinamo, kanatların her dönüşünde 50 kez dönerek 34 hücreli aküyü şarj etmişti. Üretilen bu elektrik; 350 akkor lamba, 2 ark lambası ve Brush'ın evinde bulunan birkaç motorun elektrik ihtiyacını 20 yıl boyunca karşılamıştır.

#### 2.4.1 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminin Tarihi

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



**Resim 2.2** Poul la Cour test rüzgar türbini, Danimarka, 1897

1918 yılı sonrasında büyük şehirler elektriğe kavuşmuş ve dizel yakıtların ucuzluğu nedeniyle rüzgar enerjisini değerlendirme çabaları, bir kenara bırakılmıştır. Rüzgar enerjisinin bu bir kenara itilmişliği, enerji sıkıntısı nedeniyle 2.Dünya Savaşı'na kadar sürmüştür. Endüstri devrimi gerçekleşince, elektrik üretmek için daha büyük rüzgar türbinleri gerekmiştir. Paul la Cour'un ilk rüzgar türbinininden sonra 1930'ların sonlarında ABD'li mühendisler son teknolojileri ile megawatt boyutunda rüzgar türbini üretmeyi planlamışlardır. Bu çalışmanın sonucunda 1941 yılında 1.25 MW kapasiteli Smith-Putnam rüzgar türbini ortaya çıkmıştır (Resim 3.3). O yıldan sonraki 40 yıl boyunca bu türbin dünyanın en büyük rüzgar türbini özelliğini korumuştur.



**Resim 2.3** 1.250 MW kapasiteli Smith-Putnam rüzgar türbini

1970'li yıllardaki petrol krizi nedeniyle rüzgar enerjisine ve bu alanda yatırımlar artmıştır. 1980 sonrasındaki gelişmelerle, Avrupa ve ABD'de rüzgar santralleri ekonomi, çevre ve enerji açısından çağdaş mühendislik ürünleri haline gelmiştir. Rüzgar türbinlerinde seri üretime geçilmesi ile bu alandaki yatırımlar ve türbin teknolojisindeki gelişmeler gün geçtikçe artmış ve rüzgar santralleri kurulmuştur. 1980'li yıllardaki gelişmeler sonucunda seri olarak üretilen ve yaygın olarak kullanılan rüzgar türbini nominal güçleri 600 kW, 750 kW, 1 000 kW, 1 500 kW ve 2 000 kW'dır. Önceleri kara parçaları üzerinde kurulan rüzgar santralleri, daha sonra denizlerin üzerine de (Offshore) kurulmuştur.

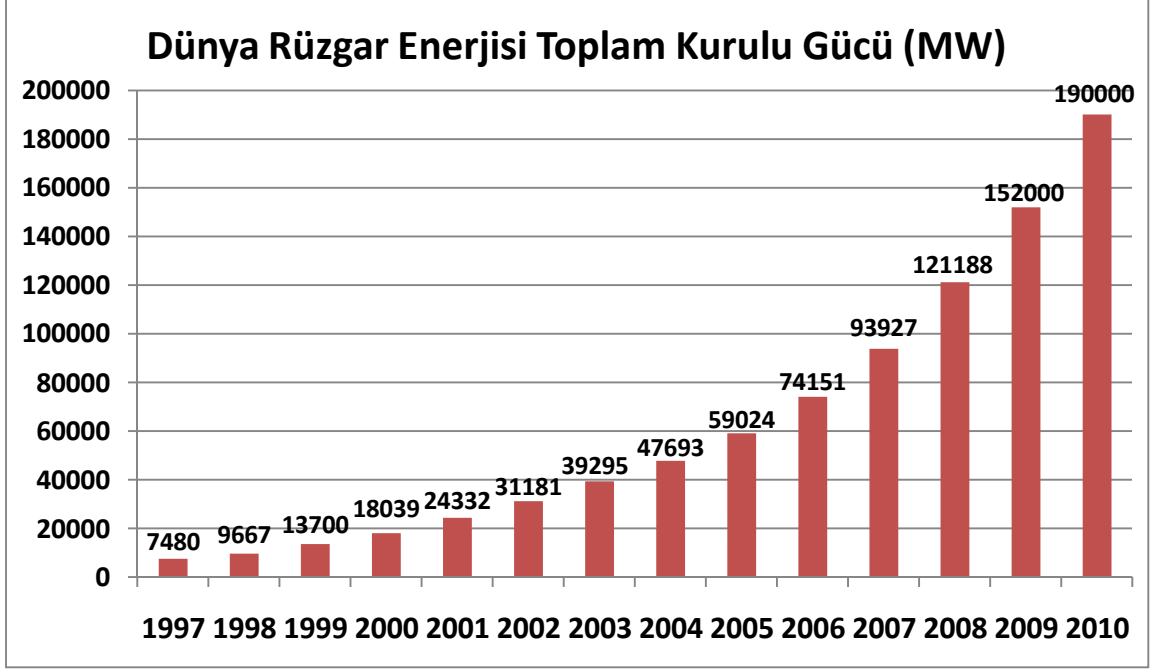
**Tablo 2.4** Rüzgar Türbinlerinin Tarihsel Gelişiminin yıllara göre sıralanması

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

#### 2.4.2 Dünyada ve Türkiyede Rüzgar Enerjisi Kullanımı

Çevresel avantajları ve enerji ekonomisi açısından pek çok ülke, resmi teşviklerle rüzgar enerjisini desteklemektedirler. Bu teşviklerdeki amaç, resmi teşviklerle günümüzdeki fosil yakıtların sahip olduğu üstünlüğü ve çevre sorunlarının elektrik üretimi ile ilgili sebeplerini ortadan kaldırmaktır.

Dünyada rüzgar santrallerinin kurulu gücü hızlı bir artış göstermektedir. Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği raporuna göre (World Wind Energy Report 2009), 1997 yılında 7480 megawatt (MW) olan kurulu güç, sonraki yıllarda hızla artış göstererek 2009 yılı haziran ayı itibariyle dünyadaki toplam rüzgar santralleri kurulu gücü 152 000 MW olmuştur. 2008 yılı toplam kurulu rüzgar gücü, yılda 260 TWh elektrik üretmiştir. Bu miktar dünya elektrik tüketiminin % 1.6'sını karşılamıştır. Şekil 2.1'de yıllara göre rüzgar santralleri kurulu güçleri gösterilmiştir.



**Şekil 2.1** Yıllara göre dünya rüzgar enerjisi santralleri kurulu güçleri (Kaynak: Global Wind Energy Outlook 2009)

2007 yılı sonunda 147 MW'lık rüzgar enerjisi kurulu gücü olan Türkiye, geçen yıl buna eklediği 286 MW kapasiteyle toplamda 433 MW kapasiteye ulaştı. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği'nin (EWEA) verilerine göre, 2007 yılı sonu itibarıyla rüzgar enerjisinde Avrupa'da 16'ncı sırada bulunan Türkiye, 2008 yılı sonunda Belçika ve Norveç'i geride bırakarak 14'üncü sıraya çıktı. Rüzgar enerjisinde Avrupa'da ilk sırayı, 23 bin 903 MW ile aynı zamanda dünya liderliğini sürdüren Almanya alırken, bu ülkeyi 16 bin 754 MW ile İspanya ve 3 bin 736 MW ile İtalya takip etmektedir (Global Wind Energy Council, GWEC, 2009).

### 2.4.3 Rüzgar Enerjisi Dönüşümü Ve Rüzgar Türbinleri

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

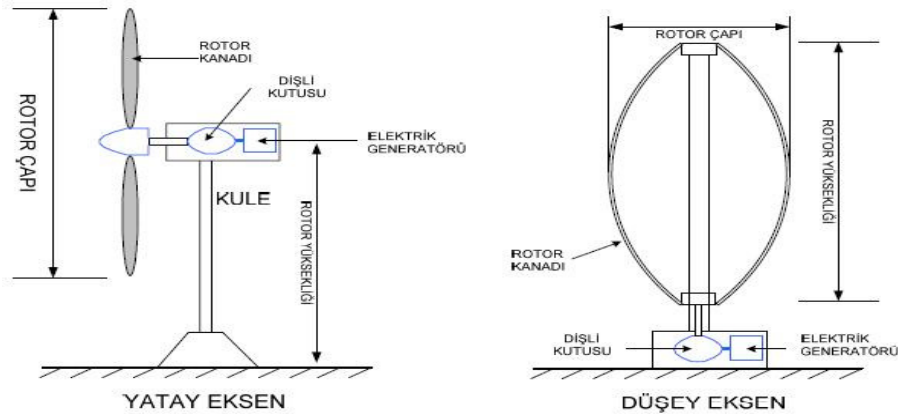
### 2.4.3.1 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılabilirler. En önemli ve piyasada en çok kullanılan sınıflandırma kriteri eksenlerine göre, rüzgar türbinleri eksenlerine göre yatay eksenli ve dikey eksenli türbinler olmak üzere iki çeşittir. Tablo 2.5’de rüzgar türbinlerinin güçlerine göre sınıflandırılması görülmektedir. İlk üretilen rüzgar türbini 12 kW kapasiteliydi. Günümüzde 10 MW kapasiteye kadar rüzgar türbinleri üretilmektedir [American Superconductor Corporation (AMSC)].

**Tablo 2.5** Rüzgar türbinlerinin güçlerine göre sınıflandırılması (M.UYAR ve diğerleri, 2006)

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

Dönme eksenlerine göre yatay eksenli ve dikey eksenli rüzgar türbinlerinin kendi içlerinde çeşitleri vardır. Fakat her iki tip türbin de aynı aerodinamik prensiplerle çalışırlar. Şekil 2.2’de yatay ve dikey eksenli rüzgar türbinlerinin şekilleri gösterilmektedir.



**Şekil 2.2** Yatay ve dikey eksenli rüzgar türbinleri konfigürasyonu

Genel olarak türbin sistemlerinde kullanılan alt sistemler şunlardır;

- Kanatların, göbeğin ve milin (şaft) bağlandığı rotor,

- Fren mekanizması ve jeneratör,
- Denetim ve güvenlik sistemleri,
- Elektrik bağlantıları, hizmet ve destek sistemleri.

#### 2.4.4 Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri

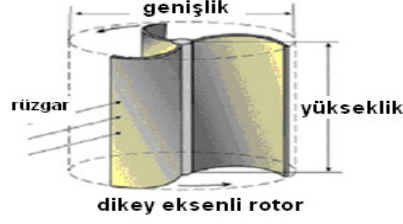
Türbin mili düşey ve rüzgarın geliş yönüne diktir. Savonius tipi, Darrieus tipi ve Giromill tipi çeşitleri vardır. Verimleri yatay eksenli rüzgar türbinlerine göre çok düşük olduğu için ticari kullanımları azdır.

Darrieus tipi rüzgar türbinini, 1931 yılında Fransız mühendis Georges Jean Marie Darrieus, ABD’de tasarlamıştır. Darrieus tipi düşey eksenli rüzgar türbininde, düşey şekilde yerleştirilmiş iki veya daha fazla esnek kanat vardır (Resim 2.4). Kanatlar, türbin mili uzun eksenli olan bir elips oluşturacak biçimde yerleştirilmişlerdir. Kaldırma kuvveti esaslı çalışırlar. Kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşur.



**Resim 2.4** Dünyanın en yüksek dikey eksenli rüzgar türbini, Darrieus tipi, yüksekliği 110m

Savonius rüzgar türbinleri 1920’li yıllardan beri birçok araştırmacı tarafından üzerinde çalışılmıştır. Aerodinamik yapılarından dolayı Savonius türbinleri herhangi bir yönden esen rüzgarı alabilirler ve böylece yüksek başlangıç torkuna sahip olurlar. Savonius rüzgar türbini ilk olarak 1924 yılında Finlandiya’lı mühendis Sigurd Savonius tarafından icat edilmiş olup 1929 yılında patenti alınmıştır. Bu türbinler sürüklenme kuvveti esaslı çalışır. Verimleri yatay eksenli rüzgar türbinlerine göre oldukça düşüktür. Bunun bir sebebi, türbinler toprağa yerleştirildiği için rüzgarı yer seviyesinden almasıdır.



**Şekil 2.3** Savonius tipi rüzgar türbini rotoru

Savonius türbininde akışkan içbükey kanat üzerinde türbülanslı bir yol izler ve burada dönel akışlar meydana gelir. Bu dönel akışlar Savonius türbininin performansını düşürür, bu nedenle elektrik üretiminde pek kullanılmazlar. Daha çok su pompalama amaçlı, havalandırma sistemlerinde ve rüzgar ölçümlerinde kullanılan anemometre olarak kullanılırlar.

Tüm dikey eksenli rüzgar türbinleri değişen rüzgar yönlerinde dönerler. Böylece rüzgarı her bir yönden kabul ederler. Bu tipteki rüzgar türbinlerinin güç kat sayısı 0,15'ten azdır. Bu nedenle güç üretiminde tercih edilmezler.

#### **2.4.5 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri**

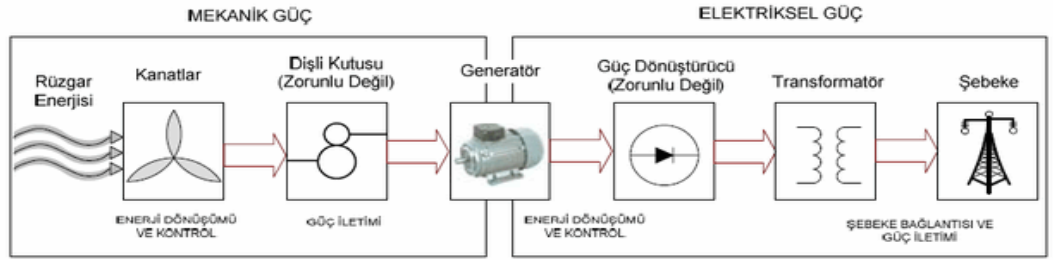
Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde; dönme eksenini rüzgar yönüne paralel, kanatlar rüzgar yönüne diktir. Günümüzde ticari olarak en çok kullanılan rüzgar türbini tipidir. Bu türbinlerde döner kısım olan rotor, rüzgarı en iyi alacak şekilde, döner bir göbek üzerine yerleştirilmiştir. Rotorun amacı, rüzgarın çizgisel hareketini dönme hareketine çevirerek türbin içinde jeneratörün ihtiyacı olan mekanik enerjiyi elde etmektir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık teoride % 59, pratikte % 40 civarlarındadır. Genel olarak yerden en az 20-30m yüksekte ve çevredeki engellerden en az 10m yüksekte olacak şekilde bir kule yerleştirilir. Günümüzde en çok kullanılan tip üç kanatlı olanlardır. Bu türbinler elektrik üretmek için kullanılır.



**Resim 2.7** Elektrik üreten yatay eksenli 3 kanatlı bir rüzgar türbini

#### 2.4.6 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Çalışma Şekli

Türbin rotoru, aerodinamik olarak dizayn edilmiş kanatları vasıtası ile rüzgarın hareket enerjisinin bir kısmını (Betz limitine göre en fazla %59'unu) yakalayarak mekanik enerjiye çevirir. Bu mekanik enerji rotorda (rotor göbeğinde ve göbeğe bağlı olan şaft üzerinde) dönme oluşturur ve şaftın dönü hareketi gövde içerisindeki transmisyon sistemine, oradan jeneratöre aktarılır. Düşük hızlı olan bu mekanik enerji, dişli kutusu yardımı ile jeneratörün ihtiyacı olan yüksek hız seviyesine (düşük devirli jeneratörler için 1500 rpm, yüksek devirli için 3000 rpm değerine) çıkarılır. Eğer jeneratör olarak yüksek kutup sayısına sahip doğrudan tahrikli model seçilirse dişli kutusuna ihtiyaç duyulmaz. Yüksek dönüş hızına sahip mekanik enerjiye çevrilmiş bu enerji jeneratör aracılığı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Üretilen gerilim, rüzgar türbinin yanına veya kulenin içine monte edilmiş transformatöre iletilir. Şebekeye bağlı olan bu transformatör yardımıyla gerilim şebekeye uygun değere yükseltilerek iletim hattına verilir. Sonra yerel elektrik şebekesine elektrik sayacı ve kesici üzerinden bağlanır. Tercih edilen rüzgar enerji sistemi topolojisine bağlı olarak transformatörden önce güç elektroniği üniteleri ile elektrik enerjisi farklı formlarda regüle edilir. Bir rüzgar enerji dönüşüm sisteminin temel safhaları şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi

Modern rüzgar türbinlerinde gerçek enerji dönüşüm aşaması, kanatların birleştiği rotor göbeğine bağlı dönen şaft üzerinde pozitif tork üretmek için kullanılan temel aerodinamik kaldırma kuvvetine dayanır. Bunun sonucunda ilk olarak mekanik enerji üretilir ve sonra bu mekanik enerji jeneratöre ulaştırılarak elektrığe dönüştürülür.

Rüzgarı depolayıp sonraki zamanlarda kullanmak imkansızdır, bu sebeple rüzgar türbinleri anlık rüzgar hızına göre enerji üretir. Rüzgar hızı değişken olduğu için rüzgar

türbinlerinin üretimleri dalgalıdır. Rüzgar yoksa veya çok düşükse (küçük türbinler için 2m/s, büyük türbinler için 3-4m/s'den az ise) enerji üretimleri durur. Aynı mantıkla çok yüksek rüzgar hızlarında (genellikle 25m/s'den yüksek olan rüzgarlarda) türbindeki kontrol sistemleri türbinin çalışmasını durdurarak türbinin hasar görmesini ve aşırı enerji üretiminin sebep olduğu diğer tehlikeleri önler.

Küçük sistemlerde (örneğin ev tipi), rüzgarın ürettiği elektriği depo edecek akü sistemleri, destekleyici jeneratör ve enerji çıkışının düzenli olması için özel kontrol sistemleri bulunur. Şebekeye bağlı olmayan küçük sistemlerde, kullanılmayan enerji akülerde depolanarak daha sonraki kullanımlar için muhafaza edilir, şebekeye bağlı çalışıyorsa fazla enerji şebekeye verilir. Fakat daha büyük sistemlerde elektrik depo edilemeyecek seviyede olduğu için akü gibi depolama elemanları yoktur ve üretilen elektrik o anda şebekeye verilir. Bu yüzden türbinin kurulacak bölgenin rüzgar hızına göre tasarlanması ve kontrolü çok önemlidir.

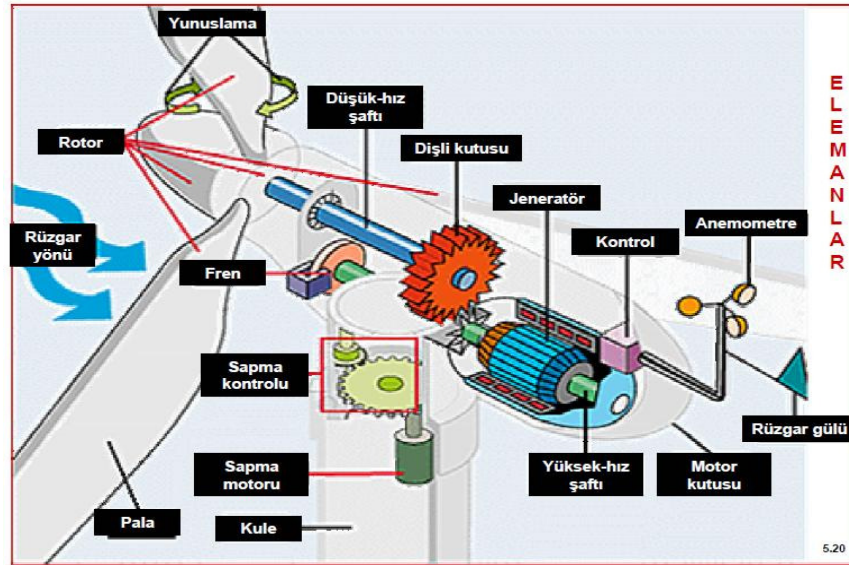
Rotorun dönmesi ise şu şekilde gerçekleşir: Rüzgar kanatın iki tarafından da geçer fakat üst tarafından daha hızlı geçer, böylece kanatın üst tarafında düşük basınç oluşur. Alt ve üst taraf arasındaki basınç farkından dolayı aerodinamik kaldırma kuvveti meydana gelir. Uçak kanatlarında bu kuvvet uçağın yükselmesini sağlar, rüzgar türbinlerinde kanatlar rotor merkezli olduğu için kaldırma kuvveti kanatlarda dönme sağlar. Bu kaldırma kuvvetine dik olarak meydana gelen sürüklenme kuvveti, rotor dönüşünü engelleyici etki yapar. Bu rüzgar türbinlerinin tasarımındaki önemli parametrelerden biri, kanatların kaldırma-sürüklenme oranının yüksek olmasını sağlamaktır. Kaldırma kuvveti sürüklenme kuvvetinden ne kadar büyük olursa türbin o kadar rahat ve hızlı döner. Bu oran, kanatların uzunluğuna göre değişik rüzgar hızlarında türbinin çıkış enerjisini optimize etmek için değişiklikler gösterir.

## **2.5 YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ ELEMANLARI VE TEKNOLOJİSİ**

Yatay eksenli bir rüzgar türbini çevredeki engellerin rüzgarı kesemeyeceği yükseklikteki bir kule; bunun üzerine yerleştirilmiş ve döner şartı, jeneratörü ve kontrol sistemlerini içinde barındıran bir gövde; kanat elemanları ve kanatların bağlı olduğu göbek ve rotordan oluşur.

Rüzgar türbininin ana elemanları, rotorun dışında sistemin yapısal bileşenleri olup bunlar, aerodinamikler, elektrik dönüşüm sistemi ve kontrol sistemidir. Yatay eksenli rüzgar türbin sistemleri yapı olarak şu elemanlardan oluşur:

- Rotor (kanatlar ve kanatları destekleyici göbekten oluşur.)
- Gövde (türbinin döner elemanlarını içerir(şaft, dişli kutusu, mekanik fren jeneratör)
- Mekanik fren sistemi
- Aktarma organları (transmisyon sistemi)
- Jeneratör
- Türbin kontrol elemanları (güç kontrolü)
- Yönlendirici
- Transformatör
- Küçük güçlü rüzgar türbinlerinde gerektiğinde enerji depolayan akü
- Kule
- Elektrik sistemini dengeleyici anahtarlar, kesiciler, transformatörler, elektronik güç çeviricileri ve gerekiyorsa güç elektroniği düzenekleri



Şekil 2.5 Rüzgar türbininin iç yapısı

Yatay eksenli rüzgar türbini teknolojisindeki gelişmeler gün geçtikçe artmaktadır. İlk rüzgar türbini üretiminden bu yana geçen zaman içinde türbinlerin kapasiteleri ve

yükseklikleri önemli oranda artmış, verimleri yükselmiş ve yatırım maliyetleri azalmıştır. Türbin kapasiteleri günümüzde 10 MW'a kadar yükselmektedir. Türbinlerin kapasiteleri arttıkça kanat çapları da artmakta ve bu yüzden kule yükseklikleri de artmaktadır. Kule yükseklikleri rotor çaplarına (rotor diameter) göre değişmektedir. Kule yükseklikleri günümüzde 100 metreye kadar çıkmaktadır. Optimum rotor çapı, bölgelerdeki rüzgar durumuna göre değişmektedir. Genelde türbin kule yükseklikleri rotor çapının 1 – 1.4 katı arasında değişir. Proje analizleri, rotor boyutları-kule yüksekliği-enerji üretimi-maliyet sonuçlarını gösteren optimum türbin ekipmanlarını belirlemek için yapılmaktadır.

Ticari türbinler çoğunlukla Danimarka modelindedir. Yerel şebekeye bağlı olan sistemler için bu model, yatay eksenli, rotoru üç kanatlı, önden rüzgarlı ve rotoru rüzgar doğrultusuna yönlendiren aktif yönlendirme sistemlidir. Sürücüleri rotor ve dişli kutusunu birbirine bağlayan düşük hız şaftından oluşur. Yüksek hız şaftı dişli kutusuna ve oradan jeneratöre bağlanmaktadır. Jeneratör olarak, rüzgar şartlarına göre değişmekle beraber çoğunlukla 550-690V arasında AC gerilim üreten asenkron veya senkron jeneratörü kullanılır. Fakat günümüzde dişli kutusuz çalışan sabit mıknatıslı çok kutuplu senkron jeneratörlerin kullanımı artmaktadır. Bazı türbinlerde düşük rüzgar hızlarında da güç üretmek için ikinci bir küçük güçlü jeneratör içerir. İkinci jeneratör ana jeneratöre bağlı veya bağımsız olabilir. Yerel şebekeye bağlı olan her türbin, içerisinde üretilen gerilimin şebeke voltajına yükseltilmesini sağlayan bir transformatör içermektedir. Bu voltaj genelde 25 – 35 kV arasındadır.

Genelde çoğu rüzgar türbini güç üretimine 3-4 m/s rüzgar hızlarında başlar, nominal gücünü 13 m/s'de üretir ve 25 m/s rüzgar hızında güç üretimini keser. Rüzgar hızındaki değişkenlik rüzgar türbininde devamlı değişken güç üretimlerine neden olur. İyi rüzgar alan bölgelerde bu güç değişkenliği türbinin yıllık ortalama yaklaşık %35 kapasitesinde çalışmasına neden olur. Aşırı olumsuz hava şartlarında türbinin bir kontrol sistemi ile durdurulması gerekmektedir. Firmalar arasında değişen kontrol sistemleri, türbinin şebeke kalitesinde elektrik üretmesi için çalıştırılır. Hiçbir kontrol sistemi en iyi değildir. Her birinin avantajları ve dezavantajları vardır fakat hepsi şebekeye enerjiyi başarılı şekilde sağlar.

Çalışma hızına göre rüzgar türbinleri değişken ve sabit hızlı çalışma olarak iki tiptedir. Değişken hızlı türbinler sabit hızlı türbinlere göre daha yüksek verimde enerji üretir çünkü çalışma rüzgar aralıkları daha geniştir. Değişken hızlı türbinlerde şebeke kalitesinde enerji üretimi için güç elektroniği sistemi gereklidir. Güç elektroniği devreleri, sabit hızlı türbinlerde enerjiyi düzgün hale getirmek için kullanılan kondansatörlerden daha fazla enerji harcar. Değişken hızlı türbinlerde kullanılan jeneratörlerin şebekeye reaktif güç sağlama özellikleri vardır ve sistemdeki kondansatörler dinamik olarak şebekedeki güç faktörünü kontrol ederler. Kondansatör bankları kulenin alt tarafında veya gövdenin iç tarafında bulunur. Bu özellik, gerilim kontrolünün zor ve yüksek maliyetli olduğu uzak iletim sistemleri için avantaj olabilir. Sabit hızlı rüzgar türbinleri, anahtarlanmış kondansatörler ile 1'e yakın güç faktörü sağlar. Sabit hızlı sistemlerin şebekeye etkisi, reaktif güç tüketimi ile sonuçlanır. Bu reaktif güç, başka bir iletim sisteminden gelmek zorundadır.

Sabit kanat açılı türbinler değişken hızlılara göre genellikle daha az hareketli bölüm içerir ve daha az karmaşıktır, bu da daha az üretim maliyeti sağlar. Değişken açılı türbinler ise kanat açılarını optimize etme ve rüzgar değişimlerinde göre ayarlama özellikleri vardır. Bu yüzden değişken hızlı türbinlerdeki enerji çıkışı sabit hızlı türbinlerden daha yüksektir ve dolayısıyla sistem maliyeti daha yüksektir.

Rüzgar gücünden elektrik enerjisi üretiminde en önemli aşama, hızlı işlem yapabilen yarı iletken anahtar elemanlarının gelişimi, mikroişlemciler, mikrodenetleyiciler ve sayısal işaret işleyici (DSP) alanındaki gelişmelerle otomasyona geçiş sağlanmasıyla olmuştur. Bu gelişmeler rüzgar enerji sistemini iki farklı kullanımı ile verimli duruma getirmiştir. Bunlardan birisi mikroişlemci teknolojisinin sistemi denetlemesi ve maksimum gücün çekilmesi için programlama mantığının işlenmesi ile sağlanmıştır. İkincisi de güç elektroniği düzenekleri ile üretilen gerilimlerin genliği ve sıklığı denetlenebilmiştir. Yarı iletken teknolojide üretim ve kullanımın yaygınlaşması sistem maliyetini önemli ölçüde düşürmüştür. Böylece türbin gücü artmış ve düşük rüzgar hızında da elektrik üretimi gerçekleştirilebilmiştir. Son on yılda rüzgar türbini teknolojisindeki gelişmeler, bir rüzgar türbininin kurulu gücünü 10 MW'a kadar yükseltmiştir. Tamamen otomatik denetimli çalıştırılan çeşitli düzenekler, maksimum başarımın elde edilmesi için türbinlerin rüzgar ile etkileşimlerini düzenlemektedir.

### 2.5.1. Rotor

Rotor, kanatlardan, kanat uçlarının bağlı olduğu göbekten ve göbeğe bağlı döner şafttan oluşur. Rotor kanatları, rüzgarı yakalar ve rüzgarın gücünü rotor göbeğine aktarır. Rotor bir göbek (hub) ile şafta bağlanmıştır. Göbek, rüzgar türbinin düşük hız şaftına bağlıdır. Kanatlar rüzgarın etkisiyle dönerek bir ucu göbeğe diğer ucu jeneratöre bağlı olan şaftı döndürür. Rotor dönüş düzlemi, rüzgar yönüne dik olacak şekilde kontrol edilir. Rotor kanadında oluşan hava akışı bileşkesi (rüzgar hızı ile rotor lokal hızının vektörel toplamı) kanadın her iki tarafı rüzgar yönü (windward) ile rüzgar geçiş yönü (leeward) arasında bir basınç farkı oluşturmaktadır. (Rüzgar geçiş yönü tarafındaki hava akışı hareket etmek zorundadır. Hız yükseldikçe havanın bu hareketi ilerler ve neticede hava yoğunluk ve basıncında azalma olur). Söz konusu basınç farkı bileşke hava akışına dik bir itme kuvveti yaratır ve itme kuvvetinin bileşeni bir mekanik tork üreterek rotor ve şaftın dönmesini sağlar. Rotor, türbinin performansı ve maliyeti üzerindeki en önemli etkenlerdir.

#### 2.5.1.1. Rotor hız şekli

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri, türbin hızı ve üretilen gerilimin sıklığı (frekansı) dikkate alındığında, çalışma ilkesine göre üç gruba ayrılabilir.

- Sabit hız, sabit sıklık dönüşüm sistemleri,
- Değişken hız, sabit sıklık dönüşüm sistemleri,
- Değişken hız, değişken sıklık dönüşüm sistemleri.

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde kullanılan, sabit hızlı sistemlerde, sadece rotor hızının küçük değişikliklerine izin verilir. Sabit hızlı türbinlerde jeneratör doğrudan doğruya şebekeye bağlanmaktadır. Elektrik sistemlerini kontrol imkanları yoktur çünkü güç elektroniği sistemi üzerinden değil doğrudan şebekeye bağlanır. Bu yüzden reaktif güç kontrol edilememektedir. Fakat kolay ve sağlam bir sistemdir (Dr. Tanay Sıdkı Uyar).

Değişken hızlı sistemlerde rotor hızı rüzgar hızına bağlı olarak değişmektedir. Burada jeneratör ve şebeke arasına bağlanan güç elektroniği dönüştürücüleri sistemin ana

denetim düzeneğini oluşturur. Türbin jeneratörü şebekeye direkt olarak değil güç elektroniği düzenekleri ile bağlanır. Elektrik sistemleriyle etkileşim ve denetim kolaylaşmaktadır. Herhangi bir sapma, gerilim ve frekans değişiklikleri kontrol edilebilmektedir. Güç elektroniği düzenekleri reaktif gücü kontrol edebilmektedir. Mekanik açıdan ise burada türbulansın neden olduğu yük farkları kontrol edilebilmektedir. Şebekeye bağlı bir konverter veya güç elektroniği ile donatılan senkron jeneratörler ile farklı frekanslarda çalışabilmektedir. (Dr.T.Sıdkı Uyar,2005)

Rüzgar türbini rotoru genellikle 15-200 d/d arası (15 - 200 rpm) hız ile döner. Rüzgar türbininin hızı, rotorun açısız hızı ( $\omega$ ) ile ölçülür. Birimi radyan/saniye'dir. Bunu dönme hızına çevirirsek,

$$\omega = \frac{2\pi}{60} .N \quad (2.1)$$

Burada N = rotor dönme hızı (rotational speed), birimi rpm (devir / dakika)'dır. Rotor hızı yavaş olan türbinlerin kanat sayısı fazladır, devir sayısı düşüktür ve bu yüzden yüksek hızın gerekmediği su pompalarının tahrikinde kullanılır.



**Resim 2.9** Düşük hızlı (rotoru yavaş) çok kanatlı rüzgar türbini

#### 2.5.1.2. Rotor kanat sayısı

Hızlı rüzgar türbinlerinin kanat sayısı maksimum 4 tanedir. Ancak üç kanatlı rüzgar türbinleri daha yaygındır çünkü güç çıkışları daha düzgündür. Hızlı rüzgar türbinlerinde devir sayıları yüksektir. Bu nedenle genelde elektrik üretmek amacıyla tasarlanırlar. Son zamanlarda üzerinde en fazla çalışma yapılan türbin tipleridir. Rüzgar türbinlerinde

kanat sayısı arttıkça, dönüş hızı azalır. Bu nedenle enerji üretiminde üçten fazla kanatlı sistemler kullanılmamaktadır.

Kanat sayısı belirlemek için

$$B = 80/\lambda^2 \quad (2.2)$$

formülünde uygun kanat sayısı bulunur. Ticari olarak en yaygın olanı ve en verimli ve fonksiyonel olanı 3 kanatlı türbinlerdir.



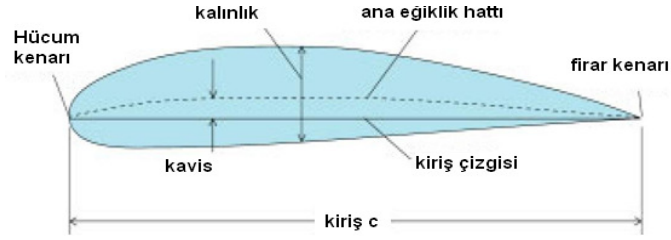
**Şekil 2.6** Üç, iki ve tek kanatlı türbin şekilleri

### 2.5.1.3. Kanat Yapısı ve malzemeleri

Türbin kanatlarının kolay dönebilmesi için yeteri derecede hafif ve kuvvetli olması gerekmektedir. Daha hafif kanatlar, daha uzun kanat üretimini olası hale getirmekte ve bu da daha çok elektrik üretimi anlamına gelmektedir. Rotor kanatlarının yapımında kullanılan malzemeler:

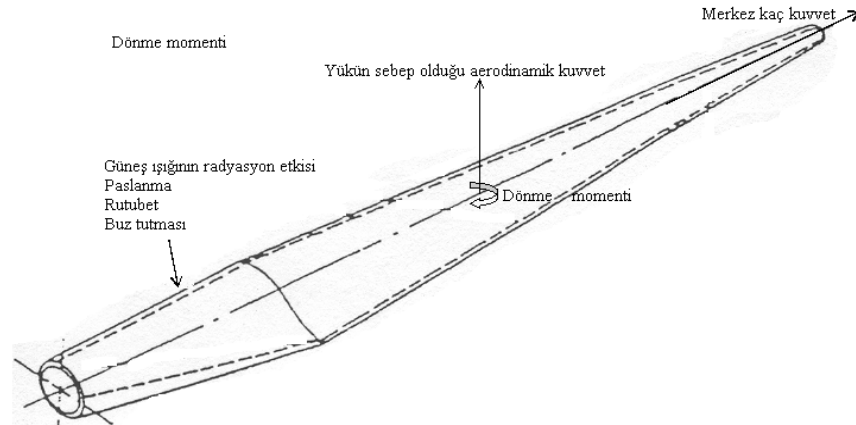
- Polyester ile desteklenmiş fiber glass,
- Epoxy ile desteklenmiş fiber glass,
- Karbon lifleri (daha hafif ve mukavim fakat pahalı)
- Ağaç-epoxy tabakaları

Doğa şartları ve çevresel faktörler göz önünde bulundurulduğunda, paslanma ve korozyon, nemli hava, güneş ışınlarının radyasyon etkisi ve rüzgarla birlikte gelen küçük çakıl taşları kanatların eskimesini kolaylaştırır. Ancak kanatlar eskimeye karşı dayanıklılığını en az 20 yıl sürdürmelidir. Bu yüzden kanatların dışı alüminyum ile kaplanır.



**Şekil 2.7** Kanat boyutları

Rüzgar türbinlerinde rotor kanatları, uçak pervanelerinin kanatlarına benzer şekilde profil olarak yapılırlar. Rüzgar türbinleri için, türbinin makine karakteristiğine (tip, sınıf, güç kontrolü, kanat sayısı, gücü gibi) göre birçok kanat profili oluşturulmuştur. Bu profillerin her birinde profile karşılık gelen rüzgar hücum açısı, kaldırma kuvveti katsayısı ve sürüklenme katsayısı belirlenmiştir. Tasarlanacak olan türbinin amacına göre uygun bir profil seçimi yapılır. Rüzgar türbinleri kanatlarında profil olarak, genellikle NACA (The United States National Advisory Committee for Aeronautics), LS ve LM (FiberGlass firması) tarafından oluşturulmuş kanat profilleri kullanılmaktadır. Kanat profillerinde aerodinamik açılar ve kaldırma-sürüklenme kuvveti katsayıları değişkendir. Rüzgar türbinlerinde verimi kanat profilinin sağlayacağı kaldırma kuvvetinin direnç (sürüklenme) kuvvetine oranı etkilemektedir. Şekil 2.8’de ise kanat üzerindeki aerodinamik kuvvet, atalet kuvveti ve çevresel faktörlerin etkisi gösterilmiştir.



**Şekil 2.8** Kanat üzerine etkiyen kuvvetler

Kanat çaplarına göre üretilen güç değişmektedir. Türbinin çıkış gücü kanat çapının karesiyle doğru orantılı olarak artar. Tablo 2.6’da kanat boylarına göre güç çıkışları belirtilmiştir.

**Tablo 2.6** Ortalama kanat boylarına göre türbinin maksimum güç çıkışı (Kaynak: Danish Wind Energy Association, American Wind Energy Association)

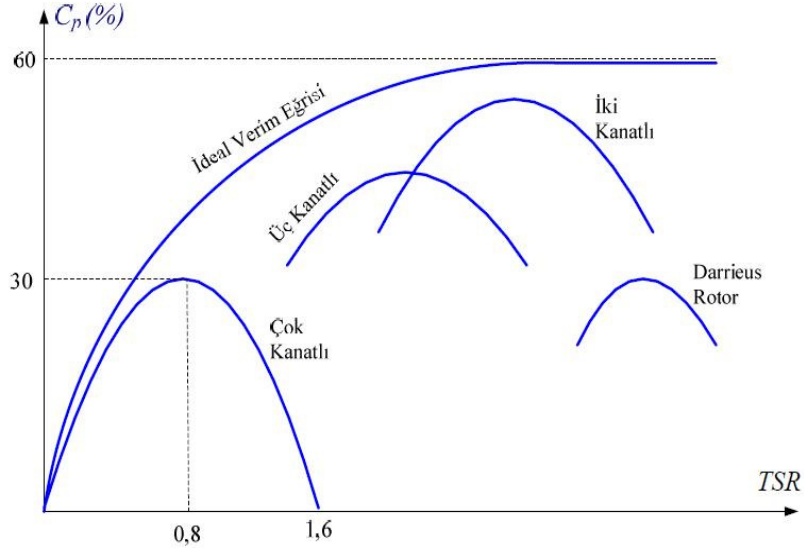
<b>Kanat Boyları ve Maksimum Güç Çıkışları</b>	
<b>Kanat Çapı (metre)</b>	<b>Güç çıkışı (kW)</b>
10	25
17	100
27	225
33	300
40	500
44	600
48	750
54	1000
64	1500
72	2000
80	2500

### 2.5.1.3 Rotor uç-hız oranı

Uç hız oranı, kanat ucundaki rüzgar hızı ile rüzgarın gerçek hızının oranıdır.  $\lambda$  ile gösterilen bu oran, rotor dönüş hızının rüzgar hızına oranı olarak tanımlanır. Rotor verimi  $C_p$ , kanat uç hız oranının bir fonksiyonudur. Modern rüzgar türbinlerinin verimli işletimleri,  $\lambda$  değerleri 4–6 civarında olduğu zaman oluşur. Yani kanat uç hızı rüzgar hızının 4–6 katı civarında ise bu tür türbinler verimli olarak işletilirler. İdealde maksimum verim, türbin kanat hızının rüzgar hızı değişimi ile sürekli olarak ayarlanması durumunda elde edilir. Rotorun uç-hız-oranı  $\lambda$  birimsizdir ve rüzgar türbini tasarımlarında önemli bir parametredir.

$$\lambda = \frac{V_T}{V} = \frac{\omega R}{V} \quad (2.3)$$

Rüzgar türbinin verimi uç-hız-oranı ile değişir. Optimum uç hız oranı değeri, kanat sayısına, kanat genişliğine ve kanatların sağlamlığına bağlıdır. Şekil 2.9’da uç hız oranına göre rotor verimleri gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Rotor veriminin uç hız oranına göre değişimi (N.D.BUTLER,2006)

Sabit hızlı türbin rotorlarının dakikadaki devir sayısı 30, 34, 35, 43 d/d düzeyindedir. Değişken hızlı rotorlar için bu değerler 15-44, 18-39, 36-45, 40-60 ve 58-72 d/d (rpm) arasındadır. Rüzgar hızına bağlı olarak rotor açısal hızı 20-170 d/d arasında değişmektedir.

### 2.5.2 Aktarma Organları

Rüzgar türbinlerinin aktarma organları türbinin döner kısımlarını içerir. Bu kısımlar, rotodaki düşük-hız mili, dişli kutusu ve jeneratör tarafında bulunan yüksek hız milinden oluşur. Diğer aktarma elemanları, destekleyici bilezikler, fren sistemi ve jeneratörün dönen kısımlarıdır. Dişli kutusunun amacı, rotorun düşük olan hızını (orta büyüklükte bir türbinde 20 rpm civarındadır), jeneratörü döndürebilcek kadar yüksek bir hıza (düşük devirli jeneratörler 1500 rpm hızda döner) çıkarmaktır. Günümüz rüzgar türbinlerinin önemli bir kısmı, düşük devirli jeneratör kullanılarak dişli kutusuz olarak tasarlanır. Bu jeneratörlerden bazıları çok kutuplu sürekli mıknatıslı senkron jeneratörlerdir. Dişli kutulu sistemlerdeki jeneratörler az kutupludur. Kutup sayısı arttıkça jeneratörün devir sayısı azalacağından, türbin rotorunun dönme hızı jeneratörü çalıştırmaya yetmektedir ve dişli kutusuna gerek kalmamaktadır. Dişli kutusu fazla ağırlığa ve gürültüye sebep olur, kayıpları artırır ve düzenli bakıma ihtiyaç duyar. Bu yüzden dişli kutusu kullanmamak avantaj sağlar.

### 2.5.3. Türbin Kontrol Elemanları

Rüzgar türbinlerinde kontrol ve güvenlik sistemleri, rüzgar türbinini riskli durumlardan koruyan bir çok farklı bileşenden oluşmaktadır. Bu sistem karmaşık bir yapı içinde en az hata ile yapılan ölçümlerden gelen sonuçları değerlendiren kontrolör ve kontrolörün karar mekanizmasıyla devreye giren fren veya yavaşlatma sistemleri olarak özetlenebilir. Kontrol elemanları rotor hızı kontrolü ve güç kontrolü sistemlerinden oluşur.

Rüzgar türbinlerinde güç kontrol sistemlerinin amacı, üretilen maksimum gücü türbinin nominal gücü ile sınırlamak, güç kalitesini korumak, yük dengesizliğini en aza indirmek olarak sıralanabilir. Rüzgar hızına bağlı olarak, hız arttıkça üretilen elektriğin miktarı da artmaktadır. Fren sistemleri ise çok yüksek rüzgar hızlarında kanatların durmasını veya açısını değiştirerek rüzgar yönünün tersinde olmasını sağlayarak rotor hızı kontrol edilir. Rotor hızı, rüzgardan daha fazla enerji yakalayabilmek için, Yüksek rüzgar hızlarındaki mekaniksel ve elektriksel aşırı yüklenmelere karşı rotoru, generatörü ve güç elektroniği ünitesini korumak için kontrol edilmelidir. Jeneratörün yanlışlıkla veya planlı bir şekilde devre dışı bırakılması ile elektriksel yük kaybı oluşacağından rotor çok hızlı döner. Eğer kontrol edilmez ise mekaniksel olarak sisteme zarar verir.

Türkiyede kullanılan rüzgar türbinlerinde nominal hız genelde 10 - 12 veya 14m/s olmaktadır. Rüzgarın hızı türbinin nominal rüzgar hızı değerine ulaştığında türbin, üretebileceği maksimum enerji seviyesine erişmiş olur. Rüzgar hızının bu değerlerin üzerine çıktığı durumlarda, türbinin mekanik yapısında bozulmalar meydana gelebileceği gibi üretilen aşırı elektrik enerjisi şebekeye bağlı sistemlerde voltaj dengesizliğine ve devrelerin bozulmasına sebep olabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı, türbin hızı belirli değerlere ulaştığında daha fazla hızlanmayı engelleyecek fren mekanizmaları devreye girer. Günümüz teknolojisi bu problemin çözümünde çeşitli yöntemler geliştirmiştir.

Rüzgar türbinlerinde ayrıca yüksek rüzgar hızlarında güç denetimini sağlamak amacıyla elektronik kontrol ünitesi bulunur. Elektronik kontrol ünitesi, rüzgar türbininin mevcut durumunu sürekli takip eden ve sapma mekanizmasını kontrol etmekte olan bilgisayar

destekli bir kontrol ünitesi bulundurur. Herhangi bir sorun (dişli kutusu veya jeneratörün aşırı ısınması gibi) durumunda türbini otomatik olarak durdurur ve türbin operatörü kontrol ünitesine çevrimiçi bağlantı ile çağrı mesajı gönderir.

#### *2.5.3.1. Hidrolik ve mekanik fren sistemi*

Hidrolik sistem, rüzgar türbininin aerodinamik frenlerini içerir. Güvenlik sisteminde frenleme işlemini başlatan ve çalıştıran mekanizma hidrolik sistemdir. Bir hidrolik sistemde basınç altındaki sıvı, belirli bileşenleri hareket ettirmekte kullanılır. Bu sıvıya hidrolik yağ denir. Herhangi bir nedenle rüzgar türbinini durdurmak gerekirse, silindirdeki yağ boşaltılarak harcanan güç kesilir. Bu suretle merkezkaç kuvveti ile kanat ucu dışarıya doğru itilir ve uç milindeki mekanizma kanat ucunu 90 derece frenleme pozisyonuna doğru döndürür. Hidrolik yağın boşalması küçük bir delik ile sağlandığı için hidrolik yağ tamamen boşalana kadar pervane yavaşça dönmeye devam eder. Hidrolik sistem, rüzgar türbini çalışmaya başladığı andan itibaren basınç uygular, duracağı zaman ise basıncı keser. Mekanik fren, aerodinamik frenleme için bir güvenlik sistemi olarak kullanılır ve türbini yavaşlatma (stall) kontrolü durumunda durdurur.

#### *2.5.3.2. Güç Kontrol Sistemi*

Rüzgar türbinleri, tasarım hızlarında maksimum enerji çıkışı verecek şekilde tasarlanır. Rüzgar hızının çok yüksek olduğu durumlarda türbinin hasar görmesini önlemek için türbinin güç üretimini sabit tutmasını ve rüzgarın fazla enerjisini kullanmamasını sağlayacak güç kontrol sistemi gereklidir. Bu yüzden bütün türbinler çeşitli güç kontrol sistemleriyle tasarlanır. Modern rüzgar türbinlerinde güç üretimini jeneratörün nominal gücünde sınırlandırmak için iki farklı aerodinamik kontrol prensibi kullanılır. Bunlardan pasif olanına yavaşlatma kontrolü (stall control), aktif olanına da adım kontrolü (pitch control) denir.

Hava akımının az veya hücum açısının fazla olması dolayısıyla rotor kanadının kaldırma kuvvetinin azalıp havada asılı kalmayacak hale gelmesi olayına stall veya perdovites adı verilmektedir. Bu sistemde kanat kendi eğim açısına sabitlenir ve kendi uzunlamasına eksenini boyunca dönmesi engellenir. Yavaşlatma kontrolü, kanatlara etki

eden kaldırma kuvvetini önleyerek dönüşü yavaşlatır. Yavaşlatma kontrollü türbinlerin kanatlarına bakılınca, kanatlar uzunlamasına ekseninde hareket ettirilince burulmuş olduğu görülür. Bu, kanatların azar azar yavaşlamasını sağlamak içindir. Yavaşlatma kontrolünün ilk avantajı rotorda hareketli parçalar ve karmaşık kontrol sistemi bulunmamasıdır. Çok yüksek rüzgar hızlarında türbin kanatlarının açısı değiştirilerek kanatları durdurur, güç üretimi ve rotor durur.

Adım kontrollü rüzgar türbinlerinde, kanat açıları türbin kontrolörü ile değiştirilerek güç çıkışı kontrol edilir. Kontrol parametresi güç çıkışı, rüzgar hızı ve rotor hızıdır. Adım kontrollü aktif bir kontrol sistemidir ve jeneratör gücünden gelen giriş sinyaline ihtiyaç duyar. Türbinin elektronik kontrolörü türbinin güç çıkışını saniyede birçok kez denetler. Jeneratör gücü nominal gücün üstüne çıkarsa, rotor kanatları daima kendi uzunlamasına eksenini boyunca döndürülür. Başka bir deyişle, giren hava akışının hücum açısını azaltmak için adım (pitch) açısını değiştirir. Hücum açısının azaltılması rotor kanatlarını döndüren aerodinamik kuvvetleri azaltır ve rüzgardan dolayı türbinin güç eldesini azaltmış olur. Rüzgar türbini aşırı güç ürettiği zaman elektronik kontrol ünitesi kanat açısı mekanizmasına sinyal göndererek kanat açıları rüzgar yönünün tersine çevrilir. Aynı şekilde güç üretimi azaldığı zaman da sinyal gönderilerek kanat yönü rüzgar yönüne çevrilerek güç üretimi artırılmaya çalışılır. Adım mekanizması genelde hidrolik sistemler kullanılarak çalışır. Adım kontrollü türbinlerde bilgisayarlar, her rüzgar hızında çıkışı maksimize etmek amacıyla kanatların optimum açısını korumak için, kanatları rüzgar hızı değişikçe birkaç derece adımlandırır.

#### *2.5.3.4 Diğer güç kontrol çözümleri*

Son yirmi senede, esas itibariyle yukarıda sözü edilen kontrol mekanizmalarına dayalı birçok güç kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Bazı imalatçılar, yavaşlatma özelliklerinin optimizasyonu için durdurma kontrolünü, sabit rotor hızı dahil, aksenel kanat kontrolü ile birlikte içeren ve “aktif durdurma” (active stall control) olarak adlandırılan kombine bir kontrol sistemi kullanmışlardır. Enerji kalitesinin optimizasyonuna yönelik diğer bir kontrol sistemi, güç elektroniğinin kullanıldığı kombine bir durdurma/sabit hız kontrol sistemidir.

Teknik olarak aktif yavaşlatma kontrollü sistemler, adımlanabilir kanatlara sahip oldukları için adım (pitch) kontrollü sistemlere benzerler. Düşük rüzgar hızlarında fazla tork elde etmek için türbin kanatları adımlandırmak için programlanır. Türbin nominal gücüne ulaştığı zaman, adım kontrolünden farklı şekilde çalışır: Jeneratör aşırı yüklenirse türbin kanatlarını ters yöne döndürür. Diğer bir deyişle kanatların daha net yavaşlaması için ve dolayısıyla rüzgardaki fazla enerjiyi kullanmamak için kanat hücum açısını artırır. Aktif yavaşlatma kontrolünün avantajlarından biri, çıkış gücü pasif yavaşlatma kontrollü sistemden daha doğru bir şekilde kontrol edilir. Diğer bir avantajı, türbin bütün yüksek rüzgar hızlarında tam olarak nominal gücünde çalışacaktır. Normal pasif yavaşlatma kontrollü sistemlerde, kanatlar derin yavaşlatmaya girdiği için yüksek rüzgar hızlarında güç çıkışı genelde düşmektedir.

#### **2.5.4. Yönlendirici**

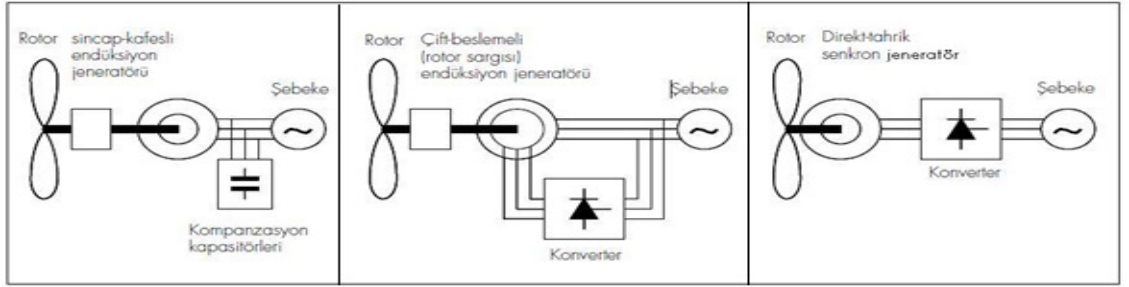
Rotorun türbin önünde rüzgar doğrultusuna göre ayarlanabilmesi için elektrikli yönlendirici bulunur. Yönlendirici, türbin gövdesi ile kule arasında yer alır. Ayrıca anemometre ve rüzgar yön belirteci vardır. Bunlar rüzgar hızını ve yönünü ölçmek için kullanılırlar. Rüzgar hızı 3-4 m/s'ye eriştiğinde türbini harekete geçirmek için rüzgar türbininin elektronik kontrol ünitesi tarafından anemometrenin gönderdiği elektronik sinyaller kullanılır. Eğer rüzgar hızı tasarım hızını (örneğin 25 m/s' yi) aşarsa bilgisayar destekli kontrol ünitesi, türbini ve çevresindekileri korumak için rüzgar türbinini otomatik olarak durdurur. Rüzgar yön belirtecinden gelen sinyaller, rüzgar türbini elektronik kontrol ünitesi tarafından alınarak, sapma mekanizması yardımıyla rüzgara karşı türbini döndürmek için kullanılır.

#### **2.5.5. Elektrik Sistemi**

Rüzgar türbinleri senkron veya asenkron jeneratörlerle ve bu jeneratörlerin şebekeye doğrudan veya dolaylı bağlanmasıyla tasarlanır. Türbinler jeneratörün şebekeye bağlantı şekline göre çeşitli şekillerde seçilir. Şebekeden bağımsız küçük sistemlerde doğru akım jeneratörleri daha çok tercih edilir. Direkt şebeke bağlantılı sistemlerde üç fazlı AC jeneratörler kullanılır. Endirekt şebeke bağlantılı sistemle de üretilen gerilim çeşitli ara birimlerden geçirildikten sonra şebekeye uyumlu hale getirilir.

### 2.5.5.1. Jeneratör sistemi

Rüzgar türbini jeneratörleri diğer tip jeneratörlere göre biraz farklıdır. Bunun sebeplerinden biri, jeneratörün salınımlı güç üreten rüzgar türbini rotoruyla birlikte çalışmasıdır. Akü şarjı yapan küçük rüzgar türbinleri DC jeneratörleri kullanırken, şebekeye paralel çalışan rüzgar türbinlerinde ise alternatif akım jeneratörlerini oluşturan asenkron ve senkron jeneratörler kullanılır.



Şekil 2.10 Rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılan jeneratör sistemleri

Bölgenin rüzgar hızı ve rüzgarın enerjisine göre rotorun ve jeneratörün boyutları belirlenir. Rüzgar türbinlerinin bazılarında, düşük ve yüksek rüzgar hızları için iki ayrı jeneratör kullanılmaktadır.

Rüzgar türbinlerinde asenkron jeneratör kullanımında, makine senkron devrin üzerinde döndürülür ve uyartım için ihtiyacı olan reaktif enerjiyi, türbinin bağlı olduğu şebekeden alır.

Senkron jeneratör kullanımında rotora ikaz akımı olarak şebekeden alınan alternatif akımdan doğrultulmuş doğru akım verilir. Şebekeden alınan AC doğrultularak DC'ye çevrilir. Daha sonra rotorun sargılarına fırçalar aracılığı ile iletilir. Jeneratörün kutup sayısına ve dönüş hızına bağlı olarak istenen frekansta gerilim üretilir. Bu santrallerde rüzgarın hızı sabit olmadığı için elde edilebilecek AC gerilimin genlik ve frekans değerleri de sabit değildir. Bunun için şebeke gerilimi ve frekansı referans alınarak, jeneratör üretimi buna adapte edilmektedir. Şebekeden alınan AC referans gerilimi DC'ye çevrilmekte, makinanın değişken olan AC genlik ve frekans değerleri yine değişken olan bir DC gerilimine çevrilmekte, iki DC gerilimi kıyaslanmakta ve tam

eşitlik sağlandığında izole kapılı bipolar transistör devreleri ateşlenip ilettime geçmekte ve iki sistemi birbirine bağlamaktadır. Enerjinin şebekeye adaptasyonu, bir bilgisayar programıyla olmaktadır. Bilinmesi gereken en önemli husus; şebeke gerilimi olmadan enerji üretilemez ve dolayısıyla bu üniteler müstakil bir bölgeyi besleyemezler.

Eğer türbin şebekeye direkt bağlıysa, 50 Hz frekansında güç üretimi için rotor ve jeneratör sabit hızda dönmelidir. Endirekt olarak (güç elektroniği arayüzleri üzerinden) bağlanırsa rotor ve jeneratör değişken hızlarda dönebilir. Rotorun değişken hızlarda dönmesine izin verilmesinin sonucunda rüzgarın enerjisi daha çok yakalanır ve aşırı rüzgarlarda türbin sürücüleri üzerinde daha az stres birikir. Yine de değişken hızlı sistemin gücü regule edilmelidir.

#### 2.5.5.2. Senkron ve Asenkron Jeneratörlerin karşılaştırılması

Üç fazlı senkron jeneratörlerde rotor her periyotta 1 devir yapar. 2 kutuplu senkron jeneratör rotoru 50 Hz frekanslı elektrik şebekesine bağlanırsa, rotor dakikada  $50 \cdot 60 = 3000$  (rpm) devir yapacaktır. Kutup sayısı 4 olduğunda, rotor bunun yarısı kadar devir yapacaktır:  $(50 \cdot 60) / 2 = 1500$  rpm. Tablo 2.7’de şebekeye bağlı olan, değişik kutup sayılarında jeneratörlerin devirleri 50 Hz ve 60Hz frekanslarda belirtilmiştir.

**Tablo 2.7** Kutup sayılarına ve şebeke frekansına göre jeneratör devir sayıları

Kutup Sayısı	50 Hz Şebeke Frekansında	60 Hz Şebeke Frekansında
2	3000 rpm	3600 rpm
4	1500 rpm	1800 rpm
6	1000 rpm	1200 rpm
8	750 rpm	900 rpm
10	600 rpm	720 rpm
12	500 rpm	600 rpm

Senkron jeneratörlerde, elektromanyetik tork üretiminde stator akımının tamamı kullanıldığı için verim yüksektir, kutup eğimi asenkron jeneratörlere göre daha küçük olduğu için dişli kutusunu elimine ederek düşük hızlı çok kutuplu jeneratörler elde edilmesinde önemli bir özelliktir. Bu jeneratörlerde millerinin devir sayısı:

$$N_{\text{senkron}} = 60.f/p \text{ (devir/dakika)} \quad (2.4)$$

bağlantısı ile verilir. Burada f, Hertz biriminde elektrik şebekesi frekansı, p çift kutup sayısı ve n dakikadaki devir sayısıdır. Bu bağıntıdan da anlaşılacağı gibi, jeneratörün kutup sayısı arttıkça, 50 Hz'lik elektrik şebekesi frekansına uygun akım için gereken jeneratör mili devir sayısı da azalmaktadır. Bu nedenle, yüksek kutup sayılı jeneratörlerde dişli kutusuna gerek kalmamaktadır (Türbin hızını jeneratörün tasarım hızına çıkartmak için rotor ile jeneratör arasında dişli çark sistemi kullanılır. Ancak bu hem maliyeti hem de bakım masraflarını arttırır. Bu jeneratör tipi kullanıldığında jeneratör fiyatı biraz yüksek olsa da dişli çarkın ortadan kalkması ve bakım masraflarının azalması bu maliyeti fazlasıyla karşılamaktadır). Örneğin Alman Firması Enercon tarafından üretilen E-40 adlı dişli kutusuz rüzgar türbinleri, 84 kutupludur ve pervane milinin dakikada 38 devir yapması durumunda 500 kW'lık nominal güce ulaşmaktadır.

#### **2.5.6. Frekans Dönüştürücü**

Düşük hızlı uygulamalarda çıkış frekansı 50 Hz'in altındadır. Bu sebeple frekans dönüştürücü kullanılması gereklidir. Frekans dönüştürücü, jeneratörün değişik hızlarda çalışabilmesini de mümkün kılar.

#### **2.5.7. Transformatör**

Rüzgar türbinleri orta ve yüksek gerilim sistemlerine bir transformatör aracılığı ile bağlanır. Transformatörün burdaki görevi, rüzgar türbininin ürettiği gerilimi iletim hattındaki gerilim seviyesine getirmektir. Büyük güçlü türbinlerde (1 MW'dan büyük güçlü) transformatör kulenin tepesinde türbin gövdesinde yer alır. Küçük güçlü türbinlerde, transformatör şebeke bağlantı sistemleri ile birlikte yerde bulunur.

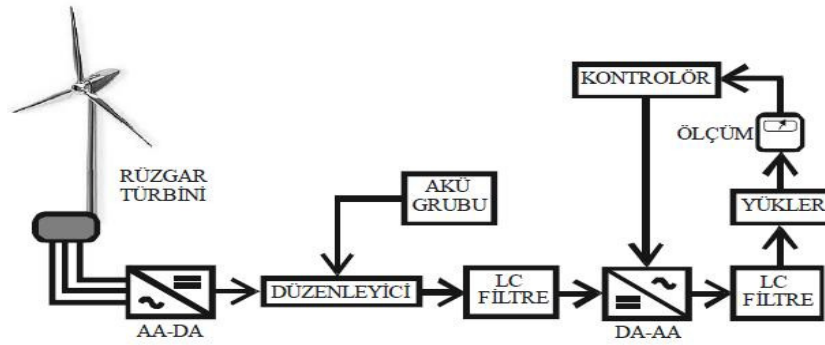
#### **2.5.8. Güç Elektroniği Sistemleri**

Değişken hızlı rüzgar türbinlerinden elde edilen enerjinin gerilim ve frekans değerlerinin ayarlanması gerekmektedir. Bu aşamada güç elektroniği düzenekleri ve

denetleyiciler devreye girer. Güç elektroniği çeviricileri vasıtasıyla elde edilen enerji önce doğru gerilime sonra da tekrar alternatif gerilime çevrilebilir. Uygun denetleyiciler kullanılarak da gerilimi ve frekansı istenen düzeye ayarlanabilir.

Güç elektroniği, hızla gelişen bir teknolojidir. Güç elektroniği elemanları daha yüksek akım ve voltaj değerlerine ulaşmış, güç kayıpları azalmış ve aygıtlar daha güvenilir hale gelmiştir. Ayrıca güç elektroniği cihazlarının mega ölçekli güç amplifikasyonu ile kontrol edilmesi kolaylaşmıştır. Maliyetleri her kVA'de düşmeye devam etmektedir ve güç çeviricileri rüzgar türbini performansını geliştirmesi açısından ilgi çekmektedir.

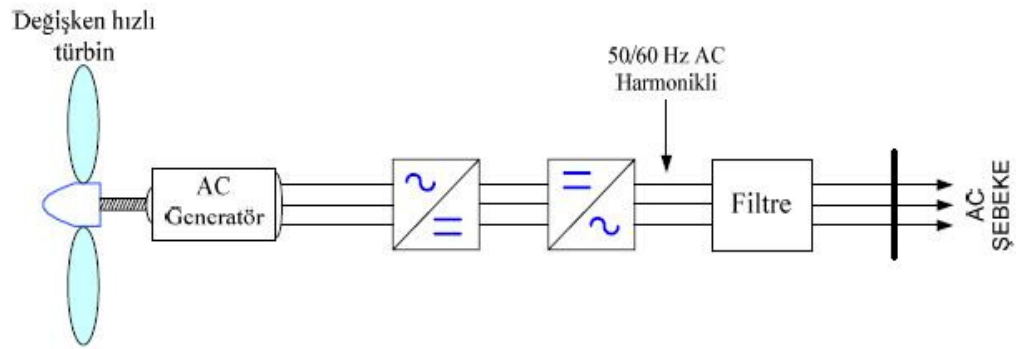
Modern değişken hızlı sistemlerde güç elektroniği elemanları kullanılarak jeneratör çıkışındaki değişken gerilim ve frekans, sabit gerilim ve frekans çıkışına çevrilir. Klasik olarak silikon kontrollü doğrultucular (scr = silicon-controlled rectifier) ile birlikte inverterler (evirgeç) kullanılabileceği gibi, modern tasarımlarda daha çok PWM tristör tercih edilmektedir. Değişken hız sisteminin enerji yakalaması nispeten yüksek olmasına rağmen ilave maliyet ve güç elektroniği devrelerindeki kayıplar bu avantajı belirli oranda dengeler. Şekil 2.11'de rüzgar türbinlerindeki güç elektroniği düzeneklerinin ana yapısı gösterilmiştir. (İ.H.ALTAŞ, O.Ö.MENGİ,2008)



Şekil 2.11 Değişken hızlı bir rüzgar türbinindeki güç elektroniği düzeni

Burada rüzgar türbininden elde edilen enerji bir AA-DA çeviricisiyle doğru gerilime çevrildikten sonra LC filtresinden geçirilmekte daha sonra kontrollü bir evirici vasıtasıyla da tekrar alternatif gerilime dönüştürülmektedir. Bu işlem sırasında gerilimin genliği ve frekansı ayarlanmaktadır. Evirici çıkışında yeni bir LC filtreden geçirilen gerilim ile yükler beslenmektedir. Burada denetleyici olarak PI denetleyici

kullanılmakta ve gerilimin etkin değeri 690 V değerine ayarlanırken frekansı da 50 Hz'de sabit tutulmaktadır. Küçük güçlü sistemlerde rüzgarın olmadığı yada yeterli olmadığı durumda akü grubu devreye girerek yüklerin talep ettiği enerjiyi sağlamaktadır. Bu işlem düzenleyici tarafından gerçekleştirilmektedir. Rüzgar hızındaki değişimler nedeniyle evirici girişinde farklı genliklere sahip bir DA gerilimi oluşsa da, yapılan denetim ve uygun filtrelerin kullanılması sonucu evirici çıkış geriliminin etkin değeri 690 V'da, frekansı da 50 Hz'de sabit tutulabilmektedir. Ayrıca oluşan harmonik etkiler de kullanılan filtreler ile önemli ölçüde azaltılabilmektedir.



Şekil 2.12 Değişken hızlı rüzgar türbini sistemi

### 2.5.9. Rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlantı şekilleri

Günümüzde rüzgar türbinlerinin kurulumu üç ana şekle dayanır:

- Sincap kafesli asenkron (indüksiyon) jeneratör ile şebekeye direkt bağlantı (Sabit hızlı türbinler)
- Çift beslemeli indüksiyon jeneratörü ile şebekeye endirekt bağlantı (değişken hızlı türbinlerdir, şebekeye güç elektroniği arayüzlerinden geçirildikten sonra bağlanır.)
- Kendinden uyarımlı çok kutuplu senkron jeneratör ile şebekeye endirek bağlantı (değişken hızlı türbinlerdir). Rotor shaftı direkt olarak jeneratöre bağlanmıştır. Jeneratör şebekeye AC/DC/AC konverter ve yükseltici transformatör üzerinden şebekeye bağlanır. Konverter diyot doğrultucu, DC/DC konverter ve PWM gerilim-kaynaklı inverter'den oluşur.

## 2.6. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE GÜÇ ÇIKIŞI VE VERİM

Rüzgar türbinleride güç çıkışı miktarı temel aerodinamik kurallara göre meydana gelir. Bir türbinin güç çıkışı, kanat uzunluğunun karesiyle doğru orantılı olduğu için kanat uzunluğundaki ufak bir artış, çıkışta çok belirgin bir güç artışına neden olmaktadır. Birçok şirket daha büyük kanatları güçlendirmek için, kanatları artan basınca karşı direnebilmelerini sağlayan düşük ağırlıklı karbon fiberleri kullanmaktadır.

Rüzgarın hızına bağlı olarak taşıdığı enerji miktarı da değişmektedir. Yatay eksenli türbinlerden elde edilebilecek maksimum güç, Betz teoremine göre hesaplanmaktadır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin performansı bu teorem ile açıklanır. Bu temel teorem, 1919 yılında Alman mühendis Albert BETZ tarafından açıklanmış ve 1926 yılında “Wind Energie und ihre Ausnutzug durch Windmühlen” (Rüzgar Enerjisi ve Rüzgar Enerjisinin Rüzgar Türbinlerinde Çıkışı) kitabında yayınlanmıştır. Albert BETZ, Almanya’daki Göttingen Enstitüsünde global rüzgar makineleri teorisini geliştirmiştir.

Bu teoreme göre yatay eksenli türbin en ideal güç dönüşüm türbini olarak kabul edilmekte, kanat sayısı ve kaldırma kuvvetinin direnci bazı kabuller sonucu hesaplanmaktadır. Türbinin rotoru tarafından süpürülen alan ve aradaki rüzgar hızı uniform kabul edilmekte ve rotor çıkışında yine eksen yönünde kabul edilmektedir. Rüzgar türbininde girişteki kütle akışı ile kanatlar arasında ve çıkıştaki kütle akışı, akış hacminin her yerinde daima sabittir. Bir rüzgar türbininden maksimum enerji üretimini sağlayabilmek çeşitli faktörlere bağlıdır. Kanatları kesen rüzgarın tamamı rotorda mekaniksel güce dönüşmez. Rüzgarın kinetik enerjisinden elde edilen mekaniksel güç ifadesi için rotor verimi hesaplanmalıdır. Rotor kanatları tarafından yakalanan gerçek güç miktarı, rüzgar kanalı girişi ile rüzgar kanalı çıkışı hava akışları arasındaki kinetik enerjilerin farkıdır. Türbin kanatlarının rüzgarı yakalama oranı türbin verimini gösterir ve  $C_p$  ile ifade edilir. Bu oran Betz kriterine göre en fazla % 59.3 dür. Yani rüzgarın en fazla % 59.3’ü türbinde mekanik enerjiye dönüşebilir.  $C_p$ , rotorun tasarımına ve kanatlardaki uç hız oranına ( $\lambda$ , kanat ucundaki rüzgar hızı ile rüzgarın gerçek hızı oranı) göre değişim gösterir. Pratikte bu oran % 40 civarlarındadır. Rüzgar-elektrik sistemlerinde rüzgardan alınabilen güçten elektrikselsel güç çıkışına kadar olan tüm

dönüşüm verimi %30-35 aralığındadır.  $C_p$ , uç hız oranı  $\lambda$  ile rotor eğim açısının (pitch angle, kanat kiriş çizgisi ile rotor düzlemi arasındaki açı,  $\beta$ ) bir fonksiyonudur. Bu fonksiyon eşitlik 2.5'deki gibi ifade edilebilir: (Kaynak: Faisal A. Mohamed, Microgrid Modelling And Online Management, 2008)

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-21/\lambda_i} + 0.0068\lambda \quad (2.5)$$

$$\beta = \arctan(2R/3r\lambda) - \alpha \quad (2.6)$$

Burada  $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$  ve  $\alpha$  hücum açısıdır.

Rüzgardaki enerji, rüzgarın birim zamandaki kinetik enerjisinden kaynaklanır. Rotor tarafından üretilen mekanik enerji, sadece rüzgarın kinetik enerjisinin düşmesiyle elde edilir [Freris, 1990; İlkılıç, 1990]. Kinetik enerjiyi (E) ve kinetik enerji farkını ( $P_k$ ) ifade edersek:

$$E = \frac{mV_k^2}{2} \quad (2.7)$$

Burada  $V_k$  kanatlardaki rüzgar hızı (m/s), m rüzgarın birim zamanda akan kütle miktarıdır (kg).

$P_k$  = kinetik enerji farkı (rotor kanatlarının yakaladığı mekanik güç, watt)

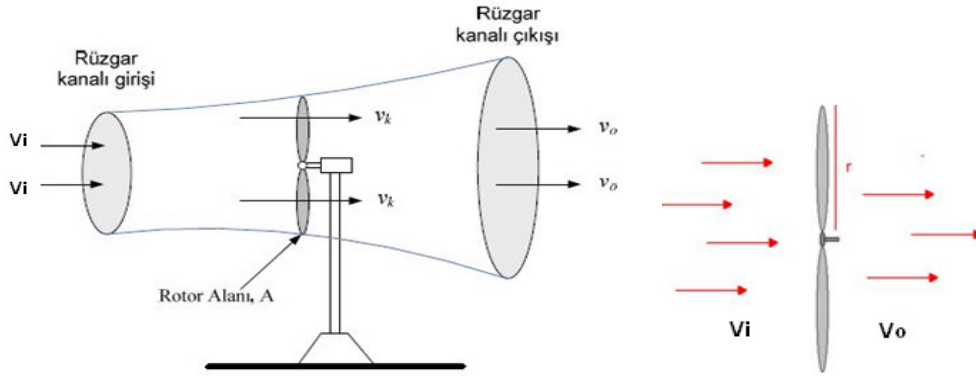
$$P_k = \frac{1}{2} * m * [V_i^2 - V_o^2] \quad (2.8)$$

Burada;  $v_i$  : rüzgarın rotor kanatlarına girmeden önceki hızı

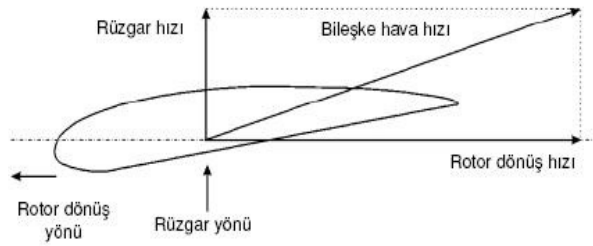
$v_o$  : Rotor kanatlarının çıkışındaki rüzgar hızı

Rotora girmeden önceki ve rotor arasındaki hava, akış halinde olduğu için sıkıştırılmaz kabul edilir. Buna göre  $V_o$ 'nin  $V_i$ 'den daha büyük olması gerekmektedir.

$$V_k = \text{Rotor kanatları düzlemindeki rüzgar hızı (} V_{\text{kanat}} \text{)} = \frac{V_i + V_o}{2} \text{ 'dır.} \quad (2.9)$$



Şekil 2.13 Bir rüzgar türbininin maruz kaldığı rüzgar kanalı boyunca oluşan rüzgar hızları



Şekil 2.14 Hızları ve yönleri gösteren kanat kesiti

Görüldüğü gibi rüzgar kanalı boyunca (rüzgar hızı  $v_i$ ' den  $v_o$ 'a) hareket ederken sürekli sabit formda değildir. Dolayısıyla dönen kanatlar boyunca hareket eden havanın kütle akış oranı (birim zamanda akan kütle miktarı) ortalama hız ile hava yoğunluğunun çarpımından elde edilebilir.

$$\frac{dm}{dt} = \rho_{\text{hava}} AV \quad (2.10)$$

Burada  $\rho_{\text{hava}}$  hava yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ), A hava içinde bulunan cismin alanı (rüzgar türbini için kanatların rotor süpürme alanı ( $\text{m}^2$ )), V ortalama rüzgar hızıdır ( $\text{m/s}$ ). Birim zamandaki kinetik enerji,

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} V^2 = \frac{1}{2} \rho_{\text{hava}} AV^3 \quad (2.11)$$

Görüldüğü gibi, rüzgardaki enerji rüzgar hızının küpüyle doğru orantılı olduğundan, en güçlü şekilde rüzgarın hızından etkilenir. Bu özellik şu sonucu meydana getirir: Rüzgar hızının %20 oranında artması, gücü %73 oranında artırır. Ayrıca, rüzgar gücü rotor süpürme alanının karesiyle doğru orantılı olduğu için çapın karesiyle de doğru orantılıdır. Bu da şu sonucu getirir: Rotor çapının %20 oranında artması, gücü %44 artırır.

Kinetik enerji formülünde kütle;

$$m = \rho * A * V_k = \rho * A * \frac{V_i + V_o}{2} \quad (2.12)$$

Bu ifade güç denkleminde yerine konulursa, rüzgardan elde edilen güç;

$$P_k = \frac{1}{2} (\rho * A * \frac{V_i + V_o}{2}) [V_i^2 - V_o^2] \quad (2.13)$$

İfade düzenlenirse,

$$P_k = \frac{1}{2} \rho A V_i^3 \frac{\left(1 + \frac{V_o}{V}\right) \left[1 - \left(\frac{V_o}{V_i}\right)^2\right]}{2} \quad (2.14)$$

$$= P_k = \frac{1}{2} \rho * A * V_i^3 * C_p \text{ elde edilir.} \quad (2.15)$$

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_o}{V}\right) \left[1 - \left(\frac{V_o}{V}\right)^2\right]}{2} \quad (2.16)$$

$V_i = V$  ve  $\lambda = \frac{V_o}{V}$  tanımlanırsa,

$$C_p = \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2) \text{ olur.} \quad (2.17)$$

$$\frac{V_i + V_k}{V_i} = a \text{ (indüksiyon faktörü) } \text{ olmaktadır.} \quad (2.18)$$

$(V_{kanat}) = \frac{V_i + V_o}{2}$  bağıntısını kullanarak,  $a = \frac{V_i - V_o}{2V_i}$  olur. Bu eşitliği rüzgar türbininden elde edilen güç ( $P_{Türbin}$ ) koyarsak,

$$P_T = \rho A V_k^2 (V_i - V_o) = \rho A V_k^2 [V_i - (2V_k - V_i)] \quad (2.19)$$

$$= 2\rho A V_k^2 (V_i - V_k) \quad (2.20)$$

İndüksiyon faktörü ifadesini yerine yazarsak,

$$P_T = [4a(1-a)^2] \left( \frac{1}{2} \rho A V_i^3 \right) \quad (2.21)$$

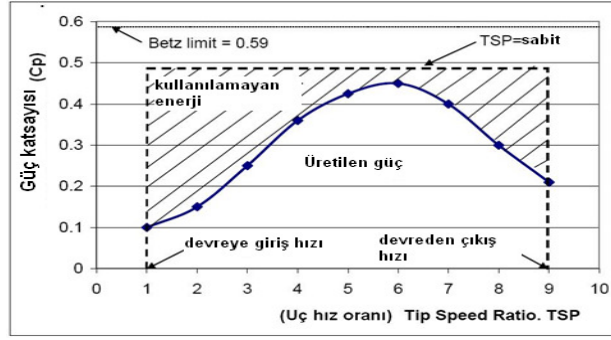
$$P_k = \frac{1}{2} \rho A V_i^3 \text{ (Türbinden elde edilebilecek maksimum güç)} \quad (2.22)$$

Buradan  $P_T = C_p P_k$  ve  $C_p = 4a(1-a)^2$  sonucu çıkmaktadır. Burada  $C_p$  rotor verimidir. Maksimum rotor verimini bulmak için  $C_p$ 'nin  $\lambda$ ' ya göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse;

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = \frac{1}{2} [(1-\lambda)^2 + (1+\lambda)(1-2\lambda)] = 0 \quad (2.23)$$

$$= \frac{1}{2} (1+\lambda)(1-3\lambda) = 0 \Rightarrow \lambda = \frac{V_o}{V} = \frac{1}{3} \text{ (Not: } \lambda = -1 \text{ çözüm değildir.)}$$

$$\lambda = \frac{1}{3} \text{ iken rotor verimi, } C_{p \max} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{3} \right) \left( 1 - \frac{1}{3^2} \right) = \frac{16}{27} = 0.5926 = \%59.26 \text{ olur.}$$



Şekil 2.15  $C_p$ 'nin  $\lambda$  ile değişimi (Doç.Dr.M.Ragheb,2009)

Farklı rotor ve kanat tipleri için oldukça farklı eğriler olabilir. Genellikle ampirik bir ifade olarak maksimum güç için optimum  $\lambda$ 'nın  $4\pi/n$  olduğu görülmüştür (Doç. Dr. M.Tanriöven, 2008). Burada n kanat sayısını ifade eder.  $\lambda$ , maksimum gücü elde edecek işletim noktasını belirler.  $C_p$ 'nin hangi  $\lambda$  değerinde maksimum olacağını türbinin aerodinamik yapısı belirler.

Bu durumda maksimum teorik verim % 59.26'dır. Bu verime "Betz" verimi veya "Betz kanunu" denir. Bu değer pratikte 0.5'in altında kalır. Verilen bir rüzgar hızı için rotor verimi, rotor dönüş oranının bir fonksiyonudur. Eğer rotor çok yavaş dönüyor ise verim düşer, çünkü kanatları etkilemeden geçen rüzgar miktarı daha fazladır. Eğer rotor çok hızlı dönüyorsa rotor verimi yine düşer, çünkü bir kanatın neden olduğu türbülans gittikçe artan bir oranla takip eden diğer kanadı etkiler. Genel bir yöntem olarak rotor verimi kanat uçlarındaki hız oranının (tip-speed-ratio=Kanat-uç hız oranı =  $\lambda$ ) bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Rüzgar türbinleri için kanat-uç hız oranı, kanat ucu dönüş hızının gerçek rüzgar hızına oranıdır. Formülle ifade edilirse;

$$\begin{aligned} \lambda &= \text{kanatların en uç noktasındaki lineer hız} / \text{giriş rüzgar hızı} \\ &= (\text{m/s}) / (\text{m/s}) = \text{birimsiz} \end{aligned}$$

$$= \frac{V_{\text{kanatucu}}}{V} = \frac{\omega_m * R_{\text{rotor}}}{v} \text{ olur.} \quad (2.24)$$

Burada;  $R_{\text{Rotor}}$  = Rotor yarıçapı (m),  $\omega_m = 2\pi f$  mekanik (kanat) açısal hızı, V = rüzgar hızı (m/s),  $V_{\text{kanat ucu}}$  = kanatların en ucundaki hız (m/s) , f= dönüş frekansı (Hz, 1/s) 'dır.

$\omega_m$  mekaniksel açısal hızı, dönüş hızının bir fonksiyonu olarak yazılabilir:

$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60} \text{ [rad/s]} \quad (2.25)$$

Burada  $f$ =devir/s ve  $n$ =devir/dk olduğu için  $f = n/60$  d/s olur.

Rüzgarın maksimum çıkış gücü,

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_r^3 \quad (2.26)$$

ile ifade edilir. Bu güç, rüzgar türbini aracılığı ile yararlı enerjiye çevrilecekse, bu noktada rüzgar hızı, türbin mil hızı ve kanat seçimine bağlı olarak değişim gösteren kanat verimi ( $C_p$ ) ve jeneratör verimi ( $\eta$ ) hesaba katılmaktadır. Güç eşitliği bu faktörlere göre düzenlenirse;

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p \pi R^2 V^3 \eta \quad (2.27)$$

ifadesi elde edilir. Burada,  $P$  (watt cinsinden) güç,  $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$  havanın deniz seviyesindeki yoğunluğu,  $C_p$ =rotor verimi (piyasadaki optimum değer 0.45),  $\eta$ =jeneratör verimidir (piyasaki optimum değeri 0.93).

### 2.6.1. Verimi Düşüren Faktörler

Rüzgar türbinlerinde verimi düşüren önemli faktörler şöyle sıralanabilir:

- Rüzgar rotorun kenarlarından kaçmaktadır. Betz'e göre türbin, rüzgar gücünün en fazla 0.593'ünü alabilmektedir ve pratikte bu oran genellikle 0.3-0.4 arasındadır. Bunun sonucunda rotor arkasındaki hız  $V/3$  olmaktadır.
- Yüksek torklu rotorların arkasında girdap akım olmaktadır. Düşük uç hız oranlarında daha fazla etkili olmaktadır.
- Kanat sayısının düşük olduğu durumlarda kanat uçlarında kayıplar olur.

- Sürüklenme kuvvetinden kaynaklanan kayıplar vardır. Yüksek uç hız oranında daha etkilidir.

## 2.7 RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE PARAMETRELERİ

Bir rüzgar türbininden maksimum verim alabilmek için türbinin kurulacağı bölgeye göre tasarımı yapılması gerekmektedir. Bölgenin rüzgar hızı tasarım için esastır. Rüzgar türbini çıkış gücü, rüzgar hızının küpünün bir fonksiyonu olduğundan türbinin kurulduğu bölgedeki ortalama rüzgar hızı dağılımları önemlidir. Rüzgarın hızı belirlendikten sonra tasarım aşamasına geçilir. Bölgeye özel optimal rüzgar türbini tasarımı, o bölge için en az maliyetli enerjiyi çıkarır. Modern rüzgar türbini tasarımında birçok karar önceden verilmelidir. Önceden belirlenmiş olan kabuller Bir bölge için optimal rüzgar türbini tasarımı, başka bir bölge için optimal tasarım olmayabilir çünkü rüzgar hızı dağılımı bölgeler arasında değişkendir. Ayrıca, en yüksek verimli rüzgar türbini optimal türbin olmayabilir. Daha az verimli bir türbin daha az enerji maliyeti olabilir. Optimum tasarım seçilecek bölgenin rüzgar hızı dağılımına göre değişecektir.

Rüzgar türbini tasarımı şu kriterlere göre yapılmaktadır:

- Rüzgar türbinin kullanılacağı uygulama ve yer seçimi
- Daha önceki uygulamalar
- Yük tahmini
- Seçilen bölgenin rüzgar hızı dağılımları ve tasarım rüzgar hızının belirlenmesi
- Rotor boyutlarının hesabı
- Sabit veya değişken hızlı rotor seçimi
- Jeneratör tipi ve kapasitesinin belirlenmesi
- Uç hız oranının belirlenmesi
- Kanat sayısı
- Kule yüksekliği
- Kanat malzemesi ve kanat profili
- Kanat profilinin ve en uygun kaldırma/sürüklenme oranına göre hücum açısının ve diğer kanat açılarının belirlenmesi
- Güç kontrolü ve aerodinamik kontrol methodunun belirlenmesi

- Dişli kutulu veya doğrudan tahrikli jeneratör seçimi
- Şebeke ile ilişkisi

Tasarım aşamasına rotor boyutlarının hesabı ile başlanır. Rüzgar-güç eşitliğinde optimum değerler yerine konularak optimum kanat çapı bulunur. Daha sonra kanat tasarımına geçilir. Kanat yüzeyi aerodinamik özellikler değerlendirilerek tasarlanır. Kanat tasarımında Kanat Elemanı Momentum Teorisi kullanılarak kanat kirişi hesaplaması günümüzde en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Söz konusu yöntemde tahmini bir kanat kiriş değeri belirlenerek Reynolds sayısı hesaplanmakta ve Reynolds sayısına göre kanadın kaldırma ve sürüklenme katsayısı belirlenerek maksimum güç bulunmaktadır. R yarıçapında bir rüzgar türbini rotoru kanadının modelini oluşturmak için öncelikle profil boyunu her bir r uzunluğu için hesaplamak gerekir (M.Önder, H.G.Yavuzcan, 2008). Optimum profil boyu; B kanat sayısı,  $C_L$  kaldırma kuvveti katsayısı ve  $\lambda_D$  dizayn devirlilik sayısı olmak üzere:

$$t_{opt} = \frac{1}{B} \frac{16 \pi r}{C_L} \sin^2 \left| \frac{\arctan \left( \frac{R}{\lambda_D r} \right)}{3} \right| \quad (2.28)$$

Türbin kanadı dizaynı için optimum profil boyunun yanı sıra, profil kiriş hattı ile pervane düzlemi arasındaki açı olan bağlama açısında  $\alpha_{bgl}$  bilinmesi gerekir. Bunun için  $\alpha_{opt}$  optimum hücum açısı,  $\alpha_1$  relatif hız vektörü ile profil kiriş hattı arasındaki açı olmak üzere,

$$\alpha_{opt} = \frac{2}{3} \alpha_1 \quad (2.29)$$

R rotor yarıçapı,  $\lambda_D$  dizayn devirlilik sayısı olmak üzere,

$$\tan \alpha_1 = \frac{R}{\lambda_D r} \quad (2.30)$$

ile verilmektedir. Buna göre optimum bağlama açısı  $\alpha_{bgl} = \alpha_1 - \alpha_D$  bağıntısından hesaplanabilir. Dizayn aşamasında, hücum açısı  $\alpha_D$  seçilir ve optimum bağlama açısı:

$$\alpha_{opt, b\ddot{g}\ddot{g}} = \frac{2}{3} \arctan \left( \frac{R}{\lambda_D r} \right) - \alpha_D \quad (2.31)$$

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

Kanatın giriş ve uzunluğu aerodinamik performansını etkiler. Dolayısıyla kanat profillerinin özellikleri yapılacak olan dizaynı etkiler. Kanat seçimindeki en önemli etken Reynolds sayısıdır. Çünkü en uygun hücum açısını ( $\alpha$ ) bulmak performans belirlemesi için gerekli bir husustur. Kaldırma ve sürüklenme katsayısı hem kanat kesitine hem de Reynolds sayısına bağlıdır. Modern türbinlerde kullanılan kanatların giriş ölçüleri MW büyüklüğündeki türbinlerde 2m'ye kadar ulaşmaktadır. Kanatların uç hız oranları ( $\lambda$ ) ise 0,5 den 10'a kadar değişmektedir. Dolayısıyla Reynolds sayısı da 0,3 milyon ile 10 milyon arasında değişmektedir. Reynolds sayısını bulmak için öncelikle görünür rüzgar hızının bulunması ( $V_a$ ) gerekir:

$$V_a = \frac{\frac{r}{R} \lambda V_\infty}{\cos \varphi} \quad (2.32)$$

Rüzgarın rotor düzlemine çarptığı açı  $\Phi$  eşitlik 3.7 ile hesaplanır:

$$\Phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{R}{r\lambda} \quad (2.33)$$

Reynolds sayısının hesaplanabilmesi için tahmini bir giriş uzunluğunun bilinmesi gereklidir. Giriş mesafesi  $c$ ;

$$c = \frac{16 \pi R \frac{R}{r}}{9 \lambda^2 B} \quad (2.34)$$

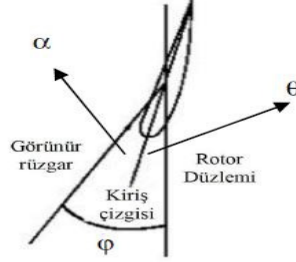
Burada B kanat sayısıdır. Reynolds sayısı:

$$Re = 68500 cV \quad (2.35)$$

formülü ile bulunur. Hesaplanan Reynolds sayısına bağlı olarak belirlenen kanat tiplerinin sürüklenme-kaldırma katsayılarına bakılarak en uygun kanat seçimi yapılır;

$$\gamma = \frac{C_D}{C_L} \quad (2.36)$$

Kanat uzunluğu boyunca kiris-uzunluk ( $c-R$ ) ve kanat açısı ( $\theta$ ) hesaplanır. Bu nedenle hesaplamalara başlamadan önce uç hız oranına karar verilmelidir. Kanat profili seçilmeden önce kanadın verimine ve sürüklenme/kaldırma oranına bağlı olarak kanat verimi hakkında yaklaşımda bulunulması gerekir. Şekil 2.16'da ise kanat düzleminde oluşan açılar gösterilmiştir.



**Şekil 2.16** Kanat düzleminde oluşan açılar ( $\beta = \phi - \alpha$ )

Şekil 3.4'de  $\beta$ =bükülme açısı,  $\alpha$ =hücum açısı,  $\phi$ =burulma açısı'dır. Kiriş çizgisi, veter çizgisi olarak da ifade edilir. Rüzgar açısı ve bölgesel uç hız oranı arasındaki ilişkiden dolayı optimum  $\Phi$  açısı,

$$\Phi_{opt} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \text{ olur.} \quad (2.37)$$

Optimum rüzgar açısı için bölgesel uç-hız oranının bulunması gerekir. Kanat elemanı momentum teorisi ile birlikte uç-kayıp katsayısı hesaba katılırsa seçilen kanat için rotordan maksimum güç elde edecek şekilde boyutlandırma yapılır. Boyutlandırma

işlemi, verilen kanat boyunun N parçaya bölünerek her bir istasyon için ayrı ayrı hesaplama yapılarak gerçekleştirilir. Kanat elemanı için bölgesel uç kayıp katsayısı,

$$\lambda_{r,i} = \lambda \frac{r_i}{R} \text{ olur.} \quad (2.38)$$

Optimum  $\Phi$  açısı formülünde yerine konulursa,

$$\Phi_{opt} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_{r,i}} \quad (2.39)$$

olarak hesaplanır. Her bir kanat elemanı için uç kayıp faktörü,

$$F_i = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \exp \left[ \frac{-\frac{B}{2} \left[ 1 - \frac{r_i}{R} \right]}{\frac{r_i}{R} \sin \varphi_{opt,i}} \right] \right] \text{ bulunur.} \quad (2.40)$$

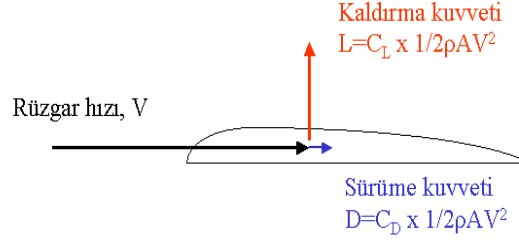
Kanat boyunca giriş uzunluğunun dağılımı, her bir eleman için,

$$c_i = \frac{8 \pi r_i F_i \sin \varphi_{opt,i} \cos \varphi_{opt,i} - \lambda_{r,i} \sin \varphi_{opt,i}}{BC_L \sin \varphi_{opt,i} + \lambda_{r,i} \cos \varphi_{opt,i}} \text{ olur.} \quad (2.41)$$

Kanat açısı ise,  $\theta_i = \varphi_{opt,i} - \alpha$  eşitliği ile belirlenir. Sonra eşitlik 3.16 kullanılarak türbinin üreteceği tahmini güç bulunabilir ( $N$ =jeneratör verimi,  $P_e$ =tahmini güç):

$$P_e = 0.6 * C_p * N * V_\infty^3 \quad (2.42)$$

Kanatlar için önemli olan kuvvetler kaldırma ve sürüklenme kuvvetleridir. Kaldırma kuvveti kanatların havada hareketini sağlarken sürüklenme kuvveti bunun tersi yönde etki eder. Kanatlar için kaldırma kuvveti büyük, sürüklenme kuvveti küçük olmalıdır. Bu iki kuvvetin oranı kanat profilini direkt etkiler.



**Şekil 2.17** Kanatlarda oluşan kaldırma ve sürüklenme kuvveti

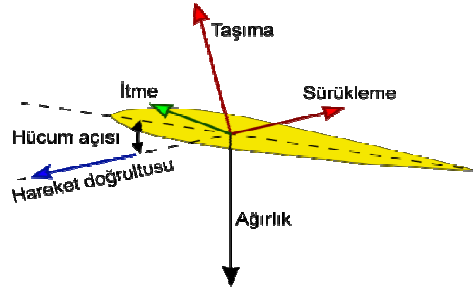
Betz kriterinin sağlanması için sürüklenme kuvvetininin optimizasyonu gereklidir. Bunun için de sürüklenme kuvvetinin minimum olması sağlanmalıdır. Pratikte en iyi taşıma/sürüklenme oranı  $5^\circ$  hücum açısında gerçekleşir.

Rüzgar türbinlerinde kanatların aerodinamik profili kanat performansının belirleyicisidir. Kanat profilindeki en ufak bir değişim, türbinin güç çıkış grafiğini değiştirir. Bu yüzden kanat tasarımı çok önemlidir. Kanat şekli, daha önceki tecrübeler dikkate alınarak itina ile seçilmelidir. Bu amaçla, en çok kullanılan kanat profilleri olan, NACA tarafından rüzgar tünellerindeki araştırmalarda belirlenen kanat profilleri kataloğundan önceden seçilmelidir. NACA 4 rakamlı ve 5 rakamlı profilleri vardır. 4 rakamlı serilerde, iyi yavaşlatma karakteristiği verir ve bölgedeki havanın pürüzlüğünden etkilenmez fakat olumsuzlukları vardır. Kanat açısı değişim (pitch) momenti yüksektir, kaldırma kuvveti katsayısı düşük ve sürüklenme kuvveti katsayısı büyüktür. Bu profiller küçük güçlü türbinler için uygundur. 5 rakamlı serilerde, yüksek kaldırma kuvveti katsayısı vardır ve kanat açısını değişim momenti küçüktür. Pürüzlüklerden en az etkilenir. Fakat bu serilerde yavaşlatma kontrolü (stall) zayıftır ve sürüklenme katsayısı nispeten fazladır. Fakat olumlu özellikleri ön planda olduğu için tercih edilmektedir.

#### *Kanat hücum açısı $\alpha$*

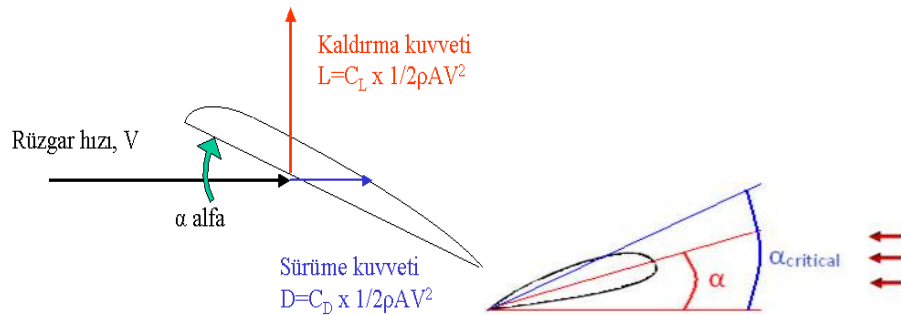
Kanadın referans hattı (veter çizgisi) ile hava akışı arasında yaptığı açı hücum açısı ( $\alpha$ ) olarak adlandırılır. Kanadın sıfır kaldırma kuvveti ürettiği açıdan kanadın rüzgarla yaptığı açıya kadar ölçülür. Hücum açısı  $15^\circ$ 'ye kadar arttıkça kaldırma kuvveti artar. Hücum açısı, taşıma kuvvetinin büyüklüğü ile ilgilidir. Taşıma kuvveti, bir kanat yüzeyi boyunca havanın oluşturduğu yüzeysel kuvvetlerin bileşkesidir. Hücum açıları, aerodinamiğin ve fiziğin temel kuralları gereği sınırlı açılardır ve genellikle  $\alpha < 15-20^\circ$

olmaktadır. Hücüm açısı büyüdükçe taşıma kuvveti de artar ancak bu aynı zamanda sürüklemeyi de artırır. Bu doğru orantılı ilişki tutunma kaybının (Stall) başladığı yer olan yani akış çizgilerinin kanat profilinden ayrılmaya başladığı yere kadar devam eder. Ancak bu noktadan sonra ayrılma başladığı için taşıma kuvveti küçülmeye başlar. Pratikte en iyi taşıma/sürüklenme oranı  $5^\circ$  hücüm açısında gerçekleşir. ( $\beta = \phi - 5^\circ$ )



Şekil 2.18 Kanata etkiyen kuvvetlerin vektörel gösterimi ve hücüm açısı

Hücüm açısının kritik değeri, maksimum kaldırma kuvveti üreten hücüm açısı değeridir. Bu açıya yavaşlatma hücüm açısı (stall angle of attack) da denir. Kritik hücüm açısından düşük açı değerlerinde, hücüm açısı arttıkça kaldırma kuvveti katsayısı ( $C_L$ ) da artar ve aynı zamanda hava, kanatın üst yüzeyinden daha pürüzlü akmaya ve kanatın üstünden ayrılmaya başlar. Kritik hücüm açısında kanatın üst yüzeyindeki hava akışı daha ayrıktır ve kanat rüzgar hızı için maksimum kaldırma kuvvetini üretir. Hücüm açısı artmaya devam ederse, kritik hücüm açısından sonra kanatın üst yüzeyindeki hava akışı daha da ayrık olacak ve kanatın ürettiği kaldırma azalacak ve sürüklenme kuvveti hızla artacaktır.



Şekil 2.19 Kanatta kritik hücüm açısı ( $\alpha_{critical}$ )

Kritik açı genelde  $15^\circ$ 'dir fakat kanat şekline bağlı olarak değişebilir. Fakat bu açı  $8^\circ$  ile  $20^\circ$  arasında olacaktır.



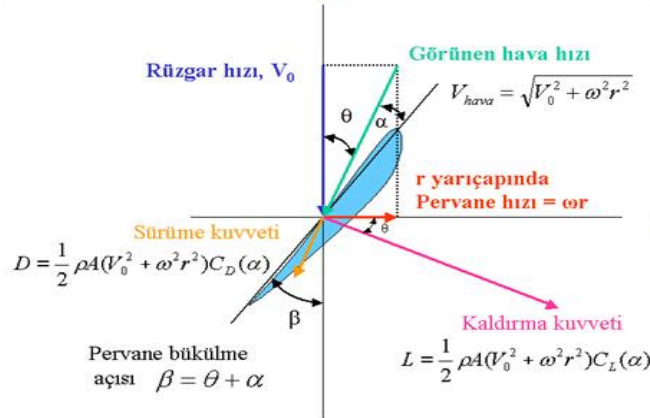
**Şekil 2.20** Kanatta stall durumu

### Kanat burulma açısı $\Phi$

Pervane kanatlarının burulma açıları (twist angle), kanadın ucundan itibaren merkeze doğru artmaktadır. Bu açının ortalama değeri  $10^\circ$  ile  $20^\circ$  arasında bulunmalıdır. İdeal kanatların eğim açıları  $16^\circ$  ile  $20^\circ$  arasında yapılır. Kanadın merkezinden ucuna doğru eğim açısı azalır. Buna benzer şekilde kalınlığı da uç tarafa doğru azalmaktadır. Bu incelleme kanatların hareketlerinde önemli rol oynar. Kanat ucundaki hız köke göre daha fazladır. Bu nedenle  $\phi$  açısı kanat boyunca değişir.  $\Phi$  = kanat burulma açısıdır.  $\Phi$  açısının aynı kalması için kanatlara burulma verilmelidir. Burulma açısı  $\phi$ ,

$$\tan(\phi) = \frac{\frac{2V}{r}}{\frac{R}{\lambda V}} = \frac{2R}{3r\lambda} \quad (2.43)$$

formülü ile ifade edilir.



**Şekil 2.21** Kanatta oluşan açılardan ve sürüklenme-kaldırma kuvvetinin x-y düzleminde gösterimi

*Kanat profili veter (kiriş) uzunluğu*

Ortalama veter uzunluğu bir çok hesaplamada bileşen olarak yer aldığından hava araçları tasarımı ve/veya uçuş mekaniği analizlerinde büyük önem taşır.

$c = r$  yarıçapı için veter uzunluğu ve  $B =$  pala sayısı olarak tanımlanırsa;

$$c = \frac{16\pi R(R/r)}{9\lambda^2 B} = 4D/(\lambda^2 B) \text{ olur.} \quad (2.44)$$

Burada  $r = 3R/4$ 'dür. Buradan şu sonuçlar çıkar:

- Kiriş uzunluğu yarıçap ile ters orantılıdır. Kiriş uca doğru küçülür.
- Kiriş uzunluğu kanat sayısı ile ters orantılıdır. Az kanat sayısında kiriş kalınlaşır.
- Kiriş uzunluğu uç hız oranı ile ters orantılıdır. Düşük uç hız oranında kiriş kalınlaşır.

Rüzgarın hızı ile rotorun dönme oranı arasındaki ilişki, boyutsuz bir faktör olan uç-hız-oranı ( $\lambda$ ) ile karakterize edilir. Eğer  $\lambda=1$  ise, pervanenin dönüş hızının rüzgar hızına eşit olduğu görülür. Örneğin kanat uç hızı 70 m/s, rüzgar hızı 10 m/s ise uç hız oranı 7 olur. Uç hız oranı tasarımda önemli bir noktadır. Kanat uç hız oranı, ( $\lambda = \Omega R/V$ ), shaftın devir sayısını dolayısıyla  $C_p$ 'yi (verim faktörü) etkilemektedir. Uç hız oranı, türbinin dönme sayısı ile orantılıdır.

Rüzgar türbini rotoru çok yavaş dönerse, rüzgarın büyük bir kısmı kanatların arasındaki boşluklardan bozulmadan geçer ve çok az güç üretir. Diğer yandan rotor çok hızlı dönerse dönen kanatlar aralıksız duvar gibi olacaktır ve rüzgar akışını engelleyecektir, böylece yine güç çıkışı az olacaktır. Bu yüzden rüzgar türbinleri rüzgardan mümkün olan en yüksek gücü çıkarabilmeleri için kendilerinin optimal uç-hız-oranlarında çalışacak şekilde tasarlanmalıdır. Şebekeye bağlı üç kanatlı rüzgar türbinleri için optimal uç-hız-oranları 5-8 arasındadır.

Bir rüzgar türbininde uç hız oranı seçimi çeşitli faktörlere bağlıdır. Genellikle yüksek uç hız oranları istenir çünkü bu sayede jeneratörün yeterli çalışması için rotor dönme hızı daha fazla olacaktır. Fakat yüksek uç hız oranlarının birçok dezavantajı vardır:

- 80 m/s'den yüksek hızda dönen kanat uçları, ön kenarların erozyonuna maruz kalacak ve helikopter kanatlarındaki gibi özel korozyon koruma kılıfı gerektirecektir.
- Şaftın dönmeye başlamasının ağır olduğu durumlarda zorluklar başlar.
- Sürüklenme ve uç kayıpları artacağı için rotor verimi azalır
- Fazla rotor hızı, denetimsiz bir rüzgar türbini oluşturmakta, yıkıcı arızalara ve parçalanmaya bile sebep olabilmektedir. (Doç.Dr.M.Ragheb,2009)

Uç hız oranı formülü şu şekilde ifade edilir:

$$\lambda = \frac{\Omega r}{V} \quad (2.45)$$

Burada

$\Omega$ : rotorun açısal hızı,

r: rotor yarıçapı (m)

V: optimal rüzgar hızıdır (m/s)

$\Omega r$  = rotorun tip hızı (m/s),

$\Omega = 2\pi f$  (rotor açısal hızı, rad/s)

f = frekans (Hz, s<sup>-1</sup>)

Uç hız oranı, şaft devir hızını şu formüle göre etkiler:

$$\text{Şaft hızı} = 60\lambda V / (\pi D) \quad (2.46)$$

Optimum uç hız oranı, rüzgar türbininin kanat sayısına bağlıdır. Kanat sayısı azaldıkça, rotor daha hızlı dönecek ve uç hız oranı azalacaktır.

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{2\pi r}{B s} \approx \frac{4\pi}{B} \quad (2.47)$$

Burada B kanat sayısı, s yarıçapın yarısıdır. Bu formülden yola çıkılırsa iki kanatlı türbinler için optimum uç hız oranı  $\lambda_{opt} = \frac{4\pi}{2} \approx 2\pi \approx 6.283$ ,

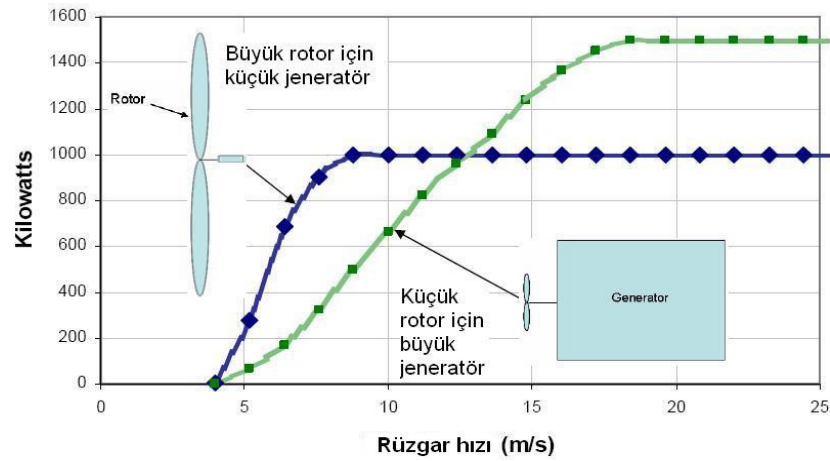
ve üç kanatlılar için  $\lambda_{opt} = \frac{4\pi}{3} \approx 1.33\pi \approx 4.19$  bulunur.

Optimum uç hız oranları, optimum değerlerden %25-30 daha yüksek olabilir. Optimum uç hız oranlarındaki kanatlar yüksek verimli olur ve bu kanatlar rotorun dönüş hızını artırır ve böylece daha fazla güç çıkışı elde edilir. Tipik bir üç kanatlı türbin tasarımındaki uç hız oranı,

$$\lambda_{opt} = \frac{4\pi}{3}(1.25 - 1.30) \approx 5.24 - 5.45 \text{ arası olur. (Doç.Dr. M.Ragheb, 2009) } \quad (2.48)$$

#### *Rotor – Jeneratör oranı*

Rüzgar türbinlerinde rotor büyüklüğüne uygun olan jeneratör gücü ve büyüklüğü seçimi önemlidir. Küçük rotor için küçük güçte jeneratör, büyük rotorlar için orta veya büyük güçlü jeneratörler uygundur. Büyük güçteki bir jeneratöre küçük rotor bağlanması enerji üretimini artırır fakat bu hem gereksizdir hemde maliyet açısından dezavantajdır. Küçük güçlü bir jeneratöre büyük rotor bağlanması da aynı şekilde dezavantajdır. Buyüzden rotor-jeneratör oranının hesaplanarak belirlenmesi önemlidir. Şekil 2.22’de rotor-jeneratör oranlarına göre enerji üretim miktarları kıyaslanmıştır.

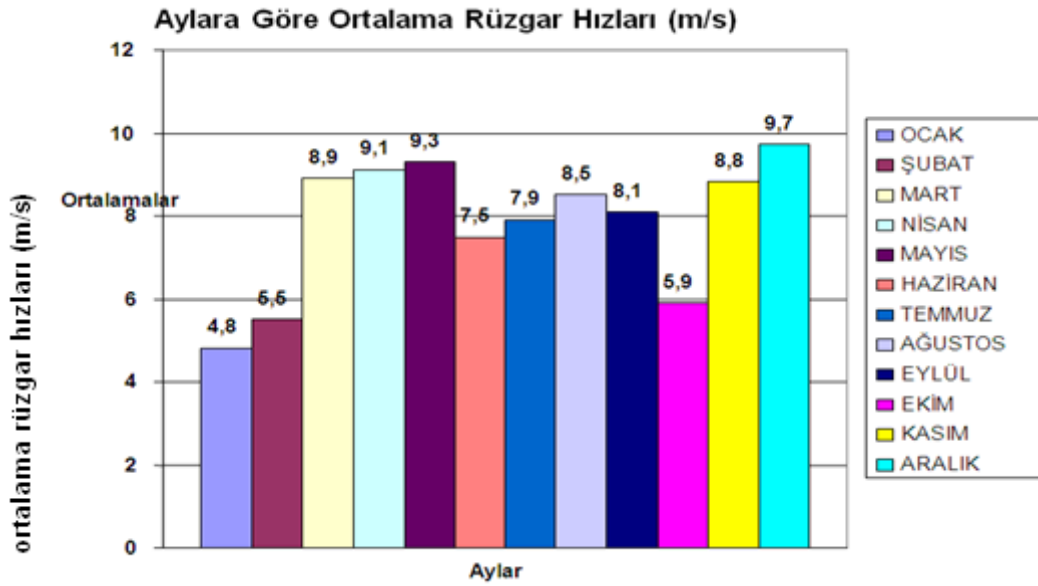


**Şekil 2.22** Rotor-jeneratör oranlarına göre enerji üretim miktarları

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, Bölge olarak Marmara bölgesi seçilmiş ve bölgenin rüzgar hızı verileri Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'ne bağlı İzmit Meteoroloji İstasyonu'ndan temin edilmiştir. Alınan rüzgar hızına uygun rüzgar türbini tasarım parametreleri belirlenmiştir. Belirleme aşamaları şu şekilde gerçekleşmiştir:

İzmit Meteoroloji Müdürlüğü'nden temin edilen 2004 yılı kayıtlarından saatlik rüzgar hızı değerleri derlenerek, aylık ortalama rüzgar hızlarına ait bilgiler Şekil 3.1'de verilmiştir.



**Şekil 3.1** Marmara bölgesi ortalama rüzgar hızları (Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü)

Temin edilen rüzgar hızına uygun olan türbin gücü ve kanat çapı, rüzgar-güç eşitliği (eşitlik 2.27) kullanılarak belirlenmiştir. Bu eşitlikte rüzgar hızı olarak, İzmit Meteoroloji Müdürlüğü'nden temin edilen 2004 yılı aylık rüzgar hızı verilerinin

ortalaması alınarak yıllık ortalama rüzgar hızı elde edilmiştir. Bulunan yıllık ortalama rüzgar hızında verimli çalışabilecek rüzgar türbini gücü belirlenmiştir. Türbin gücü belirlendikten sonra eşitlikteki diğer değerler için optimum değerler belirlenerek yerine konulmuş ve optimum rotor çapı (R) hesaplanmıştır. İki farklı türbin gücü (orta ve büyük güçlü) seçilerek bölge rüzgar hızına göre ne kadar büyüklükte kanat çapı gerektiği hesaplanarak kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamadan sonra türbin gücü ve kanat çapına karar verilmiştir. Çap bulunduktan sonra rotor süpürme alanı hesaplanmıştır.

Rüzgar türbini çevrim sistemlerinin çalışma hız aralıkları; aşırı yüklenme, makine parçalarının deformasyon tehlikesi gibi sebeplerden dolayı belirli sınırlar içerisinde tutulmak zorundadır. Çevrim elemanı belirli bir rüzgar hızında enerji üretmeye başlar. Bu hız başlama hızı (cut-in wind speed)'dir. Güç üretimine başlama rüzgar hızının küçük olması tercih sebebidir. Günümüzde kullanılan ileri teknoloji ürünü türbinlerde başlama hızı 2-4m/s arasındadır. Tasarım hızı ise sistemin nominal güç üretimi için gerekli olan rüzgar hızıdır. Nominal hız genellikle 11-14m/s arası değişmektedir. Sistemin her hangi bir şekilde zarar görmemesi için fren, yönlendirme gibi yöntemlerle makine güç üretimini dengeler veya keser. Bu hız ise kesme hızı (cut-out)'dir. Kesme hızı genellikle 20-28 m/s arası değişmektedir. (Gökhan YÜRÜNER, 1999). Bu değerler göz önünde bulundurularak rüzgar türbinin çalışma hız aralıkları seçilmiştir.

Rüzgar türbini rotor hızı bölgenin rüzgar rejimine uygun olarak seçilmiştir. Rüzgar türbinleri değişken veya sabit hızlı olarak tasarlanır. Rüzgarın sürekli ve yüksek hızda olduğu yerlerden sabit hızlı türbin kullanmak avantajlıdır. Rüzgar hızının değişken olduğu bölgelerde değişken hızlı türbinler kullanmak gerekmektedir. Bu bilgilere dayanarak rotor hız şekli belirlenmiştir.

Rüzgar türbini tasarımında, enerji dönüşümü zincirinin ilk halkası olan türbin kanatları önemli bir rol oynamaktadır. Rüzgardaki kinetik enerjinin rotor miline olabildiğince kayıpsız alınması, elde edilecek verimi önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple rüzgar türbini pervanesinin rüzgardan maksimum enerjiyi çekebilecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Kanat tasarım parametrelerinin belirlenmesinde M.Önder ve H.G.Yavuzcan (2008) çalışması olan "Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Kanadının Bilgisayar Destekli Tasarımı" ve Y. U. Sohn, Ch. H. Chun, Y. C. Kim, C. W. Chung, Y.

H. Kim, K. S. Han (2005) tarafından hazırlanan “Blade Design of a 750 kW Direct-drive Wind Turbine Generator System” makalesinden faydalanılmıştır.

Rotor uç-hız-oranı, eşitlik 2.47 kullanılarak belirlenmiştir. Nominal rotor hızı daha önceki uygulamalar dikkate alınarak tahmin edilmiştir.

Hız ve güç kontrol sistemi ve jeneratör sistemi önceki uygulamalar göz önünde bulundurularak ve teorik bilgiler ışığında seçilmiştir. Rüzgar türbinlerinde kontrol sistemleri tasarımı için birçok seçenek vardır. Tasarlanacak olan türbinin tipine ve amacına uygun olan kontrol sistemi tasarımda uyarlanacaktır. Durdurma (Stall) kontrolü daha çok değişken hızlı türbinlerde kullanılır. Çoğu üretici genellikle şebekeye direkt bağlı olan ve sabit rotor hızına ihtiyaç duyan asenkron jeneratörün kullanıldığı sistemlerde kullanırlar. Açık (Pitch) kontrolü daha çok sabit hızlı türbinlerde kullanılır. Yaw (eğim) kontrolü, küçük rüzgar türbinlerinde ve su pompalama amaçlı türbinlerde kullanılır. Aktif yavaşlatma (active stall) kontrolü orta ve büyük ölçekli güç kapasitesine sahip türbinlerde genellikle aktif durdurma (active stall) kontrol sistemi kullanılır (İrfan GÜNEY, Selçuk NOĞAY, Sezai TAŞKIN, 2001).

Seçilen jeneratör sisteminin düşük maliyetli, kolay bakım yapılabilir, iyi başarımı, esnek ve güvenilir olması, rüzgardan daha fazla enerji yakalayabilmesi, şebekeye bağlı çalışacaksa bağlantı noktasında dalgalanmaların az olması, sessiz çalışması gibi özellikler tüm uygulamalar için geçerli başlıca ortak niteliklerdir. Büyük güçlü bir jeneratör yüksek rüzgar hızlarında daha fazla enerji yakalayacaktır fakat daha fazla maliyeti olur. Rotor boyutları ile jeneratör kapasitesi birbiriyle uyumalıdır. Optimum uyuma, bölgenin rüzgar durumuna bağlıdır. Rotor - jeneratör oranı büyük olan sistemler, düşük rüzgar hızlarında rüzgarın enerjisini daha çok enerji yakalar. Rotor-jeneratör oranı küçük ise yüksek rüzgar hızlarında daha çok enerji yakalar. Bu oran bölgenin rüzgar hızı dağılımına göre optimize edilmelidir (J.Vergauwe, A.Martinez, A.Ribas, 2006). Genel olarak değişken hızlı türbinler için sabit mıknatıslı senkron jeneratör, sabit hızlı türbinlerde asenkron jeneratörler kullanılır. Bu özellikler dikkate alınarak jeneratör sistemi seçimi yapılmıştır. Ayrıca türbinin rotor-jeneratör bağlantı şekli (dişli kutulu ve dişli kutusuz) seçimi yapılmıştır.

Türbin jeneratör sisteminin şebeke ile ilişkisi seçilmiştir. Türbin bir rüzgar santralinde kullanılacağı için şebekeye bağlı olmasına karar verilmiştir. Şebekeye bağlı değişken hızlı türbinlerde, şebeke bağlantı noktalarında güç elektroniği düzenekleri gerekli olacağı için güç elektroniği sistem seçimi yapılmıştır.

Rüzgar türbinleri jeneratör sistemleri,

- Gerilim üretim biçimine göre (Sabit hız - sabit frekans, değişken hız - değişken frekans, değişken hız - sabit frekans)
- Türbin - jeneratör bağlantısına göre (Dişli kutulu / dişli kutusuz)
- Jeneratör yapısına göre (Asenkron/Senkron Jeneratörler )
- Jeneratör çıkış gerilimi düzeylerine göre (0.4kV, 0.7kV, 1kV, 3kV, 6kV)

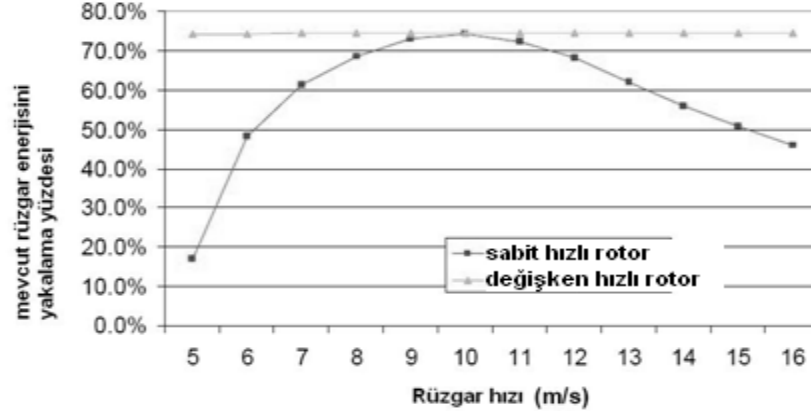
seçilebilmektedir. Bu şekilde jeneratör sistemi yapılmıştır.

*Sabit hız - sabit sıklık (frekans):* Kanat açısı ya da jeneratör karakteristikleri ayarlanarak sabit tutulur. Hız değişiminin çok geniş aralıklarda olduğu uygulamalar için uygun değildir. Sistem şebekeye bağlı ya da şebekeden yalıtılmış olabilir.

*Değişken hız - değişken sıklık:* Isıtıcı, direnç yükleri gibi frekansa bağımlı olmayan yükleri beslemede şebekeden yalıtılmış sistemlerde kullanılan üretim biçimidir.

*Değişken hız - sabit sıklık:* Değişken hızlı yel enerjisi dönüşüm sistemleri ile hem düşük hem de yüksek yel hızlarında daha fazla çıkış gücü elde etmek olanaklıdır. Böylelikle kurulu güce göre yıllık daha fazla enerji üretimi gerçekleşir. Hem yatay hem de dikey eksenli türbin kullanımı ile değişken hız altında istenilen kazanç sağlanabilir.

Şekil 3.2'de sabit hızlı rotor ile değişken hızlı rotorun her rüzgar hızında ne kadar rüzgar enerjisi yakaladığı yüzde olarak kıyaslanmaktadır. Değişken hızlı rotor her rüzgar hızında daha çok enerjiyi yakalamaktadır. Rüzgarın sabit olduğu yerlerde ise sabit hızlı rotor kullanmak maliyet açısından avatajlı olmaktadır çünkü değişken hızlı sistemlerde ek güç-elektroniği düzenekleri ek maliyet çıkarmaktadır.



**Şekil 3.2** Değişken ve sabit hızlı rotorların farklı rüzgar hızlarına göre mevcut rüzgar enerjisinden faydalanma yüzdeleri

Jeneratör sistemi seçimi için değişken hızlı sistemlerde sabit mıknatıslı senkron jeneratör şu açılardan avantajlı olduğu belirlenmiştir:

- Güç ve voltaj dalgalanması daha azdır.
- Çok gürültü çıkaran dişli kutusu olmadığı için gürültü daha azdır.
- En büyük avantajı herhangi bir hızda güç üretebilmesidir
- Dişli kutusu olmadığı için bakımı daha kolaydır
- Sabit mıknatıslı jeneratör tipi daha basit yapıdadır ve yüksek verimlidir.

Türbinde rotor-jeneratör oranının uygun olarak seçilmesinin enerji üretim miktarı üzerinde önemli etkisi olacağı için bu oran belirlenmiştir.

Türbinler jeneratörün şebekeye bağlantı şekline göre çeşitli şekillerde seçilmektedir. Jeneratörün kutup sayısına ve dönüş hızına bağlı olarak istenen frekansta gerilim üretilir. Senkron jeneratör kullanılacağından, belirlenen türbin gücüne uygun olan jeneratör gücü kutup sayısı hesaplanmıştır.

**Tablo 3.1** Jeneratör seçiminde kutup sayısı ve dönüş hızı

Frekans	50 Hz	60 Hz
Kutup Sayısı	Dönüş Hızı(rpm)	Dönüş Hızı(rpm)
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600

Rüzgar hızı yükseklikle artmakta ve bu yükseklikle birlikte rüzgar hızı daha az değişken olmaktadır. Fakat kule yükseldikçe maliyet de artmaktadır. Bu yüzden optimum bir kule yüksekliği seçimi yapılmıştır. Türbinin rüzgardan en iyi şekilde faydalanabilmesi ve çevredeki engellerden etkilenmesini en aza indirmek için daha önceki uygulamalar da gözönünde bulundurularak optimum kule yüksekliği belirlenmiştir.

Rüzgar türbinin enerji performansı, türbinin güç eğrisi ile verilmiştir. Türbinin güç eğrisi, değişik rüzgar hızlarında türbinin elektrik enerjisi çıkışını göstermektedir. Şekil 3.3'de ideal bir rüzgar türbininin güç eğrisi gösterilmiştir.

Tasarlanan türbinin güç eğrisi çıkarılmıştır. Bu grafik oluşturulurken şu kriterlere dikkat edilmiştir:

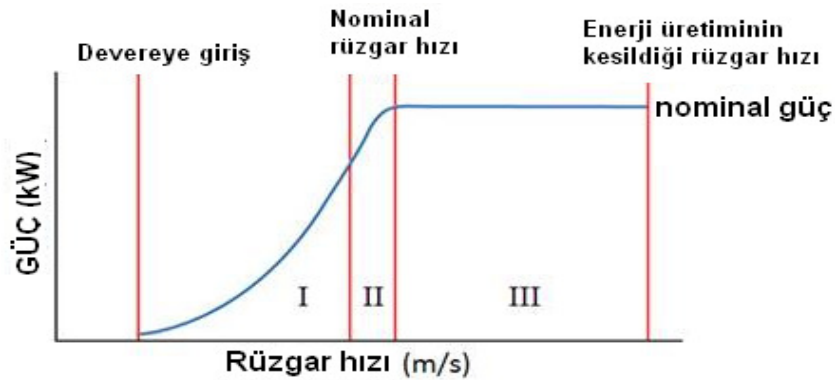
$C_p$  değeri (performans katsayısı), güç çıkışını belirler.

$$C_p = \frac{P_m}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (3.1)$$

Dolayısıyla türbinden elde edilen gerçek güç

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 = C_p P_w \quad (3.2)$$

Burada  $P_m$  üretilebilecek maksimum güç,  $P_w$  rüzgarın gücüdür.



Şekil 3.3 İdeal rüzgar türbini güç eğrisi (<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/8189>)

#### 4. BULGULAR

Bu tez çalışmasında genelde Marmara bölgesi, özelde ise İzmit bölgesi esas alınarak bu bölgede verimli çalışabilecek 500 kW kapasiteli yatay eksenli bir rüzgar türbini tasarım aşamaları anlatılmıştır.

Bölgenin yıllık ortalama rüzgar hızı hesabı için Şekil 3.1 grafiğindeki bilgilere dayanarak rüzgar hızlarının ortalaması alındığında ortalama rüzgar hızı 7,8 m/s hesaplanmaktadır. Çalışmada 500 kW kapasiteli rüzgar türbini için üç farklı rüzgar hızındaki rotor çapları hesaplandı. Rotor süpürme alanı ve kullanılacak jeneratörün kutup sayısı hesaplandı. Türbinin rotor hızı, uç-hız-oranı, jeneratör sistemi, jeneratör tipi, şebeke ile ilişkisi, çalışma rüzgar hızı aralıkları, güç kontrol sistemi, nominal rotor hızı, kule yüksekliği ve kanat profili daha önceki çalışmalar ve uygulamalar dikkate alınarak seçim yapılmıştır. Bulunan ortalama rüzgar hızı, orta şiddette rüzgar olduğu için türbin gücü orta güçlü seçilmiştir (500 kW).

Eşitlik 2.27'e göre üç farklı rüzgar hızına göre (rüzgar hızı olarak minimum, maksimum ve ortalama rüzgar hızı değerleri) rotor çapı hesabı yapıldığında,

**Tablo 4.1** 500kW kapasiteli rüzgar türbininin üç farklı rüzgar hızındaki kanat çapı

Nominal Güç	Rüzgar Hızı	Kanat Çapı
500 kW	4.8 m/s	71 m
500 kW	7.8 m/s	34 m
500 kW	9.7 m/s	25 m

Tablo 4.1’de görüldüğü gibi 4,8m/s’lik rüzgar hızı için bulunan rotor çapı astronomiktir ve görüntü, kapladığı alan ve üretim açısından uygun değildir. 7,8 m/s’lik rüzgar hızına göre yapılan hesaplar ise piyasada kullanılan 500 kW kapasiteli türbinlerle kıyaslandığında rotor çapı fazla bulunmuştur. Marmara bölgesinin maksimum rüzgar hızına göre (9.7 m/s) yapılan hesaplamada bulunan 25 metrelik rotor çapı piyasadaki 500 kW kapasiteli rüzgar türbinlerle kıyaslandığında uygun sonuç vermiştir. Bu nedenle türbinin nominal rüzgar hızının 10 m/s ve optimum rotor çapının 25 metre alınması uygun bulunmuştur.

Eşitlik (2.27) kullanılarak rüzgar hızına göre güç hesabı yapıldığında, büyük güçlü (1MW gibi) türbinin 10 m/s rüzgar hızında verimli çalışabilmeleri için çok büyük kanat çapı gerekmekte olduğu ve bunun görüntü açısından uygun olmadığı ve büyük maliyet gerektirdiği belirlenmiştir. Bunun yerine orta güçlü türbin (500 kW gibi) seçildiğinde ve bölgenin ortalama rüzgar hızı değeri kullanılarak eşitlik (2.27) ile hesaplama yapıldığında bulunan kanat çapı miktarı normal değerler içinde bulunmuştur. Bu rüzgar hızında daha küçük güçlü türbinler de verimli çalışabilecektir. (Piyasada kullanılan değerlerin araştırılmasında Danimarka’da rüzgar türbini alanında üretim, satış, kurulum ve servis sağlayıcılığı yapan, dünya rüzgar türbini pazarında %28 pazar payı ile birinci sırada olan Vestas firmasının değerleri alınmış, diğer üreticilerin de bu değerlere yakın değerlerde üretim yaptığı belirlenmiştir). Rüzgar-güç formülünde üretilen güç değişken olarak alındığında; 10 m/s rüzgar hızı sabit alınarak kanat çapı ve üretilen güç değişimi Tablo 4.2’deki gibi bulunmuştur: Jeneratör verimi 0.93 (piyasadan alınan en yüksek jeneratör verimi),  $C_p = 0.45$  (piyasadaki optimum değer) alınırsa:

**Tablo 4.2** Belirli bir rüzgar hızına göre kanat çapı ve üretilen maksimum güç

Nominal Güç	Rüzgar Hızı	Kanat Çapı
500 kW	10 m/s	23.7 m
1 MW	10 m/s	33.5 m
1 MW	14 m/s	20.2 m

Tablo 4.2’de görüldüğü gibi rüzgar hızı sabit alınarak üretilen gücü artırmak için kanat çapının önemli oranda artması gerekmektedir. Yüksek güçlü türbin, düşük rüzgar hızına

göre tasarlanırsa hem kanat maliyeti hemde görüntü açısından uygun sonuç çıkmayacağı görülmüştür. Bu tabloya göre rüzgarın hızı arttıkça, aynı gücü üretmek için gerekli olan kanat çapı azaldığı ve rüzgar hızı sabit alınırsa kanat çapı arttıkça üretilen gücün de artacağı görülmüştür. Ayrıca 14m/s'lik rüzgar hızında bulunan kanat çapı en uygun değer olduğu halde Marmara bölgesinin ortalama rüzgar hızı 14m/s altında olduğu için, bu rüzgar hızı ve türbin gücü değeri bölge için uygun olmamaktadır. Bu nedenle türbin gücü olarak 500 kW ve nominal rüzgar hızı olarak 10 m/s ve kanat çapı 25 m olarak alınmıştır.

Bölgedeki rüzgar hızı değişken olduğu için türbin rotorunun değişken hızlı olması ve Türkiye elektrik sisteminin 50 Hz değerinde sabit olmasından dolayı üretilen frekans bakımından 50 Hz değerinde sabit frekanslı olması uygun bulunmuştur.

Bölgenin rüzgar rejimi dikkate alındığında optimum rüzgar enerjisi dönüşümü değişken hızlı rüzgar türbini jeneratörleri kullanarak gerçekleşecektir çünkü bu sistem değişken rüzgar hızlarında da verimli olmakta ve türbin üzerindeki zorlamayı azaltmaktadır (J.Vergauwe, A.Martinez, A.Ribas, 2006).

Jeneratör sistemi dişli kutusuz olarak seçilmiştir. Dişli kutusunun türbine verdiği ağırlık, gürültü ve dişli kutusundan kaynaklanan kayıplar sabit mıknatıslı çok kutuplu jeneratör kullanımı ile elimine edilmiştir. Dişli kutusundan kaynaklanan kayıpların giderilmesi Marmara bölgesinin orta dereceli olan rüzgarından optimum yararlanmayı sağlayacaktır. Jeneratör kutup sayısı eşitlik 2.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Rotor deviri 20 rpm, frekans olarak Türkiyenin elektrik sistemi frekansı olan 50 Hz alınırsa kutup sayısı 75 bulunmaktadır. Bu 75 kutuplu jeneratörün nominal hızı, rotor hız kontrolü karakteristiğinin belirlediği rotor maksimum hızına eşit olacaktır.

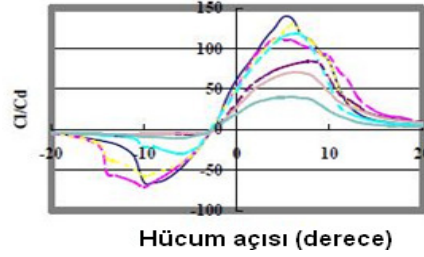
Rotor kanatları, değişken hızlı sistem için aktif stall kontrollü ve dişli kutusuz doğrudan tahrikli rüzgar türbini jeneratörüne göre olacaktır.

Uç-hız-oranı olarak, eşitlik 2.46'da belirtilen üç kanatlı türbinler için olan optimum uç-hız-oranı değeri alınmıştır.

Kanat tasarımında Y.U.Sohn ve arkadaşları (2005) tarafından yapılan 750 kW kapasiteli rüzgar türbini kanadı tasarımı çalışmasından yararlanılmıştır. Bu çalışmaya göre kanat geometrisi NACA 63 profiline dayanmakta ve AE02 serisi esasına uydurulmuştur. Bu çalışmada 750 kW kapasiteli doğrudan tahrikli rüzgar türbini kanadı tasarımı yapılmış ve uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında kanat tasarımı olarak bu tasarımın sonuçları kullanılacaktır. Bu sonuçlardan kanat hücum açısı, kanat kiriş uzunluğu, kanat kalınlığı, kanat burulma açısı, aksenal indüksiyon faktörü, kanat yarıçapına bağlı kaldırma/sürüklenme kuvveti oranları belirlenmiştir. Bu sonuçların grafiksel gösterimi şekil 4.3 – şekil 4.7 arasında gösterilmiştir. Bu grafiklerden yararlanılarak uygun değerler seçilmiştir ve sonuçlar Tablo 4.3’de gösterilmiştir.

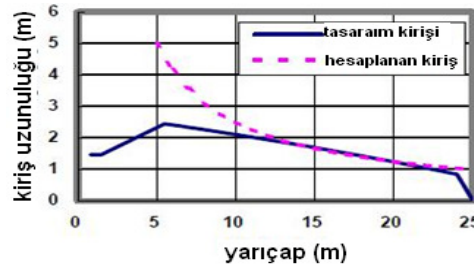
#### *Kanatın aerodinamik katsayıları*

Seçilen profilin aerodinamik karakteristiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Tasarımda hücum açısı olarak  $8^\circ$ , buna karşılık gelen  $C_L/C_D$  oranı 100 seçilmiştir.



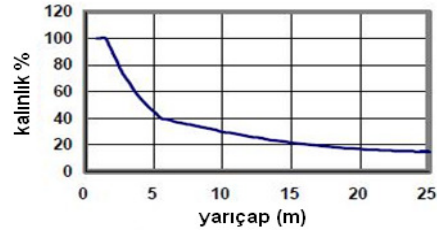
**Şekil 4.1** Hücum açısının kaldırma katsayısı ve  $C_L/C_D$  oranına göre değişimi

#### *Rotor Kanat Geometrisi*



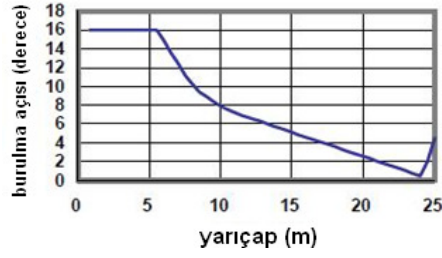
**Şekil 4.2** Tasarlanan kiriş uzunluğu ve yarıçap değişimi

*Kanat kalınlığı*



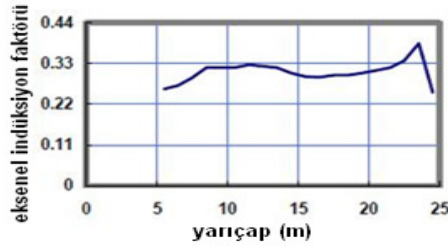
**Şekil 4.3** Kanat profilinin kalınlığının yarıçapa göre değişimi

*Kanat burulma açısı (twist angle)*



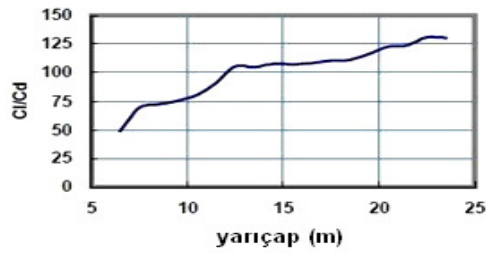
**Şekil 4.4** Kanat düzlemindeki burulma açısı ve yarıçap değişimi

*Eksenel indüksiyon faktörü*



**Şekil 4.5** Eksenel indüksiyon faktörü

*Kanat yarıçapına bağlı kaldırma/sürüklenme oranı*

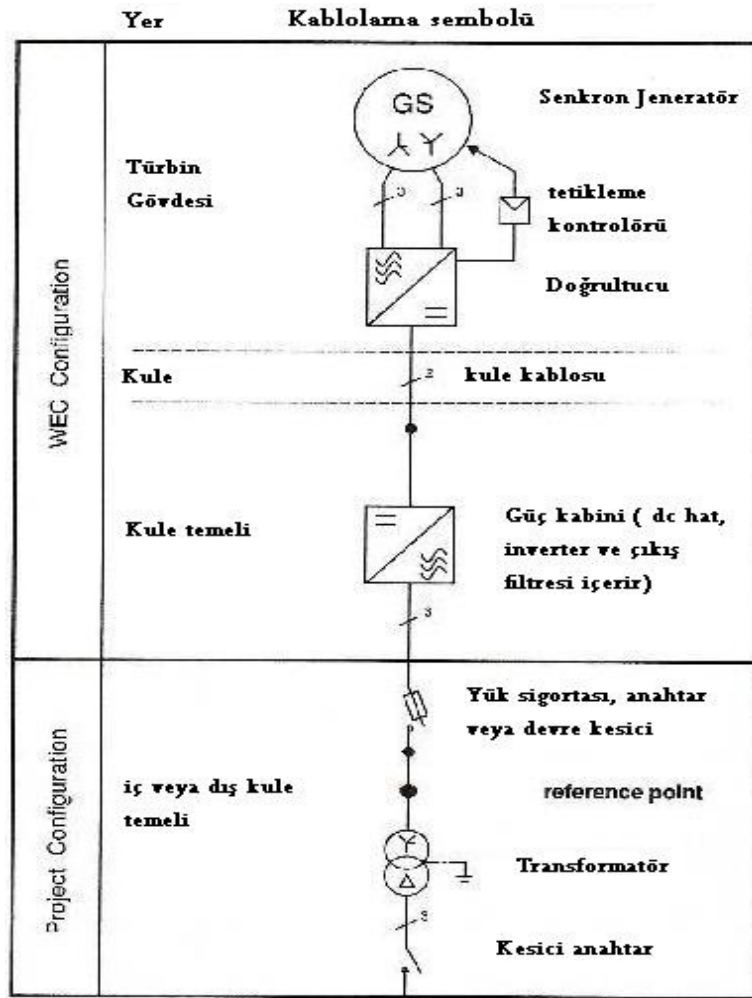


**Şekil 4.6** Kaldırma/Sürüklenme oranı

Tablo 4.3 Kanat tasarım parametreleri

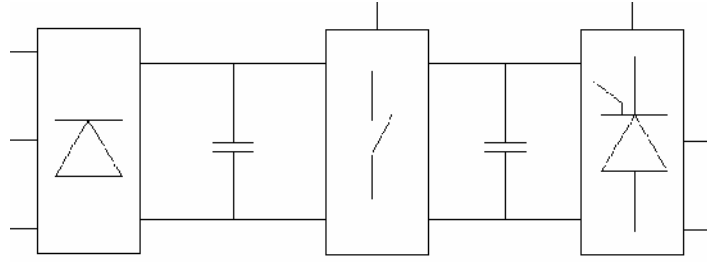
Kanat hücum açısı	8°
Hücum açısına denk gelen $C_L/C_D$ oranı	100
Kanat giriş uzunluğu	1 m
Kanat kalınlığı	% 18
Kanat burulma açısı	4°
Eksenek indüksiyon faktörü	0.23
Yarıçapa göre $C_L/C_D$ oranı	125

Türbin elektrik sisteminin tek hat şeması için Şekil 4.7’de gösterilen TEDAŞ’ın bir rüzgar türbini uygulama çalışmasından yararlanılmıştır.



Şekil 4.7 Orijinal tek hat şeması (RES-TEDAŞ Şebeke Bağlantısı, D.KÜLTÜR S.BAŞAK,2009)

Türbin jeneratör sistemi değişken hız – sabit frekans türbin sistemine göre olduğundan türbin şebekeye endirekt olarak konverter üzerinden bağlanması uygun bulunmuştur (J.Vergauwe, A.Martinez, A.Ribas, 2006). (Jeneratörde üretilen güç önce konvertere gidecek, orada değişken jeneratör frekansı sabit şebeke frekansına dönüşecek ve ardından şebekeye iletilecektir). Bu tasarımda güç elektroniği sistemi olarak şekil 4.8’de gösterilen gerilim kaynaklı konverter tercih edilmiştir (J.Vergauwe, A.Martinez, A.Ribas, 2006). Tasarımda kullanılacak doğrultucu ve inverter basitleştirilmesi uygun bulunmuştur (J.Vergauwe, A.Martinez, A.Ribas, 2006).

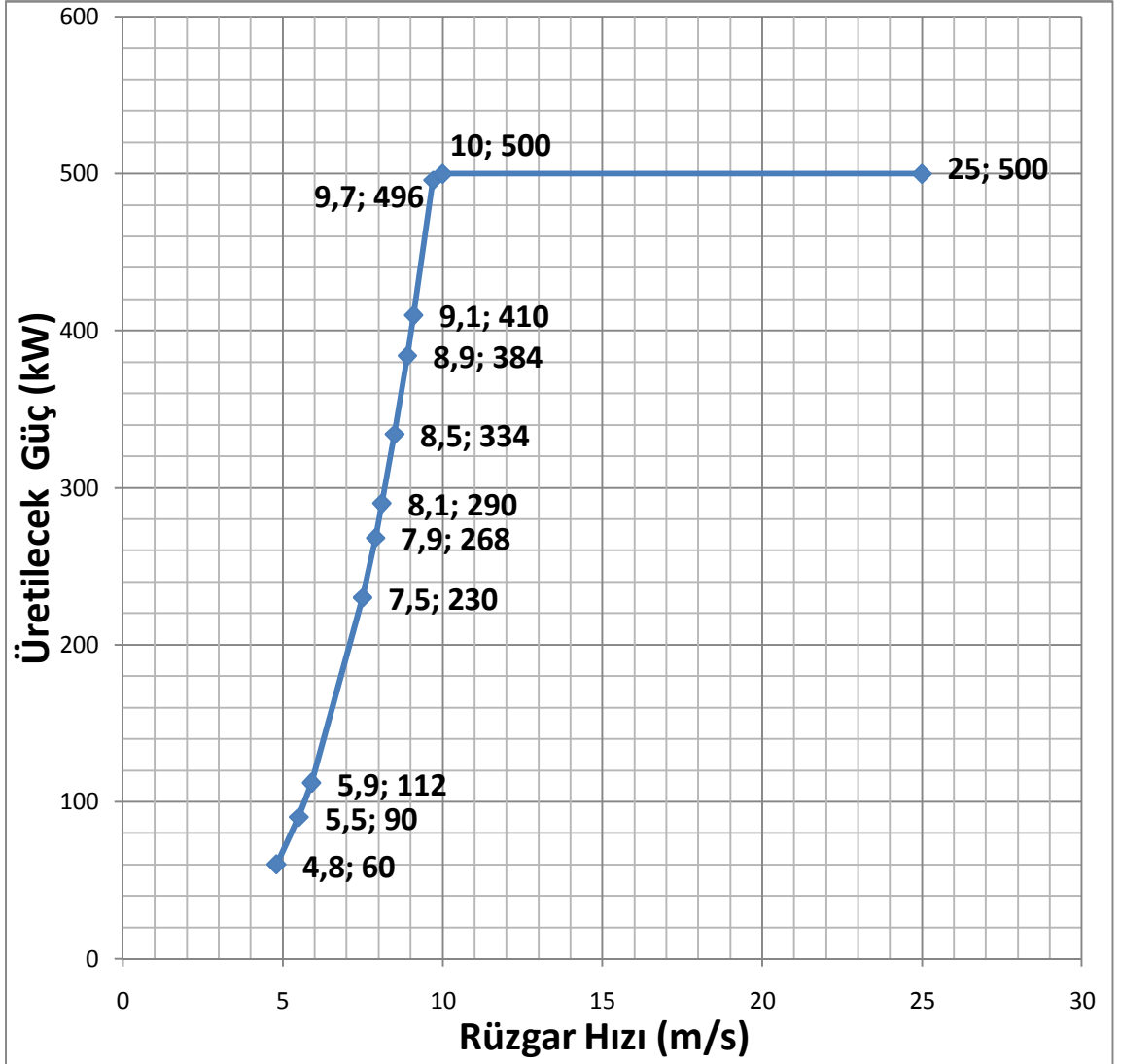


**Şekil 4.8** Konverter sisteminin global taslağı (Vergauwe, J., Martinez, A., Ribas, A., 2006)

Hız ve güç kontrol sistemi olarak değişken hızlı türbinlere uygun olan ve günümüzde en çok tercih edilen aktif-durdurma (active-stall) kontrol sistemi seçilmiştir.

Parametreler bu şekilde belirlendikten sonra türbinin güç eğrisi çıkarılmış ve şekil 4.9’da gösterilmiştir. Güç eğrisi hesaplanırken eşitlik 2.27 kullanılarak, Şekil 3.1’deki aylık rüzgar verileri alınarak güç hesabı aylara göre yapılmıştır. Bu eşitlikte rotor çapı  $R=52$ metre, türbin verimi  $C_p=0.45$ , jeneratör verimi  $\eta=0.93$ , hava yoğunluğu  $\rho=1.225\text{kg/m}^3$  olarak sabit alınmış, rüzgar hızları Şekil 3.1’de verilen rüzgar hızı verileri olarak değişken alınmıştır. Grafikte görüldüğü gibi türbin enerji üretimine başlama rüzgar hızı olan  $4\text{ m/s}$ ’de elektrik üretmeye başlayacak, rüzgar hızı arttıkça elektrik üretimi rüzgarın  $10\text{ m/s}$  (tasarım rüzgar hızı) olduğu aralığa kadar artacak ve sonraki rüzgar hızlarında güç üretimi sabit kalacaktır (aktif stall kontrol sistemi kullanılarak güç üretimi sabitlenecektir).

Şekil 4.9 Tasarlanan türbinin güç eğrisi



Bulunan güç eğrisi grafik şekil 3.3'deki ideal güç eğrisi ile karşılaştırıldığında olumlu sonuç verdiği görülmektedir.

Bulunan sonuçlar özet olarak Tablo 4.4'de verilmiştir. Bu sonuçlar Tablo 4.5'de özellikleri verilen Türkiye'nin ilk yerli rüzgar türbini üreticisi olan Soyut Holding'in SoyutWind adıyla ürettiği türbinlerden olan SoyutWind 500 modeliyle kıyaslanmıştır (<http://www.soyutwind.com/urundetay/25/soyutwind-500.html>).

SoyutWind marka türbinin optimum rüzgar hızı 13m/s ve kanat uzunluğu 19m; tasarlanan türbinin optimum rüzgar hızı 10m/s ve rotor çapı 24m'dir. Aradaki rüzgar

hızı farkından dolayı kanat uzunluğu artmıştır. Tasarlanan türbinin optimum hızı SoyutWind türbininden daha düşük olduğundan, tasarımda rüzgardan optimum faydalanma için kule yüksekliği 100m seçilmiştir. Kıyaslamalar sonucu, tasarımda kullanılan parametrelerin uygun olduğu görülmüştür.

**Tablo 4.4** Hesaplanan ve belirlenen tasarım parametreleri

<b>Nominal güç</b>	500 kW
<b>Nominal rüzgar hızı</b>	10 m/s
<b>Kanat sayısı</b>	3
<b>Optimum kanat uzunluğu</b>	23.7 m (eşitlik 3.24'e göre hesaplandı)
<b>Rotor süpürme alanı</b>	1764 m <sup>2</sup>
<b>Rotor hızı</b>	Değişken hızlı ve sabit frekanslı
<b>Jeneratör sistemi</b>	Dişli kutusuz
<b>Jeneratör tipi</b>	Sabit mıknatıslı senkron jeneratör
<b>Jeneratör gücü</b>	625 kVA
<b>Jeneratör kutup sayısı</b>	75 (eşitlik 2.3'den hesaplandı)
<b>Şebeke ile ilişkisi</b>	Şebekeye indirekt bağlantılı
<b>Çalışma rüzgar hızı aralığı</b>	3 – 25 m/s
<b>Güç kontrolü</b>	Aktif Stall kontrollü
<b>Uç hız oranı</b>	5
<b>Nominal rotor hızı</b>	25 rpm (devir/dakika)
<b>Rotor hız aralığı</b>	13 - 43 rpm
<b>Kule yüksekliği</b>	100 m
<b>Kanat profili</b>	NACA 63 serisi

**Tablo 4.5** 500 kW kapasiteli SoyutWind marka rüzgar türbini özellikleri

<b>500 kW Soyut Wind Marka Rüzgar Türbini</b>	
Kapasite (kW)	500
Devreye Girme rüzgar hızı (m/s)	4
Devreden Çıkma Rüzgar Hızı (m/s)	25
Optimum Rüzgar Hızı (m/s)	13
<b>ROTOR</b>	
Kanat Sayısı	3
Rotor Çapı (m)	39,22
Süpürme Alanı (m <sup>2</sup> )	1207,73
<b>KANAT</b>	
Kanat Malzemesi	Ahşap üzeri fiber kaplama
Uzunluk (m)	19
<b>KULE</b>	
Tip	Çelik Konik Boru
Hub Yüksekliği (m)	50
Kule Malzeme	Çelik
<b>GÜÇ KONTROL</b>	
Tip	Aktif Stall Kontrol

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında Marmara bölgesi rüzgar koşullarında verimli çalışabilecek örnek bir rüzgar türbini tasarım parametreleri verilmiştir. Rüzgar türbinlerinin tasarımında, türbinin kurulacağı bölgenin rüzgar hızı ve rejimi bilgileri en önemli husustur. Tasarım yapılırken bölgenin rüzgar durumu göz önünde bulundurulmuştur. Rüzgar koşulları ve bu rüzgar koşullarında verimli çalışabilecek türbin boyutu belirlendikten sonra türbinin genel konfigürasyonunun belirlenmesi için çeşitli tasarımlar kıyaslanmış ve türbinin tasarım parametreleri belirlenmiştir. Sıradaki adım belirlenen amaca uygun, istenen gücü sağlayacak türbinin aerodinamik tasarımının yapılması olmuştur. Bu amaçla daha önce tasarlanmış türbinlerden sağlanan veriler kullanılarak uygun uç hız oranı, kanat sayısı ve kanat profilleri belirlenmiştir.

Çalışmada bazı ön kabuller ve basitleştirmeler altında, elektrik üretimi amaçlı kullanılabilir bir rüzgar türbininin genel yapısı ve tasarımının saptanmasına ve elde edilecek performans ile ilgili bir tahminde bulunulmasına çalışılmıştır. Tasarım, mevcut türbinlerin verileri ve benzer çalışmaların yer aldığı makaleler ile kıyaslandığında uygun sonuçlar vermiştir. Ayrıca tasarım esnasında, türbinin kullanılacağı rüzgar koşullarının ve saha özelliklerinin iyi seçilmesinin en az türbin performansı kadar önemli olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple rüzgar türbinleriyle ilgili çalışmalar ile birlikte daha uzun süreli ve daha sık ölçümler yapılması yoluyla ülkemizdeki rüzgar enerjisi potansiyelinin daha geniş ölçekte ve daha kesin olarak tespit edilmesinin gerekli olduğu görülmektedir.

Tasarlanan türbin rüzgar çiftliklerinde ve özel amaçlı kullanılabilir kapasitedir. Genel olarak şu bilgilere ve sonuçlara ulaşılmıştır:

- Rüzgar türbinlerinin bölgeye özel tasarım mantığı,

- Düşük-orta rüzgar hızlarında daha büyük çaplı kanatlar kullanılarak ve gerekli tasarımlarla istenen çıkış gücüne ulaşılabilceği,
- Büyük türbinlerin kanat, kule ve kontrol elektroniği ile, orta boy (500 kW) türbinlerin jeneratör ve güç iletişim elektroniği birleştirilmesiyle ortaya yüksek kapasite kullanımlı yeni bir sistemin ortaya çıkabileceği.

Giriş bölümünde de değinildiği gibi ülkemizde alternatif enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisinin kullanımı gelişmiş ülkelerle kıyaslandığında çok azdır. Rüzgar enerji sistemlerinin daha yaygın kullanılması ve mevcut potansiyelin kullanıma geçirilmesi için benzer projelerin desteklenmesi yönünde atılan adımların rüzgar enerjisi kullanımını artıracığı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

1. ACAR, Yrd. Doç. Dr. Hayri, 2005, *Rüzgar Enerjisi*, İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi
2. AKGÜN, N., 2005, Rüzgar Enerjisi, *Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü Dört Mevsim Meteoroloji Bülteni*,
3. AKMANDOR, Prof.Dr. İbrahim Sinan, 2007, *Düşük Hızlarda Verimli Rüzgar Türbin Ana Parametreleri*, Orta-Dogu Teknik Üniversitesi
4. ALTAŞ, İ.H., MENGİ, O.Ö., 2008, Rüzgar Enerji Sistemlerinde Harmoniklerin Azaltılması, *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyum, UTES'2008*, 17-19 Aralık 2008, İstanbul
5. ATASEVEN, M.S., ATASEVEN, S., 2007, Senkron Rüzgar Türbinleri ve Kontrol Sistemleri, *Elektrik Mühendisleri Odası 4. Otomasyon Sempozyumu, Samsun Mayıs 2007*,
6. BAYRAM, M., 2008, *Rüzgar Türbinin Yapısı*, DCD Enerji Doğalgaz Isı Sistemleri Pazarlama ve Sanayi A.Ş.
7. BAYRAM, M., 2008, *Rüzgar Türbini Türleri*, DCD Enerji Doğalgaz Isı Sistemleri Pazarlama ve Sanayi A.Ş.
8. BOZTEPE, Dr.Mutlu; 2005, *Rüzgar Enerjisi*, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Bölümü, İzmir-Türkiye
9. BUTLER, N.D., 2006, *Design Optimization Of A Wind Turbine Gearbox And Bearings*, MSc Thesis, Cranfield University
10. CAVCAR, Prof. Dr. Mustafa, 2008, *Blade Element Theory*, Anadolu University School of Civil Aviation Eskisehir, Turkey
11. CEYLAN, T., 2008, *Enerji ve Çevre*, Muğla Üniversitesi
12. CHAPPELLI, M., 2008, *Wind Energy Basics Lecture 13*, Energy Efficiency and Renewable and Energy Workshop, Kingston
13. CHUN, Ch.H., SOHN, Y.U, KIM, Y.C., CHUNG, C.W.,HAN, K.S., 2005, *Blade Design of a 750 kW Direct-drive Wind Turbine Generator System*, POWER Center, Pohang University of Science and Technology
14. COLELLO, V., 2005, *Wind Turbine Technology Overview*, Global Energy Concepts for New York State Energy Research and Development Authority
15. COPÇUOĞLU,O., ÖNBİLGİN,G., 2007, *Yel Enerjisi Dönüşüm Sistemleri İçin Uygun Jeneratör Türlerinin Değerlendirilmesi*, EMO Bildirileri.
16. Çevresel Etki Değerlendirmesi Ve Planlama Genel Müdürlüğü, *Türkiyede Enerji ve Çevre*, 2005
17. ÇOLAK, İ., DEMİRTAŞ, M., 2008, Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminin Türkiye'deki Gelişimi, *TÜBAV Bilim Dergisi*, 1 (2), 64-72
18. DANA, Yrd.Doç.Dr.Aykutlu, 2008, *Rüzgar Değirmenleri ile Elektrik Üretimi Üzerine Notlar*, Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü
19. DEMİRCİ,E., ÖNBİLGİN, G., ŞENLİK, İ., 2007, *Yel Enerjisi İçin Sayısal Denetimli Asenkron Jeneratör Dizgesi*, Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi
20. DURSUN, E., BİNARK, A.K., 2008, *Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler*, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008, 17-19 Aralık 2008, İstanbul.
21. FIÇICI, F., DURSUN, B., GÖKÇÖL,C., 2007, Rüzgâr Enerji Sistemlerinden Kaynaklanan Gürültünün İncelenmesi, *SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi*, 11 (1), 54-62
22. *Geçmişten Bugüne Enerji Kullanımı*, 2008, Habitat Gençlik Derneği Yayınları

23. GENÇOĞLU, M.T., CEBECİ, M., 2001, Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 18-20 Ocak 2001 İzmir
24. GERDES, Gerhard J., 2005, Wind Turbine Technology Turbine Control, *Workshop on Renewable Energies*, November 14-25, 2005, Nadi, Republic of the Fiji Islands
25. GÜNEY, İ., NOĞAY,S., TAŞKIN, S., 2001, *Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Ve Güvenlik Sistemleri*, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, 2001, Kayseri
26. İLKILIÇ, Yrd. Doç. Dr. Cumali; 2009, *Türkiyede Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Ve Kullanımı*, Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi
27. Johnson, K.E., 2004, Adaptive Torque Control of Variable Speed Wind Turbines, *National Renewable Energy Laboratory*, August 2004, Page 14
28. KALE, S.A., SAPALI, S.N., 2009, Functional and Strength Design of one MW Wind Turbine Blade, *Proceedings Of International Conference On Energy And Environment*, March 19-21, 2009 Issn: 2070-3740
29. KINCAY, Prof.Dr.Olcay, YUMURTACI, Yrd.Doç.Dr.Zehra, BEKİROĞLU, Yrd.Doç.Dr.Nur, *Rüzgar Enerjisi 1.Bölüm*, Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
30. KUSIAK, Andrew, 2009, *Wind Turbine Generators*, The University of Iowa Intelligent Systems Laboratory
31. KÜLTÜR, D., BAŞAK, S., 2009, *Rüzgar Santrallerinin Temel Çalışma İlkeleri Ve Koruma Yönünden Şebekeye Bağlantı Kriterleri*, Demirer Holding A.Ş.
32. MARTIN, K., 2006, *Site Specific Optimization Of Rotor / Generator Sizing Of Wind Turbines*, A Thesis Presented to The Academic Faculty of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology
33. MILLER, M.J., 2009, *Daily Assignment*
34. MOHAMED, F.A., 2008, *Microgrid Modelling And Online Management*, Helsinki University Of Technology, Page 60
35. MORIARTY, P.J., HANSEN, A.C., *AeroDyn Theory Manual*, National Renewable Energy Laboratory,
36. NURBAY, N., ÇINAR, A., 2006, *Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması*
37. ONAT, C., KEPÇELER, T., ORGÜL, B.O. , 2006, Rüzgar Türbini Kanatlarının Katı Modellemesi, *Mühendis ve Makine*, 45 (533)
38. ONURAL, A.Ş., CERİT,B., DOĞDU, N., 2002, Çevre Dostu Bir Enerji Kaynağı Olarak Rüzgar Enerjisi Ve Isparta İli İçin Bir Uygulama, *Nigde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (2), 37-44
39. ÖNDER, M., YAVUZCAN, H.G., 2008, Yatay Eksenli Rüzgâr Türbün Kanadının Bilgisayar Destekli Tasarımı, *2008 Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi*, Sayı: 22, 1-11
40. ÖZDAMAR, A., 2000, Dünya Ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisinden Yararlanılması Üzerine Bir Araştırma, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (3,)133-145
41. ÖZKAYA, M.G., VARIYENLİ, H.İ., UÇAR, S., 2008, Rüzgar Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretimi ve Kayseri İli İçin Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi, *C.Ü.Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi* (2008) 29 (1)
42. ÖZÖN, N.N., KILIÇASLAN, İ., 2007, *Kocaeli İlinde Rüzgar Çiftliği İçin Yer Seçimi*, Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü

43. PAPAETHIMIOU, S.B., 2006, *Simulation and Control of a Variable Speed Wind Turbine with Synchronous Generator*, National Technical University of Athens
44. POLAT, Doç.Dr.Refik, 2008, *Rüzgar Enerjisi ve Kuvvet Makinaları*, Harran Üniversitesi
45. Polinder, H., *Member, IEEE*; Sjoerd W.H. de Haan, *Member, IEEE*; Maxime R. Dubois, *Member, IEEE*; Johannes G. Slootweg, *Member, IEEE*; 2004 “*Basic Operation Principles and Electrical Conversion Systems of Wind Turbines*” Paper ref: 069
46. Pullen,A., QIAO,L., SAWYER,S., 2009, *Global Wind Energy Report 2008, 2009 Belgium*, Global Wind Energy Council Renewable Energy House, GWEC
47. PULLEN, A., SAWYER, S., TESKE, S., AUBREY, C., 2009, *Global Wind Energy Outlook 2008, 2009 Belgium*, Global Wind Energy Council Renewable Energy House, GWEC
48. RAGHEB, M. Prof.Dr. , 2009, *Optimal Rotor Tip Speed Ratio*, University of Illinois at Urbana, Nuclear Plasma and Radiological Engineering
49. RAGHEB, M., 2009, *Theory of Wind Machines and Betz equation*, University of Illinois at Urbana, Nuclear Plasma and Radiological Engineering
50. RAGHEB, M., 2009, *Theory of Wind Machines, Betz Equation*, University of Illinois at Urbana, Nuclear Plasma and Radiological Engineering
51. SHENCK, N., 2004, *Wind Power Systems*, United States Naval Academy Department of Electrical Engineering
52. SHENCK, N., 2004, *Wind Power System Components*, United States Naval Academy Department of Electrical Engineering
53. SCHMIDT, M., 2007, *Wind Turbine Design Optimization*, Strategic Energy Institute, Georgia Institute of Technology
54. ROSE, C., 2009, *Ewea (European Wind Energy Association) 2008 Annual Report*, June 2009 Belgium, FSC certified paper
55. SU, Yrd. Doç. Dr. Şükrü, 2001, *Bildiriler Kitabı, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi*, Ekim 2001, Kayseri, Netform Matbaacılık Kayseri, 3-10
56. ŞEN, Çağın, 2003, *Gökçeada'nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi ile Karşılanması*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi
57. Schmidt, M., 2007, *Wind Turbine Design Optimization*, Strategic Energy Institute Georgia Institute of Technology
58. Shenck, N., 2004, *Wind Power Systems Theory*
59. TANRIÖVEN, Doç. Dr. Muğdeşem, 2008, *Rüzgâr ve Güneş Enerjili Güç Sistemleri Ders Notu*, Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü.
60. TUNCER, K., 2009, *Türkiye’de Termik Santraller*, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Enerji Birimi.
61. UYAR, Dr. Tanay Sıdkı, 2005, *Rüzgar Enerjisi Teknolojisindeki Gelişmeler*, Koceli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi.
62. UYAR, M., GENCOĞLU, M.T., YILDIRIM, S., *Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Generatör Sistemleri*, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi.
63. *Enerji Raporu*, 2008, TMMOB Makine Mühendisleri Odası
64. VARDAR, Doç.Dr. Ali., *EKER, Prof.Dr.Bülent., 2003, Tarımsal Mekanizasyon 21.Ulusal Kongresi, Rüzgar Türbini Kanat Yapısının Mil Gücüne Etkisinin Saptanması Üzerine Bir Araştırma*, Konya, 2003, 47-52

65. VERGAUWE, J., MARTINEZ, A., RIBAS, A., 2006, Optimization of a Wind Turbine using Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG), *International Conference On Renewable Energies And Power Quality*, SPAIN-Palma de Mallorca, 5-6-7 April 2006
66. WIEN,F., 2006, *Wind Energy Developments*,
67. *World Wind Energy Report 2008, 2009*, WWEA
68. Richardson, R.D.; Mc Nerney, G.M., 1993, Wind Energy Systems, *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, no. 3, pp. 378 – 389.
69. ÜZE, S., ÇELEN, S., MORALAR, A., 2008, *Rüzgar Türbini Tasarımını Etkileyen Parametreler ve Etkilerinin İzlenmesi*, Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi
70. Enerji Bakanlığı resmi internet sitesi [www.enerji.gov.tr](http://www.enerji.gov.tr)
71. Elektrik İşleri Etüt İdaresi resmi internet sitesi [www.eie.gov.tr](http://www.eie.gov.tr)
72. <http://www.windenergie.de>
73. <http://www.soyutwind.com/urundetay/25/soyutwind-500.html>
74. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/8189>

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı :** Fatma İkbal TEMİZ

**Doğum Yeri :** İstanbul-Beyoğlu

**Doğum Yılı :** 1984

### Eğitimi

**Yüksek Lisans:** 2008 – 2010 İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

**Lisans:** 2003 – 2007 Yakın Doğu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

**Lise:** 1999 – 2001 Özel Mavi Haliç Lisesi

**Ortaokul:** 1995 – 1998 Terakki Vakfı Özel Şişli Terakki Okulları

**Hazırlık:** 1994 – 1995 Terakki Vakfı Özel Şişli Terakki Okulları

**İlkokul:** 1991 – 1994 Terakki Vakfı Özel Şişli Terakki İlkokulu  
1989 – 1991 Özel Ata Koleji

**Yabancı Dil :** İngilizce

### İş tecrübesi

2006 Temmuz – 2006 Eylül: Türk Hava Yolları Teknik A.O.  
Stajyer mühendis

2008 Ekim - : Türk Telekomünikasyon A.Ş.  
Enerji Sistemleri Mühendisi