

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE YÖN KONTROLÜ  
ALGORİTMASININ ENERJİ DÖNÜŞÜMÜNE ETKİLERİ VE  
GELİŞMİŞ BİR ALGORİTMA ÖNERİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ayşe Gökçen KAVAZ**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**OCAK 2012**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE YÖN KONTROLÜ  
ALGORİTMASININ ENERJİ DÖNÜŞÜMÜNE ETKİLERİ VE  
GELİŞMİŞ BİR ALGORİTMA ÖNERİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ayşe Gökçen KAVAZ  
(301091036)**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU**

**OCAK 2012**



İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301091036 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ayşe Gökçen KAVAZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE YÖN KONTROLÜ ALGORİTMASININ ENERJİ DÖNÜŞÜMÜNE ETKİLERİ VE GELİŞMİŞ BİR ALGORİTMA ÖNERİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Bihrat ÖNÖZ**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Ayhan ALBOSTAN**      .....

Atılım Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **19 Aralık 2011**

**Savunma Tarihi :**      **26 Ocak 2012**



## **ÖNSÖZ**

Bu tez çalışmasını yönlendiren ve çalışmanın her aşamasında katkıda bulunan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca hayatım boyunca olduğu gibi bu süreçte de bana destek olan sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2012

Ayşe Gökçen KAVAZ  
Sistem Mühendisi





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
KISALTMALAR .....	xiii
SEMBOLLER .....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY .....	xix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. RÜZGAR ENERJİSİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ .....</b>	<b>3</b>
2.1 Rüzgar Enerjisi Kullanımının Tarihi.....	3
2.2 Rüzgarın Oluşumu.....	7
2.3 Rüzgarların Sınıflandırılması .....	9
2.3.1 Küresel rüzgarlar.....	9
2.3.2 Mevsimsel rüzgarlar.....	9
2.3.3 Günlük rüzgarlar .....	9
2.3.4 Yerel rüzgarlar .....	10
2.4 Zaman İçinde Rüzgar Değişimleri .....	10
2.4.1 Yıllar arası rüzgar değişimi.....	11
2.4.2 Yıllık ve mevsimlik değişimler.....	11
2.4.3 Sinoptik ve diurnal değişimler .....	12
2.4.4 Türbülans .....	12
2.5 Rüzgar Enerjisi Dönüşümünün Prensipleri .....	13
2.5.1 Aerodinamik model.....	13
2.5.2 Uç hızı oranı.....	17
2.5.3 Düşey rüzgar profili .....	17
<b>3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ .....</b>	<b>21</b>
3.1 Dönme Eksenlerine Göre Rüzgar Türbinleri.....	21
3.1.1 Düşey eksenli rüzgar türbinleri.....	21
3.1.2 Yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	22
3.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Bileşenleri .....	23
3.2.1 Rotor.....	24
3.2.2 Aktarım elemanları .....	24
3.2.3 Yönelme sistemi.....	25
3.2.4 Nasel.....	26
3.2.5 Ölçme sistemleri .....	26
3.2.6 Kule.....	27
<b>4. RÜZGAR TÜRBİNİ KONTROL SİSTEMLERİ.....</b>	<b>29</b>
4.1 Kontrol Sistemlerine Genel Bakış.....	29
4.1.1 Sistem.....	29
4.1.2 Kontrol sistemleri.....	31

4.2 Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Amaçları .....	33
4.2.1 Enerji dönüşümü .....	33
4.2.2 Mekanik yükler .....	35
4.2.3 Enerji kalitesi.....	35
4.3 Kontrol Stratejileri.....	36
4.3.1 Kanat açısı kontrolü .....	36
4.3.2 Hız kesme kontrolü .....	38
4.3.3 Jeneratör tork kontrolü .....	39
4.3.4 Yön kontrolü .....	39
<b>5. YÖN KONTROLÜ ALGORİTMALARI .....</b>	<b>43</b>
5.1 Sistemin Temel Prensipleri.....	43
5.2 Yönelme Algoritmaları.....	44
5.2.1 Algoritma 1 .....	45
5.2.2 Algoritma 2 .....	46
5.2.2.1 2 kademeli model .....	46
5.2.2.2 4 kademeli model .....	47
5.2.2.3 6 kademeli model .....	47
5.2.3 Algoritma 3 .....	47
5.2.3.1 Lineer fonksiyon tabanlı model.....	48
5.2.3.1 Eksponansiyel fonksiyon tabanlı model.....	49
5.3 Enerji Dönüşümleri .....	49
5.4 Simülasyon Sonuçları.....	51
<b>6. SONUÇ.....</b>	<b>57</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>59</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>63</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>67</b>

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1 : 2 kademeli model için erteleme süreleri.....	47
Çizelge 5.2 : 4 kademeli model için erteleme süreleri.....	47
Çizelge 5.3 : 6 kademeli model için erteleme süreleri.....	47
Çizelge 5.4 : Modellerin enerji dönüşüm sonuçları.....	54
Çizelge 5.5 : 5 m/s ortalama rüzgar hızı için enerji üretimleri .....	54
Çizelge 5.6 : 6 m/s ortalama rüzgar hızı için enerji üretimleri .....	54
Çizelge 5.7 : 7 m/s ortalama rüzgar hızı için enerji üretimleri .....	55
Çizelge 5.8 : 8 m/s ortalama rüzgar hızı için enerji üretimleri .....	55



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Afganistan'da bulunan rüzgar değirmeni kalıntıları .....	4
Şekil 2.2 : a) Charles F. Brush tarafından üretilen rüzgar türbini b) Poul la Cour'un ürettiği ilk rüzgar türbini .....	5
Şekil 2.3 : Chance, Yeni Zelanda 1902 .....	5
Şekil 2.4 : a) Balaclava rüzgar türbini b) Smith-Putnam rüzgar türbini .....	6
Şekil 2.5 : Üç hücre modeli .....	7
Şekil 2.6 : Coriolis kuvveti .....	8
Şekil 2.7 : Vadi ve dağ meltemleri .....	10
Şekil 2.8 : Van der Hoven spektrumu.....	11
Şekil 2.9 : Rotordan geçişin öncesi ve sonrasında rüzgar akışı.....	14
Şekil 2.10 : Hız oranı – güç katsayısı .....	16
Şekil 2.11 : Düşey rüzgar profili.....	18
Şekil 2.12 : Farklı bölgelerin rüzgar profili üzerinde etkisi.....	18
Şekil 3.1 : Düşey eksenli rüzgar türbinleri .....	22
Şekil 3.2 : Rüzgar türbinleri için çeşitli yönelme mekanizmaları .....	23
Şekil 3.3 : Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin temel bileşenleri. . .	23
Şekil 3.4 : Uç kanatçık.....	24
Şekil 3.5 : Yönelme sistemi .....	25
Şekil 3.6 : Nasel üzerindeki ölçme sistemi .....	27
Şekil 4.1 : Sistem blok diagramı .....	29
Şekil 4.2 : s-domeninde bir sistemin blok diagramı .....	31
Şekil 4.3 : Açık çevrim kontrol sistemi .....	31
Şekil 4.4 : Kapalı çevrim kontrol sistemi .....	32
Şekil 4.5 : İdeal güç eğrisi .....	34
Şekil 4.6 : Rüzgar türbini kanat kesidi. . .	37
Şekil 4.7 : a) Hız kesme kontrollü türbin b) Kanat açısı kontrollü türbin için rüzgar şiddeti-güç .....	39
Şekil 4.8 : Rüzgar türbini üstten görünümü.....	40
Şekil 5.1 : Transfer fonksiyonunun basamak giriş cevabı .....	45
Şekil 5.2 : a) Saat yönünün tersi b) Saat yönü için lineer erteleme süresi-sapma açısı grafikleri .....	48
Şekil 5.3 : a) Saat yönünün tersi b) Saat yönünde dönüşler için eksponansiyel erteleme süresi-sapma açısı grafikleri .....	49
Şekil 5.4 : Rüzgar şiddeti ve yönü .....	50
Şekil 5.5 : Rüzgar şiddeti-güç eğrisi.....	51
Şekil 5.6 : a) Erteleme süresi kullanılmayan model b) 4 kademeli model c) Eksponansiyel erteleme süreli model için açısız konum-zaman .....	52
Şekil 5.7 : a) Erteleme süresi kullanılmayan model b) 4 kademeli model c) Eksponansiyel erteleme süreli model için sapma açısı-zaman.....	52
Şekil 5.8 : a) Erteleme süresi kullanılmayan model b) 4 kademeli model c) Eksponansiyel erteleme süreli model için güç-zaman.....	53



## **KISALTMALAR**

<b>AC</b>	: Alternative Current
<b>BIBO</b>	: Bounded Input Bounded Output
<b>DC</b>	: Direct Current
<b>DSP</b>	: Digital Signal Processor
<b>LTI</b>	: Linear Time Invariant
<b>MIMO</b>	: Multiple Input Multiple Output
<b>PD</b>	: Proportional Derivative
<b>PI</b>	: Proportional Integral
<b>PID</b>	: Proportional Integral Derivative
<b>rpm</b>	: Round Per Minute
<b>SISO</b>	: Single Input Single Output
<b>WWEA</b>	: World Wind Energy Association





## SEMBOLLER

$A$	: Rotor alanı
$A_1$	: Rotor etkisinden önce disk alanı
$A_2$	: Rotordan geçtikten sonra disk alanı
$C_p$	: Güç katsayısı
$E$	: Enerji
$e$	: Hata
$F$	: Kuvvet
$m$	: Kütle
$\dot{m}$	: Kütle akış oranı
$P$	: Güç
$P_N$	: Anma gücü
$P_0$	: Serbest akış basıncı
$R$	: Rotor çapı
$r$	: Referans değer
$T_d$	: Erteleme süresi
$u$	: Giriş
$v$	: Hız
$v_1$	: Rotor etkisinden önce rüzgar şiddeti
$v_2$	: Rotordan geçtikten sonra rüzgar şiddeti
$v'$	: Rotordan geçiş sırasında rüzgar şiddeti
$\dot{v}$	: Hacim akış oranı
$v_{\text{cut-in}}$	: Devreye alma hızı
$v_{\text{cut-off}}$	: Devreden çıkma hızı
$v_N$	: Anma hızı
$y$	: Çıkış
$z$	: Yükseklik
$a$	: Pürüzlülük katsayısı
$\rho$	: Akışkanın yoğunluğu
$\lambda$	: Uç hızı oranı
$\omega$	: Açılal hız
$\beta$	: "Pitch" açısı
$\gamma$	: Hücum açısı
$\theta$	: Sapma açısı



# RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE YÖN KONTROLÜ ALGORİTMASININ ENERJİ DÖNÜŞÜMÜNE ETKİLERİ VE GELİŞMİŞ BİR ALGORİTMA ÖNERİSİ

## ÖZET

Rüzgar türbinlerinde zaman zaman birbiriyle çakışan çeşitli kontrol hedefleri bulunmaktadır. Bunların en önemlisi enerji dönüşümü optimizasyonudur. Rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kanat açısı değiştirme kontrolü, hız kesme kontrolü, jeneratör tork kontrolü ve rotor yönü kontrolü kullanılmaktadır.

Rüzgar türbinlerinde rotor yönü kontrolünün temel amacı rüzgar türbininin yatay rotor eksenini ve rüzgarın geliş yönü arasındaki sapma açısını azaltmak böylece enerji dönüşümünü artırmaktır. Aynı zamanda sapma açısı nedeniyle kanatlar üzerinde değişken yük oluşmasının da yön kontrolü ile önlenmesi sağlanmaktadır. Bu sayede türbin bileşenleri üzerindeki fatik yük (yorulma) azaltılmaktadır. Bu tez çalışmasında yön kontrolünün enerji dönüşümü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Rüzgarın sık ve ani değişimler gösteren yapısı nedeniyle klasik bir takip sistemi yön kontrolü için uygun bir çözüm değildir. Rüzgar yönü zaman zaman saniyeler bazında değişim göstermekte dolayısıyla rüzgar yönünün sürekli takip edilmesi enerji dönüşümü açısından iyi bir sonuç vermemektedir. Ayrıca yönelme mekanizmasının sürekli harekete maruz kalması mekanik bileşenler üzerinde aşırı yıpranmaya neden olmaktadır. Bu nedenlerle etkili bir yönelme kontrolü için klasik kontrolör dizayn yöntemlerinin yanında uygun algoritmaların geliştirilmesi gerekmektedir. Sisteme bazı durumlarda erteleme süresi eklenerek yönelmenin belli koşullar gerçekleştiğinde sağlanması rüzgar türbini yön kontrolünde sıkça kullanılan bir yöntemdir.

Bu çalışmada yatay eksenli rüzgar türbini yön kontrolü için erteleme süresi tabanlı modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerde üç farklı algoritma kullanılmıştır. Birinci algoritmada rüzgar türbininin genel çalışma prensipleri göz önünde bulundurularak rüzgar yönünün sürekli takibi sağlanmıştır. Böylece rüzgar yönünün her değişimine yönelme motorunun tepki vermesi sağlanmış ve bu durumdaki enerji dönüşümleri incelenmiştir. Oluşturulan ikinci algoritmada günümüzde rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılan kademeli bekleme süreleri kullanılmıştır. Bu algoritmada rüzgar yönü ve rüzgar türbininin yatay eksenini arasındaki açı kademelere ayrılmış, her kademe için farklı birer erteleme süresi belirlenmiştir. Bu algoritmanın kullanıldığı üç farklı modelde 180 derecelik sapma açısı aralığı 2, 4 ve 6 kademeye ayrılmış böylece kademe sayısının sistem üzerindeki etkisi görülmüştür. Üçüncü algoritmada erteleme sürelerinin belirlenmesi için sürekli fonksiyon tabanlı yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu algoritmada uygulanacak erteleme süreleri sapma açılarına bağlı fonksiyonlar ile belirlenmiştir. Lineer ve eksponansiyel erteleme süresi fonksiyonlarının kullanıldığı iki farklı model oluşturulmuştur.

Modeller MATLAB®/Simulink programı kullanılarak oluşturulmuş ve simülasyonları yapılmıştır. Giriş için gerçek bir bölgeden alınan rüzgar şiddet ve yön

verileri kullanılmıştır. Modellerin performans karşılaştırmalarının yapılmasında 2 MW güç kapasiteli bir rüzgar türbinine ait rüzgar şiddeti-güç eğrisi kullanılmıştır.

Simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında ölü zaman kullanılmayan modelin en düşük enerji dönüşümünü sağladığı görülmüştür. Kademeli modellerin kademe sayısı arttıkça daha yüksek enerji dönüşümü değerleri elde edilmiştir. Oluşturulan modeller arasında en iyi performansı eksponansiyel fonksiyon tabanlı erteleme süresi uygulanan model göstermiştir.

Farklı durumlar için en uygun algoritma, bölgenin rüzgar karakteristikleri ve kullanılan türbinin özelliklerine göre değişkenlik gösterebilir.

# **EFFECTS OF WIND TURBINE YAW CONTROL ALGORITHMS ON ENERGY CONVERSION AND AN ADVANCED ALGORITHM PROPOSAL**

## **SUMMARY**

The total energy demand of the world shows a continuous increase over the last decades. The strongest reasons behind this increase are the growth in population and the global economic growth. However, today's main energy supply; fossil fuels do not meet future's expected energy demand. Moreover, they have hazardous effects on the environment. Due to these reasons the search for alternative energy resources has been growing. Wind energy is one of the promising alternative energy resources with its low cost and high intensity comparing to the other renewable energy sources.

Wind turbine technology have been developing and the design of wind turbine control systems constitutes an important part of it. Wind turbine control systems have various aims main of which can be listed as to optimize energy conversion, provide power quality and prevent turbine from loads. These aims can sometimes be conflicting so convenient control strategies are required to provide a compromise between them. In middle and large scale wind turbines, pitch control, stall control, generator torque control and yaw control are the typical control strategies to reach the aims specified.

Wind turbine yaw mechanism aligns the horizontal axis of wind turbine with the wind direction to reduce yaw error between them. The primary aim of yaw control is to increase the energy conversion from wind by tracking wind direction. Yaw control is also necessary for alleviating the fatigue loads caused by the variation of torque on the rotor by misalignment of wind direction and rotor axis. The focus of this thesis is the effects of yaw control on the energy conversion efficiency of wind turbine.

Due to the general characteristics of wind direction and wind speed appropriate algorithms for wind turbine yaw control are necessary besides general controller design techniques. Wind direction generally shows often and frequent variations therefore tracking wind direction continuously does not give desired performance outputs. Therefore the response of the system should be delayed in some conditions. In this study various algorithms based on different time delay algorithms were generated to obtain an appropriate strategy for wind turbine yaw control. The related algorithms are; the algorithm without any time delay, the Quantized Time Delay Algorithm and the Function Based Time Delay Algorithm.

The control systems were constructed based on the general working principles of wind turbine yaw mechanism. The main principles applied to all models with three algorithms can be listed as follows. First of all, the transfer function of the system was approximated as a second order overdamped function as it shows consistent results to the typical behaviour of wind turbine yaw mechanism. High speed rotation of yaw mechanism produces large gyroscopic moment. Therefore to prevent the turbine from excessive loads caused by the large gyroscopic moment, the rotational speed of yawing was adjusted to  $0.475^\circ$  per second in the steady state region.

Yaw control system must not be sensitive to all the changes in the wind direction due to the fatigue loads caused by the continuous little movements of yaw mechanism. To avoid from these movements, the yaw motor is activated when the yaw error is bigger than  $5^\circ$ . The rotation path of the yaw system also affects the system performance. To track the wind direction by the shortest path, for  $5^\circ$ - $180^\circ$  counter clockwise and for  $181^\circ$ - $355^\circ$  clockwise movement according to the upper view of wind turbine was applied.

The rotational path of yawing is restricted by physical limitations of wind turbine model. In most of the wind turbines more than 4 turns in the same rotation causes cable twist problem, therefore more than 4 turns in the same direction was not allowed in the models generated. In that situation, the yawing is performed by the opposite direction.

The general principles specified were applied to all the models constructed in this study. However the models vary by their responses to the changes in the wind direction. Various models based on the three different algorithms were generated by using MATLAB<sup>®</sup>/Simulink.

To the first algorithm, the general principles discussed were applied without any time delay algorithm. Therefore a model that continuously tracks the wind direction was obtained.

In the second algorithm a common approach that is typically used in wind turbine yaw control was used. The main principle of the models with this algorithm is to divide yaw angle interval into groups and to determine a time delay value for each of the groups. By Quantized Time Delay Algorithm, rather than showing a reaction to all the changes of wind direction, the yaw mechanism is activated if the yaw error remains same after a certain amount of time. To determine the amount of time delay values, the magnitude of yaw errors were taken into account. For small yaw errors, a big time delay is assigned and as the yaw error approaches to  $180^\circ$  the time delay gets smaller. The wind direction and the horizontal axis of the wind turbine rotor is compared in every two seconds and the time delay interval was selected between 10 and 60 seconds. Time delay values for clockwise and counter clockwise rotations are symmetrical.

Three different models using quantized time delay algorithm were generated. In order to investigate the effects of sensitivity of this algorithm, models with different number of time delay groups were constructed. For the three different models,  $180^\circ$  of yaw error was divided into 2, 4 and 6 steps and a constant time delay was assigned to each of the groups.

An alternative approach for determining the time delay values was proposed in the third algorithm which is named as the Function Based Time Delay Algorithm. In this algorithm the general controller characteristics and the time delay values were used with a different approach. The values of time delay were determined by defining continuous functions related to yaw errors. By this method, it was aimed to obtain a more sensitive system comparing to the Quantized Time Delay Algorithm.

By using Function Based Time Delay Algorithm, two models were generated. The first one contains linear time delay functions depending on the yaw errors. In the second model of this algorithm, exponential time delay functions were used. The time delay functions were kept between 10 and 60 seconds to make consistent comparisons with the former algorithm. The simulations were performed in the

MATLAB<sup>®</sup>/Simulink environment. 4280 seconds of simulations were performed. For the wind direction and wind speed input a 10 min data belongs to a real site were used. It was assumed to be 2 seconds data.

To observe the effectiveness of the models, energy conversion results of them were compared. The wind speed-power curve of a 2 MW horizontal axis wind turbine was used in the simulations. The cut-in speed of the wind turbine is 2.4 m/s and the cut-out speed is 25 m/s. The yaw mechanism was activated if the wind speed was in this range.

The results show that the first algorithm that continuously tracks the wind direction gives the minimum amount of energy conversion. The models with quantized time delay algorithm extracts more amount of power from the wind comparing to the first algorithm. As the step number of the models increases, the energy conversion also increases. Amongst the models examined the best energy conversion results were obtained by the models using function based time delay algorithm. Exponential function based time delay model converted more energy than the linear function based model.

The results are also affected by the wind turbine features and the wind speed and direction distribution. Therefore the wind conditions of the site and wind turbine properties identifies the optimum solution. For the different cases, more convenient algorithms can be generated depending on the local wind conditions and the properties of the wind turbine used.





## 1. GİRİŞ

Dünyanın toplam enerji talebi küresel ekonominin gelişimi ve nüfusun artışına bağlı olarak artış göstermektedir. Öte yandan enerji arzında birinci sırada bulunan konvansiyonel enerji kaynaklarının çevre üzerindeki olumsuz etkileri ve kanıtlanmış fosil kaynak rezervlerinin gelecekte öngörülen talebi karşılayamayacak olması yeni enerji kaynakları arayışlarının hızlanmasına neden olmuştur. Rüzgar enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları içinde göreceli olarak düşük maliyeti ve yüksek yoğunluğu sayesinde önemli bir yere sahiptir.

Rüzgar enerjisine yönelik talep günden güne artmaktadır. 2010 yılı sonunda dünya genelinde 196.682 MW olan toplam kurulu güç kapasitesi, Haziran 2011 itibariyle 215.000 MW'a ulaşmıştır (WWEA, 2011). Bu talep artışı, rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerindeki teknolojik gelişmeleri beraberinde getirmektedir. Rüzgar türbini kontrol sistemleri üzerine yapılan çalışmalar da söz konusu gelişmelerin önemli bir parçasıdır.

Rüzgar türbini kontrol sistemlerinin çeşitli hedefleri vardır. Bunların başlıcaları, enerji dönüşümünü optimize etmek, türbini aşırı yükten korumak ve enerji kalitesi sağlamaktır (Bianchi ve diğ, 2007). Bu kontrol amaçlarını gerçekleştirmek için orta ve büyük ölçekli rüzgar türbinlerinde tipik olarak kullanılan yöntemler; kanat açısı değiştirme kontrolü (pitch control), hız kesme kontrolü (stall control), jeneratör tork kontrolü ve yön kontrolüdür (yaw control). Bu çalışmada rüzgar türbininin aktif yön kontrolü üzerine algoritmalar geliştirilerek uygun yöntemin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Rüzgar türbinlerinde aktif yön kontrolünün temel amacı rotorun yatay eksenini rüzgarın geliş yönüne çevirerek güç çevrimini optimum seviyeye getirmektir. Fakat rüzgar şiddeti ve yönündeki ani değişimler nedeniyle rüzgarın sürekli takibi enerji dönüşümü açısından iyi bir sonuç vermemektedir. Ayrıca sistemin rüzgar yönündeki her değişime tepki vermesi türbinin mekanik bileşenlerinin de aşırı yıpranmasına

neden olur. Bu nedenlerden dolayı rüzgar türbinlerinde aktif yön kontrolü için uygun algoritmaların oluşturulması gerekmektedir.

Rüzgar türbinlerinde aktif yön kontrolü üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Günümüzde aktif yön kontrolü için yaygın olarak uygulanan yöntemin kullanıldığı gerçek bir model Hau (2006) tarafından verilmiştir. Bu yöntemde rüzgar yönü ile rüzgar türbininin yatay rotor eksenini arasındaki sapma açısı kademelere ayrılmış, her kademe için farklı bir ölü zaman atanarak bu sürenin sonunda sapma açısı devam ediyorsa yönelme sağlanmıştır. Wu ve diğ. (1993) tarafından klasik PD kontrolör ile bulanık mantık kontrolü karşılaştırılmıştır. Piao ve Wang (2008) yön kontrolü için yeni bir algoritma önermiş, PSCAD ile simülasyon çalışmasını yapmışlardır. Chen ve Yang (2009) tarafından da bulanık PID kontrolör tasarlanmıştır. Bu ve diğ. (2009) ise DSP tabanlı bir yön kontrolü algoritması geliştirmiştir.

Bu tez çalışmasında aktif yön kontrolü için üç farklı algoritmaya ait modeller oluşturularak erteleme süresinin enerji dönüşümü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Birinci algoritmada sadece genel kontrolör dizayn yöntemleri kullanılmış, modele ölü zaman uygulanmamıştır. Bu sayede sistemin rüzgar yönündeki tüm değişimlere tepki vermesi sağlanmıştır. İkinci algoritmaya ait modellerde genel prensiplerin yanı sıra kademeli bekleme süreleri kullanılmıştır. Böylece sistemin belli durumlarda rüzgar yönü takibini erteleme sağlanmıştır. Sapma açıları kademelere ayrılarak her bir kademe için artan açı farkına göre kısalan erteleme süreleri atanmıştır. Kademe sayısının sistem performansı üzerindeki etkisinin gözlenebilmesi için 180 derecelik sapma açısını 2, 4 ve 6 kademeye ayıran modeller oluşturulmuştur. Üçüncü algoritmada erteleme sürelerinin uygulanmasında fonksiyon tabanlı bekleme süresine sahip yeni bir yöntem önerilmiştir. Erteleme süreleri için sapma açısına bağlı sürekli fonksiyonlar belirlenmiştir. Böylece daha hassas bir kontrol sisteminin oluşturulması hedeflenmiştir. Bu algoritma kullanılarak lineer ve eksponansiyel erteleme süresi fonksiyonlarının uygulandığı iki farklı model oluşturulmuştur.

Modeller MATLAB®/Simulink programı ile oluşturulup simule edilmiştir. Rüzgar şiddet ve yön girişleri için gerçek bir bölgeden alınan veriler kullanılmıştır. Enerji dönüşümlerinin hesaplanıp modellerin karşılaştırılabilmesi için 2 MW anma gücüne sahip Enercon E-82 türbinine ait rüzgar şiddeti-güç eğrisi kullanılmıştır.

## 2. RÜZGAR ENERJİSİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

### 2.1 Rüzgar Enerjisi Kullanımının Tarihi

Rüzgarın enerji kaynağı olarak kullanımı asırlar öncesine dayanmaktadır. Tarihteki keşiflerin çoğu rüzgar enerjisi ile çalışan gemiler tarafından gerçekleştirilmiştir. James Watt, 18. yüzyılda buhar türbinini bulana kadar rüzgar gemiler için en önemli enerji kaynağıydı (Johnson, 2001).

Rüzgarın karada kullanımının temelleri hakkındaysa çeşitli görüşler vardır. Rüzgar enerjisinin karada ilk kullanım amacı tahıl öğütmek ve su pompalamaktı. Bilinen ilk rüzgar değirmeninin 3000 yıl önceye ait olduğu ve Mısır'da kalıntılarının bulunduğu iddia edilmektedir (König, 1978; Hau, 2006). Fakat bu bilginin kesinliği kanıtlanamamıştır.

Rüzgar enerjisinin karada kullanımıyla ilgili doğruluğu kabul edilen ilk kaynaklar ise 644 yılında İran-Afgan sınırında rüzgar değirmeni bulunduğu bahsetmektedir (Fröde, 1981; Hau, 2006). Ayrıca 945 yılına ait bir belgede düşey eksenli bir rüzgar değirmenine ait çizim bulunmuştur. Çizimdeki rüzgar değirmeninin tahıl öğütmek için kullanıldığı düşünülmektedir (Hau, 2006). Afganistan'da bulunan en eski tip rüzgar değirmenlerinin kalıntıları günümüze kadar gelmiştir (Şekil 2.1).

Düşey eksenli rüzgar değirmeni örneğine rastlanmayan Avrupa'da 12. yüzyılda yatay eksenli rüzgar değirmenleri üretilmiştir. Bilinen ilk yatay eksenli rüzgar değirmeni 1180 yılında Normandiya'da yapılmış ve 13. yüzyılda tüm Avrupa'ya yayılmıştır (Hau, 2006).

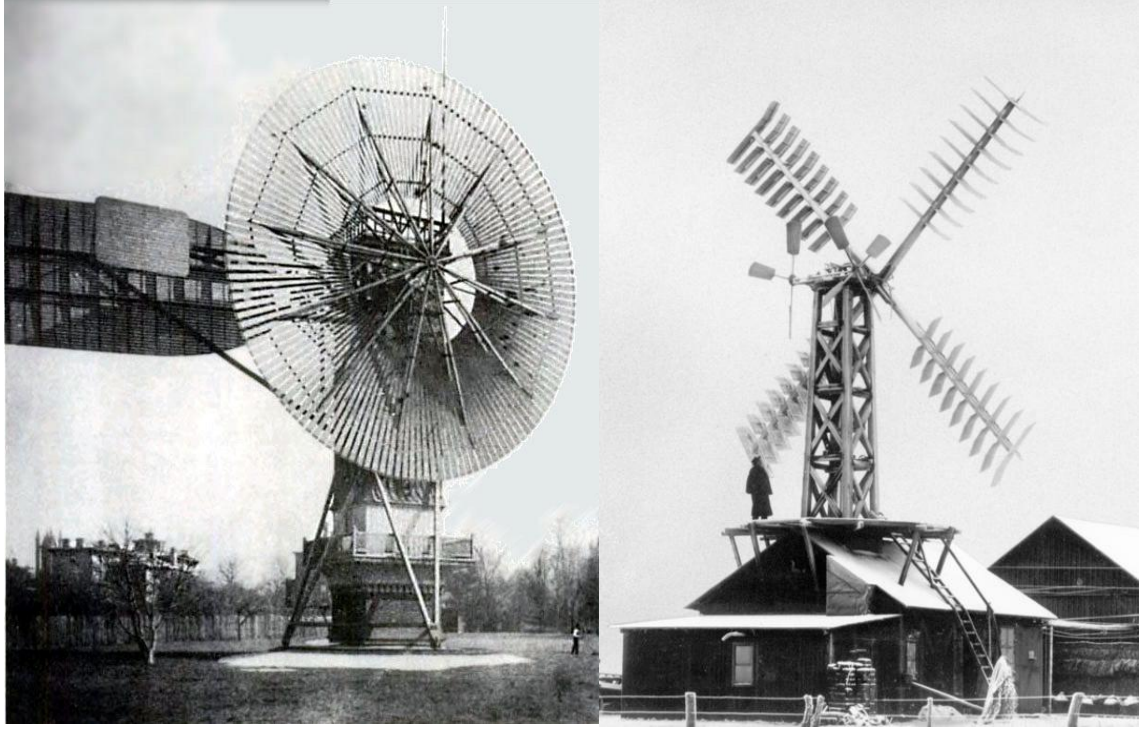
Yatay eksenli rüzgar değirmenlerinin üretilmesiyle sadece sürüklenme kuvvetinden değil ayrıca rüzgarın oluşturduğu kaldırma kuvvetinden de yararlanıldığı için verim önemli ölçüde artmaya başlamıştır. Başlangıçta sadece tahtadan yapılan yatay eksenli rüzgar değirmenlerinin daha büyük rotor alanı kullanabilmek için 14. yüzyıldan itibaren taş kulelerin üzerine inşa edilmesi de enerji dönüşümünün artırılması açısından önemli bir gelişmedir (Shepherd, 1994).



**Şekil 2.1:** Afganistan’da bulunan rüzgar değirmeni kalıntıları (Hau, 2006, p. 2).

19. yüzyılın sonlarında rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme çalışmaları hız kazanmıştır. Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle rüzgar değirmenlerinden rüzgar türbinlerine geçiş sağlanmıştır. Elektrik üretebilen ilk rüzgar türbini 1888 yılında Amerika’da Charles F. Bush tarafından yapılmıştır (Şekil 2.2 a). Bu rüzgar türbininin kanat yapısı son dönemdeki rüzgar değirmenleri örnek alınarak tasarlanmıştır. Bu türbin 12 kW DC güç üretmekteydi.

Rüzgar değirmenlerinden rüzgar türbinlerine geçişteki diğer önemli gelişme de Danimarkalı Poul la Cour tarafından sağlanmıştır. Poul la Cour 1891 yılında ürettiği rüzgar türbininde aerodinamik prensiplerini kullanmış ve modern rüzgar türbini modellerinin oluşmasında öncü rol oynamıştır (Shepherd, 1994). Poul la Cour tarafından üretilen ilk rüzgar türbini Şekil 2.2 b’de görülmektedir. Bu türbinin rotor yapısında düşük katılığın avantajları kullanılmıştır. Sonraki yıllarda Poul la Cour tarafından üretilen rüzgar türbinlerinin güç kapasitesi 25 kW’a kadar çıkmaktaydı.



a

b

**Şekil 2.2:** a) Charles F. Brush tarafından üretilen rüzgar türbini b) Poul la Cour'un ürettiği ilk rüzgar türbini (Hau, 2006, p. 24).

Şekil 2.3'te 100 yıllık kullanımdan sonra 1902'de karaya oturan Chance isimli gemi görülmektedir. Gemide rüzgar kaynağını kullanan elektrik jeneratörü bulunmaktadır.



**Şekil 2.3:** Chance, Yeni zelanda 1902 (Url-1).

1900'lerin başında fosil kaynakların gelecekteki enerji talebini karşılayamayacağıının öngörülmesi daha büyük kapasiteli rüzgar türbini üretimi çalışmalarını hızlandırmıştır. Büyük ölçekli rüzgar türbinleri kurulması konusunda önemli adımlardan biri 1931'de Sovyetler Birliği'nde atılmıştır. 100 kW anma gücüne sahip olan Balaclava rüzgar türbini AC şebeke bağlantılı ilk rüzgar türbinidir (Şekil 2.4 a). İlk MW kapasiteli rüzgar türbini ise Palmer C. Putnam'ın çalışmaları sonucunda Amerika'da 1941'de yapılmıştır. Smith-Putnam rüzgar türbini 53.3 m rotor çapına sahip ve 1.25 MW anma gücüne sahiptir (Şekil 2.4 b).



**a**



**b**

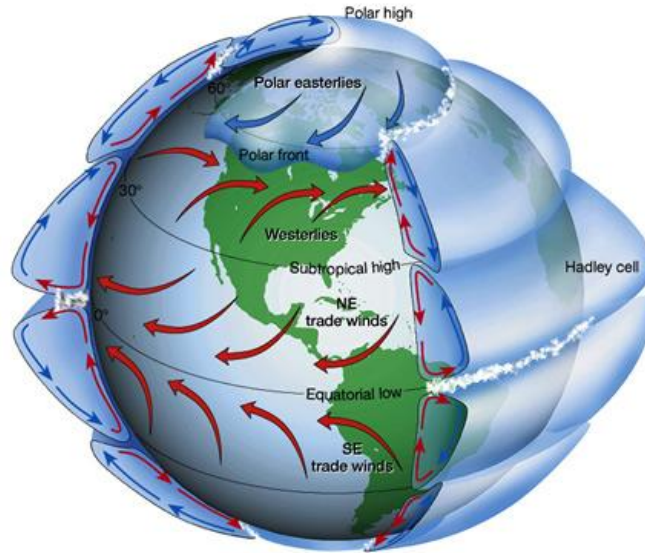
**Şekil 2.4:** **a)** Balaclava rüzgar türbini (Hau, 2006, p. 24) **b)** Smith-Putnam rüzgar türbini (Hau, 2006, p. 35).

Rüzgar türbini teknolojisindeki gelişmelerin devam etmesiyle daha uzun ömürlü ve yüksek kapasiteli türbinler üretilmektedir. Bu sayede rüzgar enerjisinin toplam enerji arzı içindeki payı artmaktadır. Bugüne kadar tasarlanan türbinler arasında enerji dönüşümü açısından en verimli olanlar yatay eksenli üç kanatlı türbinlerdir. Günümüzde kullanılan en büyük rüzgar türbinlerinin anma gücü 7.5 MW'a kadar çıkmaktadır.

## 2.2 Rüzgarın Oluşumu

Rüzgarın oluşumunun temel nedeni, güneşten gelen solar radyasyonun dünya yüzeyini farklı oranlarda ısıtmasıyla ortaya çıkan basınç farkıdır. Bu durum alt atmosfer tabakalarında hava hareketi oluşmasına yol açar. Ekvator civarında emilen solar radyasyon miktarı, kutuplarda emilen solar radyasyondan daha fazladır. Havanın ekvatorda daha fazla yükselmesiyle kutuplara göre alçak basınç alanı oluşur. Akışkanların yüksek basınçlı ortamdan alçak basınca doğru hareket etme eğilimi hava hareketine neden olur. Bu nedenle basit akış modelinde havanın yüksek basınçlı kutuplardan alçak basınçlı ekvatora doğru hareket etmesi beklenir (Manwell ve diğ, 2002).

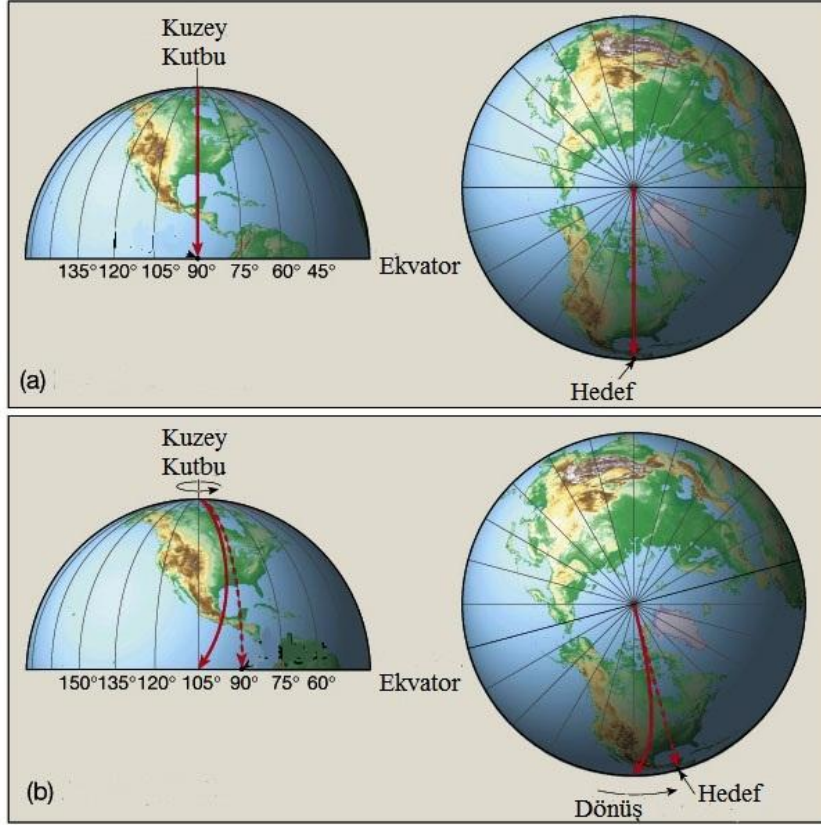
Ekvator çevresindeki yüksek basınç alanından kutuplara taşınımı sırasında hava kütlelerinin radyasyonla soğumasıyla 30° kuzey ve güney enlemler civarında yoğunlaşma ve toplanma oluşur. Böylece 30° enlemlerinde subtropik bölge olarak adlandırılan yüksek basınç alanları oluşur. Kutuplarda ise soğuyan hava kütleleri yüzeye doğru çöker. Kuzey ve güney 60° enlemlerinde batılı rüzgarlarla karşılaşarak subpolar alçak basınç kuşağını oluştururlar (Menteş, 2010). Oluşan basınç kuşakları sayesinde küresel rüzgar yapısı basit akış modeli yerine Şekil 2.5'te görülen üç hücre modeliyle tanımlanan şekilde oluşur.



Şekil 2.5: Üç hücre modeli (Url-2).



Eşit olmayan ısınma sonucu oluşan atmosfer sirkülasyonu, dünyanın dönüş hızındaki değişimden de etkilenir. Dünyanın dönüş hızı ekvatorunda 600 km/saat iken kutuplarda 0 km/saat'e düşer. Bunun sonucunda Coriolis kuvveti oluşur. Coriolis kuvveti rüzgarın kuzey yarımkürede esme yönünün sağına, güney yarımküredeyse soluna sapmasına neden olur. Şekil 2.6'da Coriolis kuvvetinin etkisi görülmektedir.



**Şekil 2.6:** Coriolis kuvveti (Url-3).

Hava kütlelerinin basınç farkı basınç gradyan kuvvetini oluşturur, bu kuvvet hava akımının yönünü etkiler. Basınç gradyan kuvveti yüksek basınçtan alçak basınca doğru ve izobarlara diktir. Basınç gradyan kuvvetinin düşey bileşeni genellikle yerçekimi ile dengelenir. Böylece rüzgar yatay düzlemde eser.

Basınç gradyan kuvveti ile dünyanın hareketi sonucu oluşan Coriolis kuvvetine ek olarak eylemsizlik kuvveti ve dünya yüzeyinde oluşan sürtünme kuvveti de rüzgar mekaniğini oluşturan temel modeldeki dört atmosfer kuvveti arasındadır (Manwell ve diğ, 2002).



## **2.3 Rüzgarların Sınıflandırılması**

Dünya homojen küresel bir yapıya sahip olmak yerine çeşitli özelliklerdeki karalar ve denizlerin birleşiminden oluştuğu için, temel atmosfer kuvvetlerinin dışındaki şartlar da rüzgar oluşumunu etkilemektedir. Rüzgarlar oluşum nedenlerine göre küresel rüzgarlar, mevsim rüzgarları, günlük rüzgarlar ve yerel rüzgarlar olarak sınıflandırılmaktadır.

### **2.3.1 Küresel rüzgarlar**

Atmosferin genel sirkülasyonu nedeniyle oluşan rüzgarlar küresel rüzgarlardır. Üç hücre modelinde tanımlanan küresel rüzgarlar, ticaret rüzgarları, batılı rüzgarlar ve kutup rüzgarları olarak isimlendirilmişlerdir.

Ticaret (alize) rüzgarları kuzey ve güney yarımkürede 30° enlemlerinde bulunan subtropikal yüksek basınç kuşağından ekvatora doğru eserler. Coriolis kuvvetinin etkisiyle kuzey yarımkürede kuzeydoğu, güney yarımkürede ise güneydoğu yönünden esmektedirler. Batılı rüzgarlar subtropikal yüksek basınç bölgelerinden orta enlem alçak basınç bölgelerinin bulunduğu 60° enlemlerine doğru eserler. Kutup rüzgarları ise kutuplardaki yüksek basınç alanlarından orta enlem alçak basınç bölgelerine doğru eserler.

### **2.3.2 Mevsimsel rüzgarlar**

Yeryüzündeki denizler ve karaların, mevsimlere göre farklı şekilde ısınması sonucu mevsim rüzgarları oluşur. Yazın karaların denizlerden fazla ısınması nedeniyle yüksek basınçlı denizlerden alçak basınçlı karalara, kışın ise karaların denizlerden fazla soğuması sonucu yüksek basınçlı karalardan alçak basınçlı denizlere doğru esen mevsim rüzgarları görülmektedir.

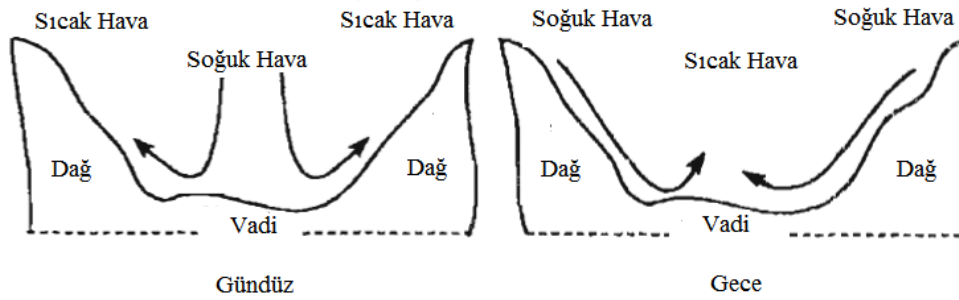
### **2.3.3 Günlük rüzgarlar**

Bir bölgede gün içinde yer şekilleri üzerinde oluşan farklı basınç alanları günlük rüzgarların oluşmasına neden olur. Daha çok karalar ve denizler ile dağlar ve vadiler arasında oluşurlar.

Kara ve denizler arasında oluşan günlük rüzgarlar kara ve deniz meltemleri olarak adlandırılırlar. Bunun temel sebebi gün içinde kara ve denizlerin farklı zamanlarda

ısınıp soğumasıdır. Gündüz karalar denizlere oranla daha çabuk ve daha fazla ısınırlar bu nedenle denizdeki yüksek basınçlı alandan karaya doğru esen *deniz meltemleri* oluşur. Gece ise karalar daha fazla soğurlar bu nedenle yüksek basınçlı karadan alçak basınçlı denizlere esen *kara meltemleri* oluşur.

Dağlık bölgelerde gündüzleri dağın güneşe bakan yamaçlarının vadilere oranla fazla ısınmasıyla vadilerde yüksek basınç, dağlarda alçak basınç alanları oluşur bunun sonucunda vadiden dağ yamacına doğru oluşan *vadi meltemleri* görülür. Geceleri ise dağ yamaçlarında yüksek basınç, vadilerde alçak basınç oluşmasıyla *dağ meltemleri* ortaya çıkar. Şekil 2.7’de sırasıyla vadi ve dağ meltemleri görülmektedir.



Şekil 2.7: Vadi ve dağ meltemleri (Manwell ve diğ, p. 25).

#### 2.3.4 Yerel rüzgarlar

Bir bölgede coğrafi yapıya bağlı olarak meydana gelen alçak ve yüksek basınç farkları yerel rüzgarları oluşturur. Dağlık bölgelerde yüksek yamaçlardan aşağı doğru esen fön rüzgarları, Dalmaçya kıyılarından Adriyatik denizine doğru esen bora, Fransa’da Rhone vadisinden Akdeniz’e doğru esen mistral, Romanya’da kuzeydoğudan Tuna ovasına doğru esen Krivetz, Ege kıyılarına yazın kuzeyden esen etezyen ve Güney Akdeniz’e ve Afrika’ya doğru esen sam yeli başlıca yerel rüzgar örnekleridir.

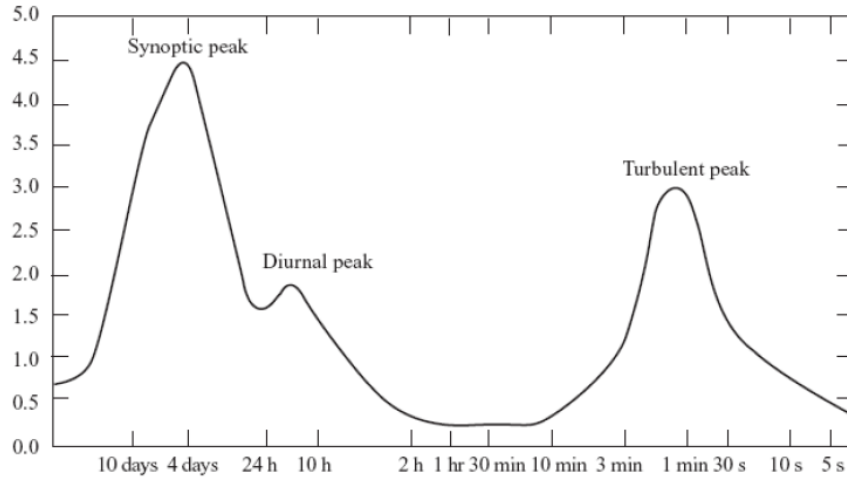
#### 2.4 Zaman İçinde Rüzgar Değişimleri

Rüzgar karakteristiklerinin analizi rüzgar türbini tasarımından rüzgar türbini tarlaları için uygun bölgelerin saptanmasına kadar her türlü rüzgar enerjisi çalışması için önemlidir.

Rüzgar karakteristikleri arasında en çok dikkat çeken rüzgarın değişkenliğidir. Rüzgar özellikle zamana ve coğrafyaya bağlı olarak değişkenlik gösterir. Zaman

içinde rüzgar değişimleri yıllar arası, yıllık ve mevsimsel, sinoptik ve diurnal (iki günlük), türbülans olarak ayrılır.

Rüzgarın değişiminde Şekil 2.8’de görülen Van der Hoven’ın (1957) oluşturduğu frekans spektrumu sinoptik, diurnal ve türbülans değişimlerin analizi açısından önemlidir.



Şekil 2.8: Van der Hoven Spektrumu.

#### 2.4.1 Yıllar arası rüzgar değişimi

Rüzgar rejimi bazı bölgelerde uzun süre içinde değişimlerle karşı karşıya kalır. Bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenebilmesi için rüzgar rejiminin uzun süre içinde geçireceği değişimlerin tahmin edilebilmesi gerekir. Yıllar arası rüzgar değişimleri bölgenin topografik ve meteorolojik özelliklerinden etkilenir.

Yıllar arası rüzgar değişimlerinin oluşmasında küresel ısınmanın bazı bölgelerde sıcaklık değişimi oluşturarak mevsimleri etkilemesinin rolü vardır. Ayrıca volkanik püskürmeler nedeniyle atmosferik partiküllerde farkların meydana gelmesi de yıllar arası rüzgar değişimlerine neden olmaktadır (Burton ve diğ, 2001).

#### 2.4.2 Yıllık ve mevsimlik değişimler

Rüzgar rejiminde yıl içinde meydana gelen değişimler, uzun süreli değişimlerin aksine daha kolay tahmin edilebilir.

Bir bölgedeki yıllık ve mevsimlik rüzgar değişimleri o bölgenin enlemine bağlı olduğu kadar kara ve su parçalarının dağılımı gibi coğrafi ve topografik özelliklerine de bağlıdır. Örneğin orta enlemlerde genellikle kış mevsiminde küresel nedenlerle yüksek rüzgar şiddeti beklenirken bu enlemlerdeki bir bölgede dağlık ve sahil alanların yoğunlukta olması durumunda yaz aylarında farklı ısınma oranları nedeniyle daha yüksek şiddette rüzgarlar gözlenebilir.

Rüzgar yıl içinde genellikle belli olasılık dağılım fonksiyonlarına uygun olarak değişim gösterir. Weibull olasılık dağılım fonksiyonu tipik bir bölgede rüzgarın yıl içindeki saatlik ortalama dağılımını tanımlamada kullanılan etkili bir yaklaşımdır.

### **2.4.3 Sinoptik ve diurnal değişimler**

Mevsimlik döngüden daha kısa süreli olan rüzgar hızı değişimleri daha düzensiz ve daha az tahmin edilebilir. Buna rağmen bu değişimler belli yolları takip eder.

Sinoptik değişimlerin frekansı dört gün civarında tepe noktasına ulaşır. Ayrıca yerel termal etkiler sonucu oluşan ve frekansı bir gün olan değişimler de gözlenir. Gündüz yoğun ısınma nedeniyle atmosferde büyük taşınım bölgeleri oluşur gece ise sönerler. Deniz ve karadaki farklı ısınma ve soğuma da diurnal tepe noktasını etkiler. Rüzgar enerjisinin frekans spektrumunda bu etki 12 saatlik tepe noktası ile gösterilir (Burton ve diğ, 2001).

### **2.4.4 Türbülans**

Türbülans, 10 dakikadan küçük zaman ölçeklerinde rüzgar hızında meydana gelen dalgalanmadır. Rüzgar değişimi frekans spektrumunda en yüksek tepe noktasına sahip olan değişim türbülanstır.

Türbülans temel olarak iki nedene bağlı olarak oluşur. Bunlardan birincisi topografyadan dolayı oluşan sürtünme kuvveti, diğeri ise yer şekillerinin etkisiyle hava kütlelerinin dikey yönde hareketidir. Bu iki etki sık sık birbirine bağlı olarak gelişir.

Türbülans oluşumu karışık bir süreç olduğu için deterministik denklemlerle açıklanamaz. Türbülansı tanımlamak için oluşturulan istatistiksel modellerde kütle, momentum ve enerji korunumunun yanı sıra havanın sıcaklığı, basıncı, nemi ve yoğunluğu da hesaba katılmalıdır (Manwell ve diğ, 2002).

## 2.5 Rüzgar Enerjisi Dönüşümünün Prensipleri

Rüzgar içindeki kinetik enerjinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi türbin rotoru ve rüzgar arasındaki etkileşimlere bağlıdır. Rüzgarın neden olduğu aerodinamik kuvvetler türbin performansını büyük ölçüde değiştirir. Teorik performans limitlerinin belirlenebilmesi için temel fiziksel kanunlardan yararlanılmıştır.

### 2.5.1 Aerodinamik model

Kütlesi  $m$ , hızı  $v$  olan havanın taşıdığı kinetik enerji

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

ile ifade edilmektedir. Kesit alanı  $A$  olan bir bölgeden  $v$  hızıyla geçen akışkanın hacim akış oranı

$$\dot{v} = vA \quad (2.2)$$

denklemiyle, kütle akış oranıysa

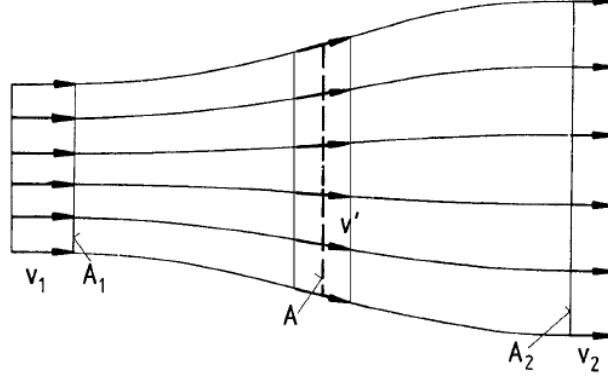
$$\dot{m} = \rho vA \quad (2.3)$$

ile bulunmaktadır. Eşitlikteki  $\rho$  ifadesi akışkanın yoğunluğunu sembolize etmektedir.

Kinetik enerji ve kütle akış oranı denklemlerinin bir araya gelmesiyle  $A$  kesit alanından birim zamanda geçen akışkanın enerjisini elde edilmektedir. Bu değer güç ( $P$ ) eşittir.

$$P = \frac{1}{2}\rho v^3 A \quad (2.4)$$

Rüzgar içindeki enerjinin ne oranda dönüştürülebileceği üretim kapasitesi açısından önemlidir. Akışkan içinden çekilecek mekanik enerji, havanın türbinle karşılaşmadan önceki akışı ile türbinden geçtikten sonraki akışı arasındaki güç farkıyla bulunur. Temel momentum teorisine göre rüzgarın rotordan geçmeden önceki ve sonraki akışı Şekil 2.5'te görülmektedir.



**Şekil 2.9 :** Rotordan geçişin öncesi ve sonrasında rüzgar akışı (Hau, 2006, p. 82).

Şekil 2.9'da  $v_1$  rüzgarın rotordan geçmeden önceki hızını,  $A_1$  bu sırada oluşan diskin alanını,  $v'$  rüzgarın rotordan geçişi sırasındaki hızını,  $v_2$  rotordan geçtikten sonraki hızını,  $A_2$  ise oluşan diskin alanını ifade etmektedir. Bu durumda hava içinden çekilebilecek güç Denklem 2.5 ile ifade edilmektedir.

$$P = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_2 v_2^3 = \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \quad (2.5)$$

Kütle akış oranı korunduğu için;

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 \quad (2.6)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho v_1 A_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.7)$$

Veya

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.8)$$

denklemleri elde edilir.

Bu denkleme göre dönüştürülen güç,  $v_2 = 0$  olduğu zaman maksimum değerine ulaşmalıdır. Fakat rüzgar hızının türbinden geçtikten sonra tamamen 0'a düşmesi fiziksel olarak mümkün değildir. Anlamlı bir sonuç elde etmek için momentumun

korunumunu göz önünde bulundurarak enerji dönüştürücü üzerine uygulanan kuvveti de dikkate almak gerekir.

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) \quad (2.9)$$

Etki tepki sonucu, eşit bir kuvvet de dönüştürücü tarafından hava akışına uygulanır. İtki (thrust), hava kütlesini  $v'$  hızıyla iter.

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (2.10)$$

Elde edilen iki güç denklemi aşağıdaki eşitliklere dönüştürülür,

$$\frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_2^2) = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (2.11)$$

$$v' = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (2.12)$$

Kütle akış oranıysa

$$\dot{m} = \rho Av' = \frac{1}{2}\rho A(v_1 + v_2) \quad (2.13)$$

eşitliğine dönüşür.

$$P = \frac{1}{4}\rho A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2) \quad (2.14)$$

Bu güç çıkışı için bir referans noktası elde etmek için serbest akışla aynı kesit alanından geçen hava kullanılır.

$$P_0 = \frac{1}{2}\rho v_1^3 A \quad (2.15)$$

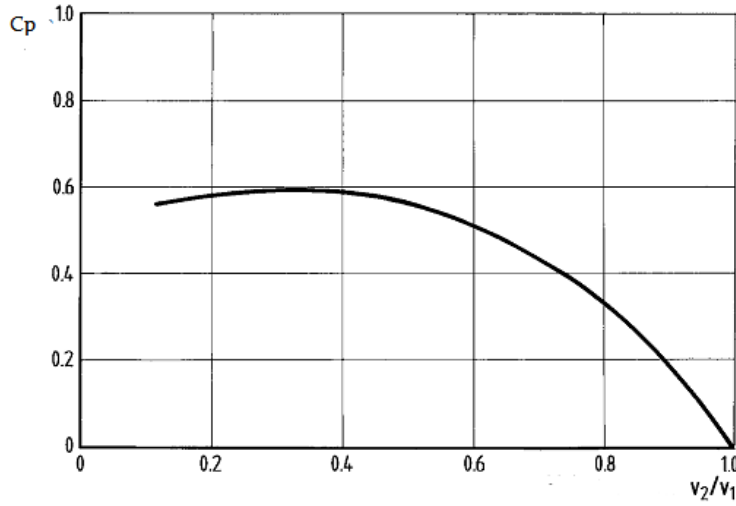
Denklem 2.15'te  $P_0$  serbest akış alanındaki gücü göstermektedir. Dönüştürülen güç ile serbest akış bölgesindeki gücün oranı güç katsayısına ( $C_p$ ) eşittir.

$$C_P = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} \rho v_1^3 A} \quad (2.16)$$

Böylece güç katsayısı sadece  $v_2$  ile  $v_1$  in birbirine oranı sayesinde bulunabilir.

$$C_P = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[ 1 + \frac{v_2}{v_1} \right] \quad (2.17)$$

Hız oranı – güç katsayısı ilişkisi Şekil 2.10’da verilmektedir.



Şekil 2.10: Hız oranı – güç katsayısı (Hau, 2006, p.84).

Türevin 0 olduğu noktada  $v_2 / v_1 = 1/3$  ‘e eşittir ve ideal güç katsayısı;

$$C_P = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (2.18)$$

olarak elde edilir.

Bu değer, ideal güç katsayısını ilk kez hesaplayan Albert Betz’in anısına “Betz limiti” olarak adlandırılmıştır.



### 2.5.2 Uç hızı oranı

Uç hızı oranı, rüzgar türbini kanatlarının dönel hızı ile rüzgar hızı arasındaki orandır. Uç hızı oranı kanatların tasarımına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Rüzgar enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünü etkileyen önemli bir faktördür.

Uç hızı oranına

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (2.19)$$

eşitliğiyle ulaşılır. Formüldeki  $\omega$  kanatların açısal hızını,  $R$  rotorun çapını  $v$  ise rüzgar hızını ifade etmektedir.

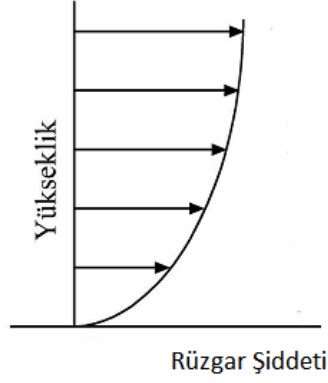
Yüksek uç hız oranı dönme sırasında meydana gelen kayıpları azaltarak güç katsayısını artırmaktadır.

Rüzgar türbinleri sahip olduğu uç hız oranına göre değişik amaçlar için kullanılırlar. Uç hızı oranı kanatların yapısından ve kanat sayısından etkilenir. Kanat sayısı fazla olan türbinlerde uç hızı oranı düşük, başlangıç torku yüksektir. Yirmi ve daha fazla sayıda kanada sahip olan rüzgar türbinleri rüzgar şiddeti artınca, yüksek başlangıç torku sayesinde otomatik olarak dönmeye başlarlar. Bu da su pompalama ve tahıl öğütme amacıyla kullanımına olanak vermektedir.

Düşük sayıda kanada sahip olan türbinlerdeyse uç hız oranı yüksek, başlangıç torku düşüktür. Rüzgar şiddeti yeteri kadar arttığı zaman dışarıdan müdahale edilerek çalışmanın başlatılması gerekir. Bunun yanında yüksek uç hız oranı sayesinde daha küçük ve hafif dişli kutusu kullanımı mümkündür böylece jeneratörün gerektirdiği dönme hızına ulaşabilir. Yüksek uç hız oranına sahip rüzgar türbinleri elektrik üretimi için kullanılmaya uygundur (Ackermann ve Söder, 2002).

### 2.5.3 Düşey rüzgar profili

Rüzgar hızı yüksekliğe bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yeryüzeyinde engellerin bulunmadığı yerlerde bile oluşan sürtünme kuvveti nedeniyle alt atmosfer tabakalarında rüzgar hızında düşüş görülür. Rüzgar kayması olarak adlandırılan bu olayın rüzgar türbinlerinin çalışmasında önemli etkileri vardır. Tipik bir bölge için rüzgar şiddeti-yükseklik ilişkisi Şekil 2.11'de verilmektedir.

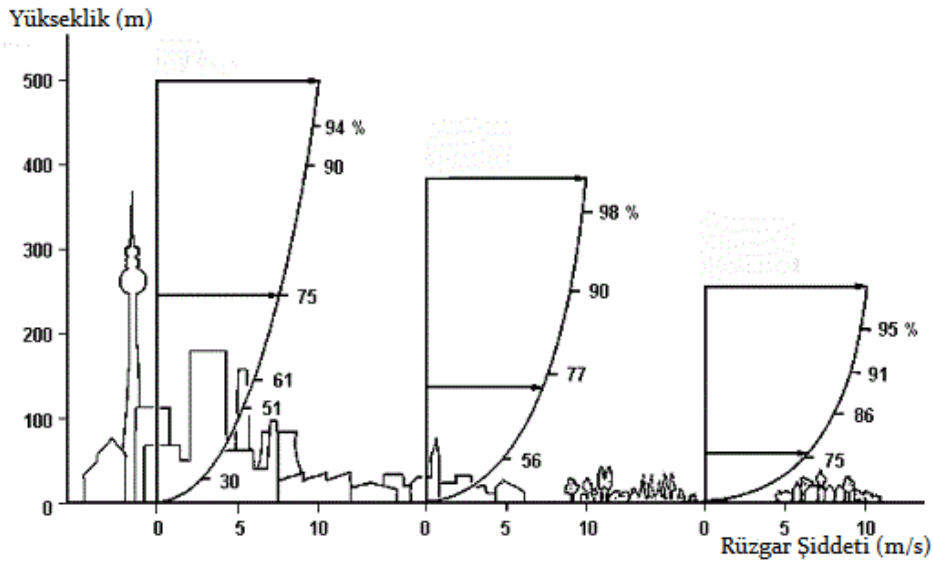


**Şekil 2.11:** Düşey rüzgar profili.

Rüzgar kaymasını tanımlamak için çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Düşey rüzgar profilini tanımlamak için sık sık kullanılan deneysel formüllerden biri aşağıdaki Denklem 2.20’de verilmiştir.

$$v(z) = v(z_{ref}) \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^a \quad (2.20)$$

Denklem 2.20’de  $v$  rüzgar hızını,  $z$  ve  $z_{ref}$  yükseklik ve referans yüksekliği,  $a$  ise bölgenin pürüzlülük katsayısını tanımlamaktadır. Pürüzlülük katsayısının değeri bölgenin özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Genelde yeryüzeyi üzerinde engeller arttıkça pürüzlülük katsayısı artmaktadır bu nedenle engellerin fazla olduğu bölgelerde rüzgarın kararlı hale geçmesi daha yüksekte meydana gelmektedir.



**Şekil 2.12:** Farklı bölgelerin rüzgar profili üzerinde etkisi (Url-4; Baumbach, 1991).

Açık alanlarda düşey rüzgar profili daha düşük yüksekliklerde düzeldirken, dağ yamaçlarında bu yükseklik artmaktadır. Şehir merkezlerindeyse engellerin yoğunluğu nedeniyle düşey rüzgar profilinin oldukça yüksekte düzeldiği görülmektedir.

Şekil 2.12’de farklı yüzey şekillerinin rüzgar profili üzerinde etkisi gösterilmiştir. Yüksek binaların bulunduğu ilk modelde rüzgar profilinin daha yüksek seviyelerde düzeldiği, daha alçak binaların bulunduğu ikinci modelde rüzgar profilinin düzelmesinin birinci modele göre daha düşük seviyede gerçekleştiği, açık bir alana ait üçüncü modelde ise en alçak seviyede rüzgar profilinin düzeldiği görülmektedir.

Rüzgar hızının düşey değişimi rüzgar enerjisi kaynaklarının dağılımı ve rüzgar türbini tasarımı açısından önemlidir. Rüzgar türbinlerinin rotorunun yüksekliği düşey rüzgar profilinin düzgün olduğu bölgede bulunmalıdır. Böylece rotor üzerine uygulanan torkun rotorun her bölgesinde sabit olması sağlanarak türbin bileşenlerinin yorulmasıyla türbinin zarar görmesinin önüne geçilmiş olunur. Ayrıca rotor daha yüksek rüzgar şiddetiyle karşılaştığı için dönüştürdüğü enerji miktarı artar (Barutçu, 2009).



### **3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ**

#### **3.1 Dönme Eksenlerine Göre Rüzgar Türbinleri**

Günümüze kadar bir çok farklı türde rüzgar türbini tasarlanmıştır. Bu tasarımların çoğunda rotor, rüzgar sayesinde üzerine uygulanan kaldırma veya sürüklenme kuvveti nedeniyle belli bir eksen etrafında dönmektedir. Rüzgar türbinleri rotor ekseninin doğrultusuna göre düşey eksenli ve yatay eksenli olarak sınıflandırılırlar.

##### **3.1.1 Düşey eksenli rüzgar türbinleri**

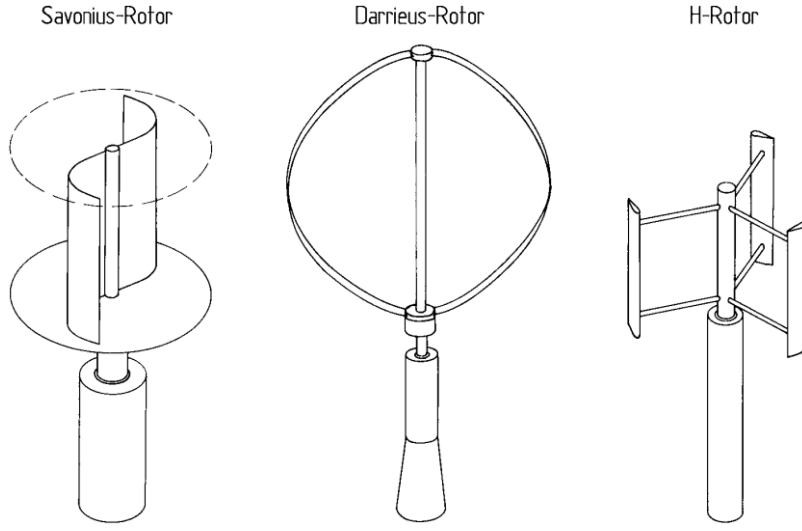
En eski rüzgar türbinlerinin rotorları dönme eksenini düşey olacak şekilde tasarlanmıştır. Düşey eksenli rüzgar türbinleri öncelikle sadece aerodinamik sürüklenme kuvvetinden yararlanacak şekilde üretiliyorlardı. Aerodinamik sürüklenme kuvveti sayesinde çalışan düşey eksenli rüzgar türbinleri için en yaygın örnek Savonius rotor türüne sahip türbinlerdir. Bu tür rüzgar türbinlerinin güç katsayısı çok düşük seviyedeydi en fazla 0,16'ya çıkabiliyordu (Ackerman, 2005). Kap anemometreler de Savonius türbinler gibi rüzgarın sadece sürüklenme kuvvetinden yararlanan rüzgar makinalarına örnek olarak gösterilebilir.

1925 yılında Darrieus sürüklenme kuvvetinin yanı sıra rüzgarın kanatlara uyguladığı kaldırma kuvvetinden de yararlanan düşey eksenli türbini üretmiştir. Darrieus tipi türbinlerde, kanatlar dönüş eksenleriyle aynı düzlemindedir. Rotor tipik olarak iki veya üç kanattan oluşur.

Rüzgarın uyguladığı kaldırma kuvvetinden yararlanan diğer yaygın düşey eksenli türbinler ise H-tipi rotorlardır. Darrieus rotorlardan farklı olarak H-tipi rotorlarında kanatlar düz olduğu için kanat dizaynı daha kolaydır. Savonius, Darrieus ve H-tipi rotora sahip düşey eksenli rüzgar türbinleri Şekil 3.1'de görülmektedir.

Düşey eksenli rüzgar türbinlerinin avantajları, jeneratör ve iletim elemanlarının yer seviyesinde bulunması ve rüzgara yönelim için aktif bir sisteme ihtiyaç duymamalarıdır. Fakat bu tip türbinlerde rotor yüksekliği düşük olduğu için daha alçak hızlı rüzgara maruz kalırlar, bu da enerji üretiminin azalmasına yol açar (Bianchi ve diğ., 2007). Ayrıca rotor, düşey rüzgar profilinin değişken olduğu

yükseklikte bulunduğu için değişken torka maruz kalır bu durum da sistem bileşenlerinin yorulmasına, türbinin ömrünün azalmasına neden olur.



Şekil 3.1: Düşey eksenli rüzgar türbinleri (Hau, 2006, p. 68).

### 3.1.2 Yatay eksenli rüzgar türbinleri

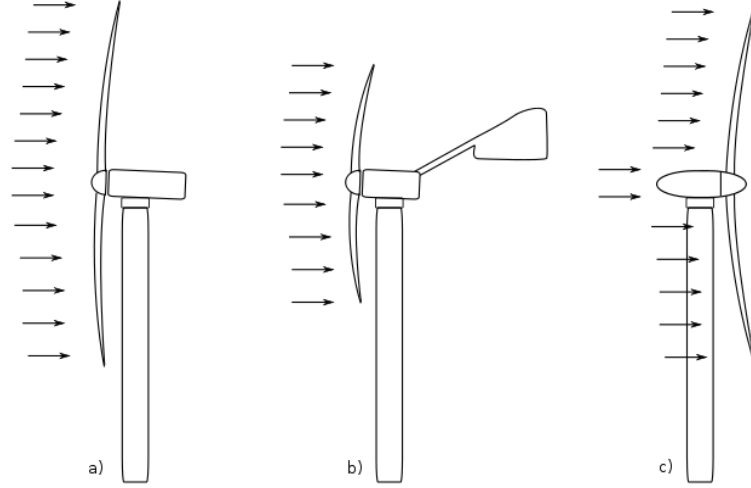
Günümüzde rüzgar enerjisi teknolojisinde baskın dizayn türü yatay eksenli rotora sahip rüzgar türbinleridir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde, düşey eksenlilerin aksine rüzgar akışı rotorun dönme eksenine paraleldir.

Yatay eksenli rüzgar türbinleri sürüklenme yerine kaldırma kuvvetinden yararlanırlar. Rotor daha yüksekte bulunduğu için yüksek rüzgar şiddeti girişi vardır. Ayrıca düşey rüzgar profili daha düzgündür (Hau, 2006).

Yatay eksenli rüzgar türbinleri rüzgar altı ve rüzgar üstü türbinler olarak ikiye ayrılırlar. Rüzgar altı türbinler rüzgarı öncelikle nasel kutusuyla, ardından kanatlarla karşılar. Rüzgar üstü türbinlerde ise rüzgar önce kanatlarla karşılanır.

Rüzgar altı türbinlerinde aktif bir rüzgara yönelim kontrolüne ihtiyaç olmaması ve kanat dizaynının daha kolay olması avantajdır. Fakat rüzgarın önce naselden geçmesi rüzgar gücünde dalgalanmalara neden olur bu da türbin üzerinde fatik yükün artmasını sağlar. Ayrıca oluşan rüzgar gölgesi verimin düşmesine neden olur. Rüzgar üstü türbinlerdeyse rüzgara yönelim kontrolü gereklidir. Kanatlar esnek olursa, yüksek rüzgar şiddetlerinde kuleye çarparak türbinini hasar görmesine neden olabilir. Bu nedenle kanat tasarımı rüzgar altı türbinlere göre daha zordur. Rüzgar öncelikle kanatlarla karşılandığı için dalgalanmalar ve rüzgar gölgelemesi ise azaltılmıştır (Riso National Laboratory, 2002).

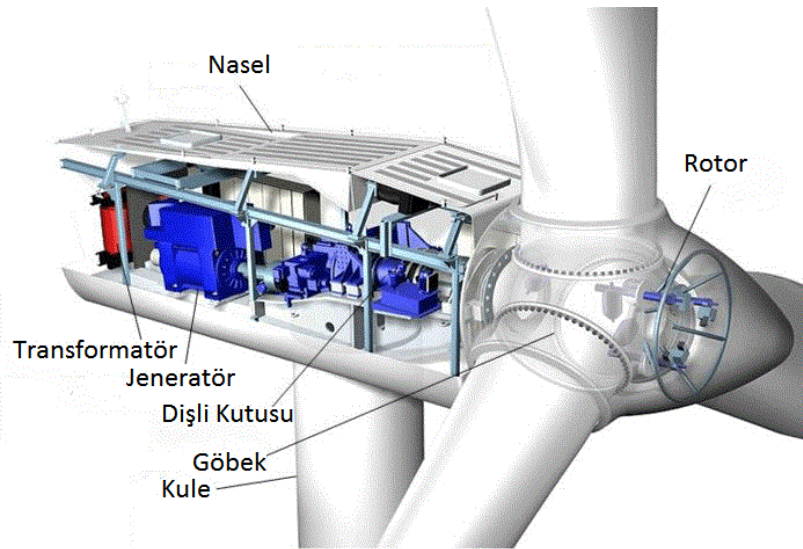
Şekil 3.2’de üç farklı türde yön kontrolü mekanizması gösterilmiştir. Birinci şekil aktif kontrol sistemine sahip bir rüzgar üstü türbine aittir. İkinci şekildeki rüzgar üstü türbinde kuyruk üzerine uygulanan aerodinamik kuvvetler sayesinde rüzgara pasif yönelim sağlanır. Üçüncü şekil ise rüzgarın önce nasel kutusuna gelmesi sayesinde pasif aerodinamik yönelme yapan rüzgar altı bir türbini temsil etmektedir.



Şekil 3.2: Rüzgar türbinleri için çeşitli yönelme mekanizmaları (Url-5).

### 3.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Bileşenleri

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin temel parçaları rotor, aktarım elemanları, yönelme sistemi, ana iskelet, nasel kutusu ve kuledir. Bu elemanlar Şekil 3.3’te gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin temel bileşenleri (Url-6).

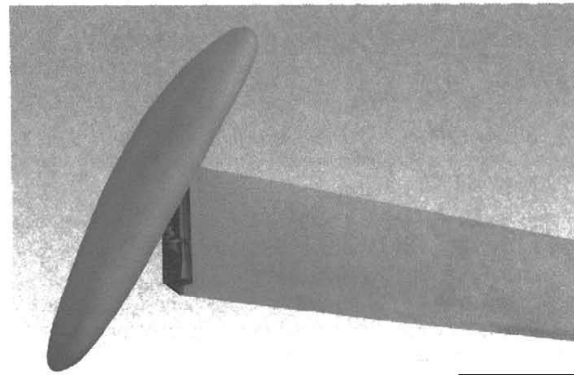
### 3.2.1 Rotor

Rotor, rüzgar türbinlerinde rüzgar içindeki enerjiyi dönel harekete çeviren parçadır. Rotoru oluşturan bileşenler kanatlar, aerodinamik kontrol yüzeyleri ve kanatların bağlandığı göbektir.

Günümüzde rotor için yaygın tasarım 3 kanatlı ve rüzgar üstü yapıdadır. Kanatların aerodinamik ve yapısal tasarımı türbin verimini etkiler. Kanatlar tarafından oluşturulan rotor süpürme alanının büyüklüğü de üretilen gücü doğrudan etkiler.

Göbek rüzgar türbinlerinde kanatları temel şafta bağlayan kısımdır. Tüm yükleri kanattan türbine taşır, genellikle çelikten yapılıdır.

Aerodinamik kontrol yüzeyi, rotorun aerodinamik özelliklerini değiştirmek için kullanılan araçtır. Mentеше, mil yatağı, yay ve bağlantı mekanizmalarından oluşur. Şekil 3.4 stall-regulated türbinlerde aerodinamik kontrol yüzeyi olarak kullanılan uç kanatçık için bir örnektir. Kanat açısı kontrolü bulunan türbinlerde tüm kanat bir aerodinamik kontrol yüzeyi olarak çalışır. Bazı türbinlerde de kısmi kanat açısı kontrolü yapılır. Bu tür türbinlerde kanadın iç tarafı göbeğe göre sabit pozisyonda, dışı ise hareketlidir.



Şekil 3.4: Uç kanatçık (Manwell ve diğ, 2002, p. 292).

### 3.2.2 Aktarım elemanları

Rüzgar türbini aktarım elemanları temel şaft, kenetleyiciler, dişli kutusu, frenler ve jeneratörden oluşur.

Temel şaft, rotorda oluşan torku diğer aktarım organlarına ileten kısımdır. Ayrıca rotorun ağırlığını destekler. Dişli kutusunun tasarımına bağlı olarak dişli kutusu içine entegre edilmiş veya bağımsız olabilir.



Kenetleme elemanları şaftları birbirine bağlar. Temel şaft-dişli kutusu arasında ve dişli kutusu-jeneratör arasında bulunurlar. Şaftları birbirine bağlamanın yanında tork dalgalanmalarını kırmak için de kullanılırlar.

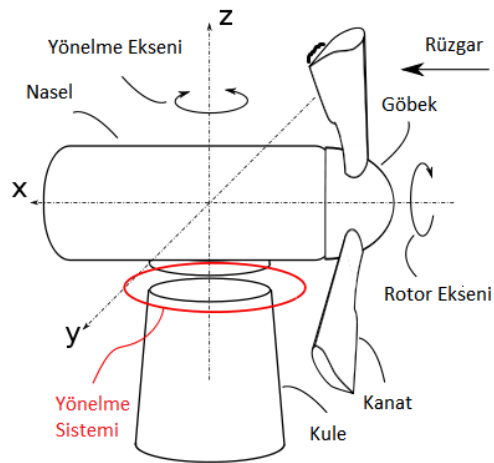
Dişli kutusu temel şafttan jeneratöre gelen dönüş hızını artırmak için kullanılır. Rotorun dönüş hızı elektrik jeneratörlerinin dönüş hızından düşük olduğu için dişli kutusu gereklidir. Küçük türbinlerde rotor bir kaç yüz rpm hız ile dönerken elektrik jeneratörleri 1800-1500 rpm ile dönmektedir.

Jeneratör, rotordan alınan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmeyi sağlar. Şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinin jeneratörleri genellikle sabit dönme hızına sahiptir. Bu durum rotorların da sabit hızla dönmesine neden olur.

Rüzgar türbinlerinin çoğunda mekanik fren sistemi bulunur. Bazı türbinlerde fren sistemi rotoru tamamen durdurabilir bazılarındaysa türbin çalışmazken türbinin durmasını sağlar.

### 3.2.3 Yönelme sistemi

Günümüzde neredeyse tüm yatay eksenli rüzgar türbinlerinde rüzgara yönelme sistemi vardır. Bazı türbinler güç eşlemesi için de aktif yönelmeden yararlanırlar. Fakat yüksek rüzgar şiddetlerinde gücün azaltılması için rotoru rüzgar geliş yönünden uzaklaştırmak, kanatların farklı noktaları üzerinde değişken tork oluşturarak fatik yükü artıracığı için bu yöntem genellikle tercih edilmemektedir. Yönelme sistemi jiroskopik kuvvetlerin etkisini azaltmak için yeterince yavaş olmalıdır.



Şekil 3.5: Yönelme sistemi (Ur1-7).

Aktif ve pasif olmak üzere iki tür yönelme vardır. Rüzgar üstü türbinlerde motor sayesinde aktif yönelme yapılır. Rüzgar altı türbinlerdeyse rotor üzerindeki aerodinamik kuvvetlerden yararlanarak pasif yönelme yapılır.

### 3.2.4 Nasel

Nasel ve temel iskelet dişli kutusu, jeneratör ve frenin içinde buldukları yapılardır. Bu parçalar kuleye bağlı olan temel iskelete sabitlenir. Temel iskelet rotor, jeneratör ve frenlerden kaynaklanan yükleri kuleye iletir, bunlara karşı yeterince dayanıklı olmalıdır.

Nasel kutusu ise rüzgar türbini bileşenlerinin hava şartlarından korunmasını sağlar. Genellikle fiberglas gibi hafif maddelerden yapılır.

### 3.2.5 Ölçme sistemleri

Modern rüzgar türbinlerinde kullanılan sensörlerle;

- rüzgar şiddeti
- rüzgar yönü
- rotor hızı
- güç
- kanat açısı
- titreşim
- sıcaklık ve yağ seviyesi
- hidrolik basınç

ölçümleri yapılmaktadır (Burton ve diğ., 2001).

Rüzgar türbinlerinde işletim ve yön kontrolü için rüzgar yön ve şiddeti ölçümünün doğruluğu önemlidir. İşletim sırası kontrolünde türbinin hangi operasyon modunda çalıştırılacağı belirlenmesi için rüzgar şiddeti bilgisi gereklidir. Yön kontrolü için de rüzgar yönü girişi gerekmektedir. Küçük türbinlerde yön kontrolü pasif aerodinamik hareket sayesinde, operasyon sırası kontrolü de üretilen gücü referans olarak gerçekleştirilmektedir. Fakat büyük ölçekli türbinlerde daha verimli çalışma için rüzgar yön ve şiddeti verilerinin girişi gereklidir.

Ölçümün doğru alınabilmesi için anemometrenin yerleştirildiği yerin uygun olması gerekmektedir. Türbinin yakınındaki yerlerde hava akışı rotorun dönüşünden etkilenmektedir. Türbin üzerinde olmayan bir ölçme sistemi isteniyorsa anemometre rotorun en az 10 rotor çapı uzağına yerleştirilmelidir. Fakat bu şekilde türbin konumu için doğru bir ölçüm sağlanamamaktadır. Bu nedenle anemometre genellikle türbin üzerinde ve türbinin diğer parçalarından en az oranda etkilenecek şekilde nasel kutusunun üzerine yerleştirilmektedir (Hau, 2006).



**Şekil 3.6:** Nasel üzerindeki ölçme sistemi (Hau, p.360).

### 3.2.6 Kule

Kule, rüzgar türbinlerinin diğer bileşenlerini yere bağlayan kısımdır. Rüzgar türbininin düzgün şartlarda çalışmasını sağlamak için, kule yüksekliğine karar verilirken düşey rüzgar profilinin düzenli olduğu bölge göz önünde bulundurulmalıdır.

Kule maliyeti türbinin toplam maliyetinin %20'sine kadar çıkabilmektedir. Kule yüksekliği arttıkça daha yüksek rüzgar şiddetlerinin bulunduğu bölgeye ulaşıldığı için dönüştürülebilir enerji artmaktadır. Öte yandan kulenin taşınması, montajı ve türbinin işletimi zorlaşmaktadır. Bunların yanında kule yüksekliğinin seçiminde türbinin kurulacağı bölgenin rüzgar karakteristikleri de rol oynamaktadır.

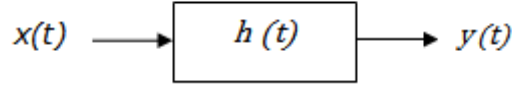
Rüzgar türbini kulelerinde diğer önemli dizayn parametresi de kullanılan malzemenin katılığıdır (stiffness). Kulelerde genellikle çelik veya beton kullanılmaktadır (Hau, 2006).

## 4. RÜZGAR TÜRBİNİ KONTROL SİSTEMLERİ

### 4.1 Kontrol Sistemlerine Genel Bakış

#### 4.1.1 Sistem

Sistem, belirli bir amacı gerçekleştirmek için birlikte çalışan parçaların oluşturduğu yapıdır. Sistemler bir girişi alarak bunu bir çıkışa dönüştürürler. Şekil 4.1’de basit bir sistemin blok diagram görülmektedir.



Şekil 4.1: Sistem blok diagramı.

Şekil 4.1’de  $x(t)$  zamana bağlı sistem girişini,  $h(t)$  sistem fonksiyonunu,  $y(t)$  ise sistem çıkışını ifade etmektedir.

Sistemler sahip oldukları özelliklere göre farklı davranışlar gösterirler. Temel sistem özellikleri; toplanırlık, homojenlik, lineerlik, zamanla değişmezlik, nedensellik, belleksizlik ve kararlılıktır.

a) Toplanırlık

Bir sisteme girişlerin toplamı uygulandığı zaman, bu girişlere ait çıkışların toplamı elde ediliyorsa sistem toplanırlık özelliğini göstermektedir.

b) Homojenlik

Sistem girişi bir sabitle ölçeklendiği zaman çıkışı da aynı miktarda ölçekleniyorsa sistem homojendir.

c) Lineerlik

Hem toplanırlık hem homojenlik özelliklerine sahip sistemler lineerdir.

Lineer bir sistemde,  $x_1$  ve  $x_2$  girişleri için;

$$y_1 = f(x_1) \quad (4.1)$$

$$y_2 = f(x_2) \quad (4.2)$$

cevapları üretiliyorsa  $\alpha x_1 + \beta x_2$  girişi için,

$$f(\alpha x_1 + \beta x_2) = \alpha f(x_1) + \beta f(x_2) = \alpha y_1 + \beta y_2 \quad (4.3)$$

cevabı üretilmektedir.

d) Zamanla değişmezlik

Sistem girişi ile çıkışı arasındaki ilişki zamana bağlı değilse sistem zamanla değişmezdir. Zamanla değişmez sistemlerde giriş sinyali belli süre ötelenğinde çıkış da aynı oranda ötelenmektedir.

e) Nedensellik

Sistem çıkışı sadece geçmiş ya da o anlık girişe bağlıysa, sistem nedenseldir. Çıkış, gelecek girişlere bağlıysa sistem nedensel değildir. Nedensel bir sistemde çıkıştaki değişiklikler girişteki değişikliklerden önce olamaz.

f) Belleksizlik

Bir sistemin belli zamandaki çıkışı sadece o zamandaki girişine bağlıysa sistem belleksizdir.

g) Kararlılık

Bir sisteme sonlu herhangi bir giriş uygulandığında çıkış da sonluysa sistem kararlıdır. Bu özelliğe sahip bir sistem sınırlı giriş sınırlı çıkış (BIBO) kararlılığa sahiptir.

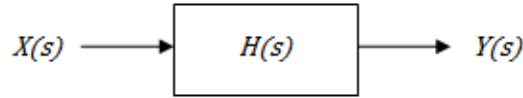
Doğrusal ve zamanla değişmeyen (LTI) sistemlerin davranışı sistemin impuls (darbe) cevabına göre analiz edilebilmektedir. Bu tür sistemlerde zaman domeninde sistem cevabı ( $y(t)$ ), giriş ( $x(t)$ ) ve sistemin başlangıç koşullarının 0 olduğu durumdaki impuls yanıtının ( $h(t)$ ) konvolüsyon integraliyle tanımlanmaktadır.

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (4.4)$$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (4.5)$$

Zaman domeninde sistemlerin modellenebilmesi için sık sık çok yüksek mertebeli diferansiyel denklemler gerekmektedir. Bu da zorluklara neden olmaktadır. LTI sistemler için zaman domeninden diğer domenlere dönüşüm sağlanarak bu sorun ortadan kaldırılabilir. Sürekli zamanlı sistemler Fourier dönüşümü ile  $\omega$  (açısal frekans) domenine, Laplace dönüşümü ile de s-domenine dönüştürülebilmektedir. Ayrık zamanlı sistemlerdeyse ayrık zaman Fourier dönüşümü ve z dönüşümü yoğun olarak kullanılan yöntemlerdir.

Lineer ve zamanla değişmeyen bir sistemde, başlangıç koşulları sıfırken sistemin impuls yanıtının Laplace dönüşümü sistemin *transfer fonksiyonu* olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.2'de s-domenindeki bir sistemin blok diagramı gösterilmektedir.



**Şekil 4.2:** s-domeninde bir sistemin blok diagramı.

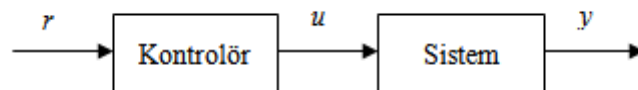
$$X(s)H(s) = Y(s) \quad (4.6)$$

Denklem 3.6 s-domeninde tek giriş-tek çıkışlı bir sistem için giriş  $X(s)$ , transfer fonksiyonu  $H(s)$  ve çıkış  $Y(s)$  arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Görüldüğü gibi zaman domenindeki konvolüsyon integralinin frekans domenindeki karşılığı çarpımdır.

#### 4.1.2 Kontrol sistemleri

Kontrol sistemlerinin amacı kontrol sistemi elemanları aracılığı ile sistem girişlerini kullanarak çıkışları önceden belirlenmiş bir şekilde kontrol etmektir (Kuo, 1967).

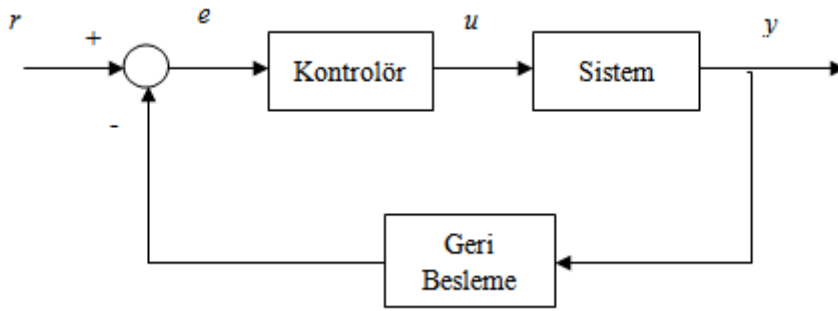
Temelde açık çevrim ve kapalı çevrim olmak üzere iki tür kontrol yöntemi vardır. Açık çevrim kontrolde sistemin mevcut durumu ile ilgili bilgi kontrolöre gönderilmemektedir. Şekil 4.3 açık çevrim kontrol sisteminin öğelerini göstermektedir.



### Şekil 4.3: Açık çevrim kontrol sistemi.

Şekilde  $r$  ulaşılmak istenen referans değeri,  $u$  kontrolörden sisteme gönderilen işareti,  $y$  ise sistemin çıkışını ifade etmektedir.

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde ise referans değere hatasız ulaşabilmek için, sistem çıkışından girişine geri besleme verilmektedir. Referans giriş ile geribesleme arasındaki hatayı gidermek için gereken sürücü işareti sisteme uygulanarak kontrol sağlanmaktadır. Şekil 4.4 negatif geribeslemeli bir kapalı çevrim kontrol sisteminin temel öğelerini göstermektedir.



### Şekil 4.4: Kapalı çevrim kontrol sistemi.

Şekil 4.4'te  $e$ , referans değer ile sistemin çıkışından gelen geribesleme arasındaki hatayı ifade etmektedir.

Kontrol sistemleri dizayn yöntemlerine göre iki temel kola ayrılabilir. Bunlar klasik kontrol yöntemleri ve modern kontrol yöntemleridir.

Klasik kontrol yöntemleri zaman ve frekans tanım bölgelerindeki farklı metotları içerir. Zaman tanım bölgesinde kontrolör tasarımı için fiziksel sistemler zamana bağlı matematiksel denklemleri gerektirmektedir. Bu da genellikle yüksek mertebeli diferansiyel denklemler gerektirdiği için çözüm zorlaştırmaktadır. Bölüm 4.1.1'de bahsedilen dönüşümler uygulanarak sistemler frekans tanım bölgesine geçirilerek daha hızlı ve kolay kontrol edilmesi sağlanmaktadır. Klasik kontrol yöntemleriyle yaygın olarak faz ilerlemeli, faz gerilemeli, faz ilerlemeli-gerilemeli (PI, PD ve PID) kontrolörler tasarlanmaktadır.

Modern kontrol yöntemlerindeyse, zaman tanım bölgesindeki yüksek mertebeli diferansiyel denklemler durum denklemleri denen daha küçük dereceli denklemlere çevrilmiştir (Lopez, 2007). Durum değişkenleri yaklaşımının klasik yöntemlere göre avantajları;



- Doğrudan zaman domeni yaklaşımıdır bu nedenle dijital bilgisayarlarda işlenmeye uygundur.
- Sadece sıfır başlangıç koşullu ve SISO (Single-Input Single-Output: Tek Giriş Tek Çıkışlı) sistemler değil lineer olmayan, zamanla değişen, MIMO (Multiple-Input Multiple-Output: Çok Giriş Çok Çıkışlı) sistemler için de uygundur.
- n. mertebeden diferansiyel denklemler n tane birinci mertebeden denkleme çevrilerek çözüm kolaylaştırılır.
- Performans indislerine göre optimal şartlarda dizayn edilebilir (Tripathi, 1984).

## 4.2 Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Amaçları

Rüzgar türbinlerinin sahip oldukları tüm alt sistemlerin düzenli çalışmasını sağlamak için kontrol sistemlerine ihtiyaç duyulur. Rüzgar türbini kontrol sistemlerinin temel amacı rüzgardan dönüştürülen enerjiyi optimize etmektir. Verimliliği artırmanın yanısıra kontrol sistemlerinden güç ve hız değerlerini belli sınırların altında tutarak türbinin aşırı yüksek rüzgar şiddetlerinde güvenli çalışmasını sağlamak beklenmektedir.

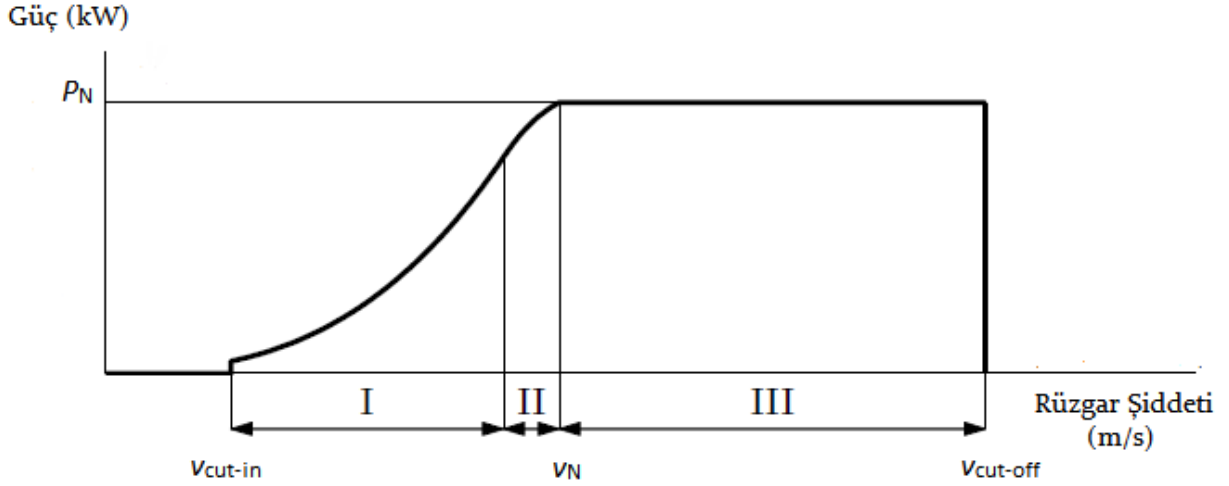
Rüzgar türbinlerinde kontrol amaçları genellikle birbirleriyle alakalı olmakta, bazen de çatışmaktadırlar. Temel strateji, kontrol hedefleri arasında dengeyi sağlamaktır. Başlıca kontrol amaçları enerji dönüşümünü optimum düzeye getirmek, mekanik yüklerin etkilerini azaltmak ve enerji kalitesi sağlamaktır.

### 4.2.1 Enerji dönüşümü

Rüzgar türbinleri için üretim kapasitesi, fiziksel ve ekonomik sınırları göz önünde bulundurarak rüzgardan dönüştürülebilecek gücü tanımlamaktadır. Genellikle rüzgar şiddetine karşı üretilen gücü belirten eğriyle gösterilir.

Tipik bir rüzgar türbini için ideal güç eğrisi şekil 4.5'te verilmiştir. İşlevsel rüzgar şiddeti  $v_{cut-in}$  ve  $v_{cut-off}$  arasında kalan hızlardır.  $v_{cut-in}$  türbinin çalışmaya başladığı rüzgar şiddetini,  $v_{cut-off}$  ise devreden çıktığı şiddeti göstermektedir. Bu sınırların dışında türbin çalışmamaktadır. Devreye girme hızının altında rüzgar çok yavaş olduğu için işletim maliyeti ve kayıplar karşılanamaz. Devreden çıkma hızının

üstündeyse aşırı yüklemeyi önlemek için türbinin kapatılması sağlanmaktadır. Şiddeti  $v_{cut-off}$  üzerinde olan rüzgarlar yüksek enerji taşısalar da, türbin üzerinde fazla yorulma ve titreşim oluştururlar ve yıllık enerji üretimine katkıları ihmal edilebilir düzeydedir bu nedenlerle türbin  $v_{cut-off}$  üzeri hızlarda çalıştırılmamaktadır (Bianchi ve diğ, 2007).



Şekil 4.5: İdeal güç eğrisi (Bianchi ve diğ, 2007, p. 51).

Şekil 4.5'te  $P_N$  türbin anma hızında çalışırken üretilen güç,  $v_N$  ise anma gücüne ulaşılan rüzgar şiddetini göstermektedir. İdeal şekilde kontrol edilen türbinlerde  $v_N$  üzeri hızlarda güç eğrisi türbinin anma hızına göre sabit değerde kalmaktadır. Türbinin anma hızı ulaşılabilir enerji değeri ve üretim maliyetlerinin dengede bulunduğu noktada olmalıdır. Anma hızının türbinin devreden çıkma hızına yakın olarak seçilmesi durumunda üretim maliyetinin artmasıyla birim enerji maliyeti artmaktadır (Bianchi ve diğ, 2007). Anma hızının çok düşük seçilmesi ise enerji dönüşüm veriminin düşmesine neden olmaktadır.

İdeal güç eğrisi farklı üretim hedeflerine sahip üç ayrı bölgeye sahiptir. Düşük rüzgar şiddeti bölgesinde (I. bölge) elde edilebilir güç nominal gücün altındadır. Ulaşılabilir güç rüzgar gücü ile güç katsayısının çarpımıyla bulunur.

Yüksek rüzgar şiddetinin gözlendiği III. bölgede aşırı yüklemenin önüne geçebilmek için üretim hedefi nominal güç ile sınırlandırılmıştır. Bu bölgede ulaşılabilir güç dönüştürülenden yüksektir bu nedenle türbin maksimum verimliliğin altında bir değer ile çalıştırılmaktadır. II. bölge optimum güç eğrisi olan I. bölge ile III. bölgedeki sabit güç çizgisi arasındaki geçiş bölgesidir. Bu bölgede, rotor hızı akustik

gürültü salınımını belli değerlerin altında tutmak ve merkezkaç kuvvetini rotor tolerans sınırının altında tutabilmek için sınırlandırılmıştır.

#### **4.2.2 Mekanik yükler**

Mekanik yükler sistem bileşenleri üzerinde fatik hasar meydana getirerek türbinin ömrünü kısaltırlar. Toplam maliyet daha küçük bir zaman dilimine bölüneceği için enerji maliyetinin artmasına neden olurlar.

Statik ve dinamik olmak üzere iki tür mekanik yük vardır. Statik yükler türbinin rüzgar ile karşılaşmasıyla oluşur. Daha önemli olan dinamik yükler ise rüzgarın rotor süpürme alanına değişken şekilde dağılmasıyla oluşur. Dinamik yükler mekanik yapı üzerindeki aerodinamik tork değişkenliklerini de içerir.

Dinamik yükler geçici (transient) ve periyodik yükler olarak sınıflandırılmaktadır. Geçici yükler, genellikle düşük frekanslıdır, türbülans ve gust nedeniyle oluşurlar. Uygun olmayan kontrol stratejileri güçlü geçici yüklere neden olabilir. Bu nedenle kontrol stratejisi oluşturulurken geçici yükler dikkate alınmalıdır. Kapalı çevrim sistemin türbülans sırasında kararlı hal durumu stratejisini takip etmesi geçici yük oluşumuna neden olabilir (Bianchi ve diğ, 2007).

Periyodik yükler ise rotorun olağan dönüşü nedeniyle oluşmaktadır. Rüzgar türbinlerinin gittikçe büyümesi ve parçalarının esnek olarak üretilebilmesi kontrol sistemlerinin bu yüklerin dinamikleri üzerindeki etkisini artırmıştır (Bossanyi, 2000).

Uygun kontrol stratejileri mekanik yükleri azaltırken, uygun olmayan stratejiler titreşim modlarını şiddetlendirir. Kontrolör titreşim modlarında sönüm sağlayarak yüksek frekanslı yükleri ve fatik hasar riskini azaltmalıdır. Eğer titreşim modu sönümlenemeyecekse şiddetlendirilmesini önlemek için kontrolör işlemede etki oluşturmamalıdır (Johnson ve diğ, 2005; Leithead ve Connor, 2000).

#### **4.2.3 Enerji kalitesi**

Enerji kalitesi üretim maliyetini birçok yönden etkiler. Örneğin düşük enerji kalitesi güç hatlarına ek yatırım masrafları getirir ve şebekeye aktarılan gücü sınırlandırabilir. Rüzgar hızı kısa ve uzun vadede değişkenlik gösterdiği için rüzgar türbini tarlaları düşük kaliteli üretici olarak görülürler. Bu nedenle kontrol stratejileri, güç eşlemeyi de göz önünde bulundurarak oluşturulmalıdır. Bu gereklilik rüzgar

türbini tarlalarının üretim kapasitesi arttıkça daha da önemli hale gelmektedir (Jauch ve diğ, 2005).

Enerji kalitesi, şebeke bağlantı noktasındaki frekans ve gerilim kararlılıklarına göre hesaplanır. Bir rüzgar türbini tek başına şebekeye bağlandığı zaman frekans etkilenmez. Fakat, büyük ölçekli bir rüzgar türbini tarlası şebekeye bağlanınca frekansı değiştirebilir ve düzenlenmesi gerekir (Bindner, 1999).

Rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlanması şebeke terminallerindeki gerilimi etkiler. Rüzgar hızı değiştikçe gerilimde de değişimler görülür. Bu değişimlerin büyüklüğü şebekenin bağlantı noktasındaki empedansına, aktif ve reaktif güç akışlarına bağlıdır. Enerji üretimini etkilemeden gerilim değişimlerini söndürmek için reaktif güç akışı kontrol edilmelidir. Kapasitör boşlukları kullanarak veya reaktif güç harcayan veya üreten senkron makinalar kullanarak bu sağlanabilir (Miller, 1982). Modern rüzgar türbinleri şebekeye güç konvertörleriyle bağlandığı için güç elektroniği sayesinde kontrol avantajı sağlanır. Reaktif güç kontrolü veya gerilim eşlemesi uygun elektronik konvertörler sayesinde yapılır (Tapia ve diğ, 2004; Hansen ve diğ, 2005).

### **4.3 Kontrol Stratejileri**

Rüzgar türbinleri, konvansiyonel enerji üretim tesislerinden farklı olarak enerji kaynağının değişkenliği nedeniyle sık sık ani dalgalanmalara maruz kalır. Bu da sistem üzerinde geçici yük artışına neden olur (Manwell ve diğ, 2002). Enerji kaynağının kontrol edilemez oluşu kontrol sistemleri tasarımının daha önemli hale gelmesine neden olmaktadır.

Bölüm 4.2'de bahsedilen kontrol amaçlarına ulaşabilmek için farklı kontrol stratejileri izlenebilir. Günümüzde yatay eksenli rüzgar türbinlerinde tipik olarak kanat açısı kontrolü, hız kesme kontrolü, jeneratör tork kontrolü ve yön kontrolü bulunur.

#### **4.3.1. Kanat açısı kontrolü**

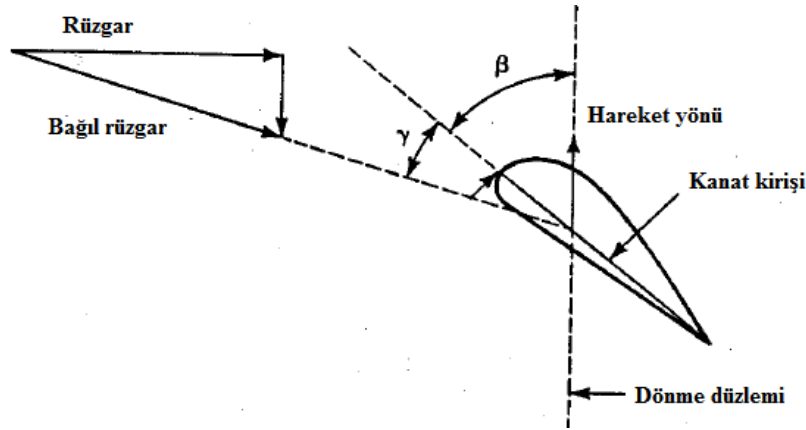
Kanat açısı kontrolü büyük rüzgar türbinlerinde türbin rotoru tarafından üretilen aerodinamik gücü kontrol etmek için en çok kullanılan yöntemdir. Bu kontrol stratejisinin aynı zamanda rotor tarafından üretilen aerodinamik yüke de etkisi büyüktür.

Anma hızının altında türbin olabildiğince fazla enerji üretmeye çalışır bu nedenle genellikle kanat açısı kontrolü gerekmez. Bu bölgedeki rüzgar hızlarında üretilen aerodinamik yükler de fazla olmadığı için kanat açısı kontrolüne gerek duyulmaz. Fakat, sabit hızlı rüzgar türbinlerinde optimum kanat açısı rüzgar hızına bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Anma hızının altında maksimum enerji üretimi için kanat açısı optimum değerinde tutulmalıdır. Rüzgar hızı arttıındaysa kanat açısını artırmak veya azaltmak torku değiştirmeyi sağlayacaktır.

Anma hızının üzerindeki rüzgar şiddetlerindeyse kanat açısı kontrolü üretilen enerjiyi ve mekanik yükleri düzenlemek için kullanılan etkili bir yoldur. Bu amaçlara ulaşmak için kanat açısı kontrolü değişen şartlara hızla cevap vermelidir.

Kanat açısı kontrolü kule dinamiklerini etkiler. Aerodinamik torku düzenlemek için kanatlar çevrildiğinde rotor üzerindeki aerodinamik itki önemli ölçüde değişir bu da kule üzerinde titreşime neden olur. Kontrolörün kazancı çok büyükse kule mekanizmasında kararsızlık oluşur. Bu nedenle kontrolörün tasarımı yapılırken kule dinamikleri de hesaba katılmalıdır (Burton ve diğ, 2001).



Şekil 4.6: Rüzgar türbini kanat kesidi (Johnson, 2005, p. 142).

Şekil 4.6'da bir kanat kesidinde kontrol edilen  $\beta$  açısı (pitch angle) ve hücum açısı (angle of attack)  $\gamma$  görülmektedir.

Kanat açısı kontrolü iki yolla yapılmaktadır.  $\beta$  açısının artması, yani kanadı rüzgara yöneltmek hücum açısını dolayısıyla kaldırma kuvvetini azaltarak torkun düşürülmesini sağlar.  $\beta$  açısını azaltmaksa kanat üzerindeki kaldırma kuvvetini azaltırken sürüklenme kuvvetini artırır ve torkun düşürülmesini sağlar.

Çoğu rüzgar türbininde  $\beta$  açısının artırılması stratejisi uygulanır. Bazı türbinlerdeyse azaltılır. Bu aynı zamanda aktif stall olarak da adlandırılır.  $\beta$  açısının artırılması daha dinamik bir davranışa gereksinim duyar. Azaltılması ise sürüklenme kuvvetini artırdığı için daha fazla itki yüküne neden olur.

Çoğu türbinde kanat açısı değiştirme bağlantısı göbeğe yakın yerde bulunur ve tam kanat kontrolü uygulanır. Bunun kadar yaygın olmayan diğer yöntemse kanatçık sayesinde kanatların sadece uçlarındaki açının etkilenecek aerodinamik özelliklerin değiştirilmesidir (Burton ve diğ, 2001).

#### **4.3.2 Hız kesme kontrolü**

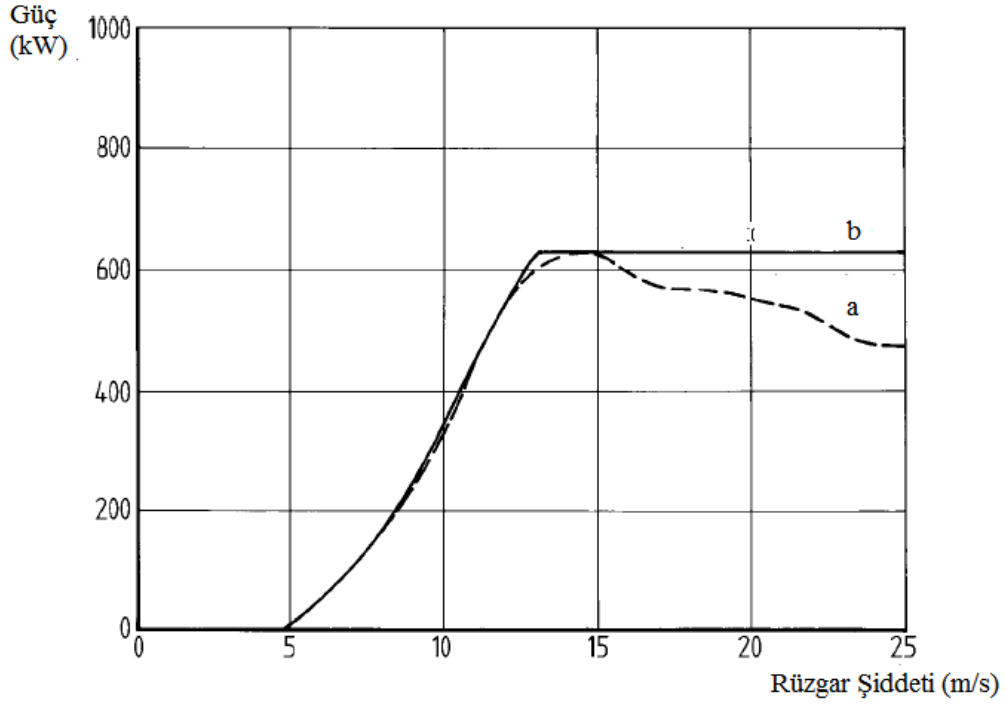
Bir çok rüzgar türbininde hız kesme kontrolü vardır. Bu kontrol stratejisinde yüksek rüzgar hızlarında kanatların durdurularak rotor gücünün sınırlandırılması sağlanır.

Hız kesme kontrolü uygulanırken rotor kanat geometrisi ve rotorun çalışacağı rüzgar hızı aralığı seçimi önemlidir. Güç kontrolünü sağlamak için rotor hızı genellikle aerodinamik açıdan optimum döne hızın altında seçilir (Hau, 2006).

Hız kesme kontrolünün en önemli avantajı kanatların göbeğe bağlantısının sabit olması nedeniyle rüzgar türbini üretim maliyetinin düşük tutulabilmesidir. Bu özelliğiyle küçük türbinler için uygun bir kontrol stratejisi sunar. Dezavantajı ise dönüştürülen enerjinin kanat açısının değiştirilebildiği rüzgar türbinlerine oranla düşük aerodinamik verimliliğe sahip olmasıdır (Burton ve diğ, 2001).

Rotorun yüksek rüzgar şiddetlerinde hızlanması yerine belli değerde tutulabilmesini sağlamak için rotor hızı sınırlandırılmalıdır. Sabit hızlı bir türbinde rotor hızı devreden çıkma torkunun altında bulunduğu sürece jeneratör tarafından sınırlandırılabilir. Değişken hızlı türbinlerdeyse yüksek rüzgar şiddetlerinde jeneratör torku aerodinamik torkla eşlenerek rotor yavaşlatabilir. Türbin düşük rüzgar şiddetlerinde stall noktasından uzakta çalışarak daha yüksek aerodinamik verime ulaşır.

Şekil 4.7’de kanat açısı kontrolü ile hız kesme kontrolünün rüzgar şiddeti-güç eğrileri görülmektedir. a ile gösterilen eğri hız kesme kontrolü kullanılan bir türbine, b ile gösterilen eğri ise ideal kanat açısı kontrolü uygulanan bir türbine aittir.



**Şekil 4.7:** a) Hız kesme kontrollü türbin b) Kanat açısı kontrollü türbin için rüzgar şiddeti-güç eğrileri (Hau, 2006, p. 105).

#### 4.3.3 Jeneratör tork kontrolü

Rüzgar türbinlerinde jeneratör torku şebeke bağlantılı jeneratörün karakteristikleri ile veya konvertörler kullanılarak kontrol edilebilir.

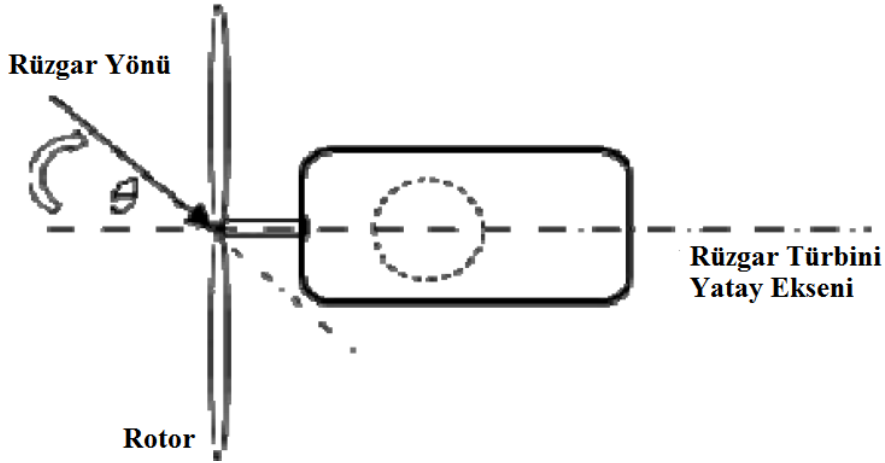
Şebeke bağlantılı jeneratörler senkron hıza uygun olacak şekilde çok küçük bir hız aralığında veya sabit değerde çalışırlar. Şebeke bağlantılı senkron jeneratörlerde yüksek tork kendini kompanze edecek anlık tork ile karşılaşır. Şebeke bağlantılı asenkron jeneratörlerin hızı ise senkron hızın yüzde 2-3 üne kadar değişim gösterebilir. Bu da senkron jeneratörlere göre daha yumuşak cevap ve düşük tork dalgalanmaları oluşturur.

Jeneratör ayrıca şebekeye güç elektroniği konvertörü üzerinden bağlı olabilir. Böylece jeneratör torku hızla istenen değere ayarlanabilir. Konvertör sayesinde frekans, faz ve gerilime karar verilebilir ve jeneratör tork kontrolü sağlanır (Manwell ve diğ, 2006).

#### 4.3.4 Yön kontrolü

Rüzgar türbininin yatay eksenini ile rüzgarın geliş yönü aynı olduğunda, türbin rüzgarın taşıdığı enerjiden en yüksek oranda yararlanabilmektedir. Rüzgarın geliş doğrultusu ve rotorun dönme eksenini arasındaki açı sapma açısı olarak

adlandırılmaktadır, rüzgar türbinlerinde yön kontrolünün amacı sapma açısını optimum seviyede tutmaktır. Şekil 4.8’de yatay eksenli bir rüzgar türbininin üstten görünümü ve sapma açısı ( $\theta$ ) gösterilmektedir. Sapma açısı büyüdükçe rüzgarın kanatlar üzerinde kaldırma kuvveti oluşturan bileşeni küçülmekte, böylece rüzgardan çekilen güç miktarı azalmaktadır. Bu nedenle yön kontrolü rotorun belli algoritmalarla rüzgar yönünü takip etmesini sağlamalıdır.



**Şekil 4.8:** Rüzgar türbinini üstten görünümü (Choi ve diğ, 2010, p.1).

Düşey eksenli rüzgar türbinlerinde yön kontrolü gerekmemektedir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde ise pasif veya aktif yön kontrol mekanizması bulunur. Pasif yön kontrolü, rügaraltı türbinlerde nasele, rüzgarüstü türbinlerdeyse rüzgar kuyruğu üzerine rüzgar tarafından uygulanan aerodinamik kuvvetler tarafından yapılmaktadır. Pasif yön kontrolü küçük ölçekli rüzgar türbinlerinde maliyeti azalttığı için uygun bir yöntemdir. Fakat sık değişen rüzgar yönü rotorun yönelme hızının çok artmasına, bu da jiroskopik momentin ve türbin üzerindeki yükün fazla olmasına neden olmaktadır. Bu yöntemin diğer dezavantajıysa hareketin sağlanabilmesi için yüksek rüzgar şiddetine ihtiyaç duyulmasıdır, bu nedenle düşük rüzgar şiddetlerinde uygun konumlanma sağlanamamaktadır (Hau, 2006).

Orta ve büyük ölçekli rüzgar türbinlerinde aktif yön kontrol sisteminin yazılım, donanım ve mekanik bileşenlerinin maliyeti türbinin toplam üretim maliyetinin küçük bir parçasıdır (Meija ve diğ, 2003). Rüzgara yönelimin daha hassas şekilde yapılabilmesi için bu tür türbinlerde aktif yön kontrolü uygulanmaktadır. Bu yöntemde rüzgarın geliş doğrultusu ile türbin rotorunun dönme eksenini arasındaki açı kullanılarak kontrol sisteminin aktüatör için uygun sinyali üretmesi sağlanmaktadır. Aktüatör olarak genellikle elektrik veya hidrolik motorlar kullanılmaktadır. Aktüatör



genellikle rotorun sabit hızla saat yönünde veya saat yönünün tersinde dönmesini sağlamaktadır (Burton ve diğ., 2001).

Sapma açısı sadece dönüştürülen gücün azalmasını sağlasaydı, yön kontrolü sayesinde yüksek rüzgar şiddetlerinde rotoru rüzgara göre ters yönde çevirerek türbinin anma hızında çalıştırılması uygun bir yöntem olabilirdi. Fakat sapma açısının farklı etkileri de bulunduğu için bu yöntem uygun değildir. Yön kontrolü ile güç sınırlandırması 1 kW anma gücün üstündeki türbinlerde uygulanmamaktadır (Ragheb, 2009).

Rotorun rüzgar yönüne daha yakın olan kısmı geri kalanından daha yüksek eğilme torkuna maruz kalır. Bu nedenle hem rüzgaraltı hem rüzgarüstü türbinler sapma açısını düşürecek eğilim göstermektedir. Sapma açısı etkisi altındaki rotor kanatları rotorun her dönüşünde ileri-geri harekete maruz kalırlar. Böylece türbinin sapma açısı etkisi altında çalıştırılması aşırı fatik yük oluşturmaktadır (Ragheb, 2009).

Üretilen gücü jeneratörden kuleye iletmek için kullanılan kablolar türbin aynı yönde çok fazla dönerse dolaşmaktadırlar. Bu nedenle rüzgar türbinlerinde kablo dolaşımının önlenmesi için yapılan tur sayısını kaydedip kontrolöre ileten sensörler bulunmaktadır. Genellikle rotorun aynı yönde 2-4 turdan fazla dönmesine izin verilmemektedir. Kablo dolaşımı kontrol altında tutulmasaydı bazı bölgelerde rotorun yılda aynı yönde 50-100 kere dönmesi mümkün olurdu (Det Norske Veritas & Riso National Laboratory, 2002).



## 5. YÖN KONTROLÜ ALGORİTMALARI

Bu çalışmada rüzgar türbinleri için yön kontrolü algoritması oluşturulurken yönelme mekanizmasının farklı gereksinimleri göz önünde bulundurulmuştur.

Temel hedef enerji dönüşümünün artırılması için rüzgar yönünün takip edilmesidir. Rüzgarın geliş yönü ve türbinin rotor doğrultusu arasındaki sapma açısı enerji kaybının miktarını belirler.

$$P(\theta) = P_{\max} \cos(\theta) \quad (5.1)$$

Denklem 5.1'de  $P_{\max}$ , mevcut rüzgardan dönüştürüleebilecek maksimum güç miktarını,  $P(\theta)$  ise türbinin rotoru ve rüzgarın geliş yönü arasında sapma açısının  $\theta$  olduğu durumda üretilebilecek gücü temsil etmektedir. Rüzgar türbini rotorunun doğrultusu ve rüzgarın geliş yönü aynı olduğu zaman sapma açısı 0 olmakta ve maksimum güç üretimi gerçekleşmektedir.

Fakat rüzgar şiddeti ve yönündeki sık değişimler nedeniyle rüzgar yönünün sürekli takibi hem enerji dönüşümü hem de türbinin mekanik bileşenlerinin ömrü açısından iyi sonuç vermemektedir. Bu nedenle kontrol sisteminde uygun algoritmaların kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada rüzgar türbini yön kontrolü için ölü zaman tabanlı farklı algoritmalar kurulmuştur. Bölüm 5.1'de modellerde kullanılan ortak prensipler, bölüm 5.2'de ise erteleme algoritmaları incelenecektir.

### 5.1 Sistemin Temel Prensipleri

Rüzgar yönünün sıklıkla değiştiği göz önünde bulundurulduğunda rotorun rüzgar yönünü takip etmesine bazı sınırlandırmaların getirilmesi gerekmektedir. Çok hassas bir takip sistemi, rotorun sürekli küçük hareketler meydana getirmesini sağlayacaktır. Bu hem enerji üretimi açısından verimli değildir hem de sistem bileşenleri üzerinde yük ve fatik hasar miktarını artırmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada oluşturulan kontrol algoritmalarının her sapmaya tepki vermemesi sağlanmıştır. +/- 5 dereceye kadar olan sapma açılarında rüzgara yönelim gerçekleşmemektedir. Daha büyük

açılardaysa modele erteleme süreleri eklenerek rüzgarın kararlı hale gelmesinin beklenmesi amaçlanmış, böylece rotorun sürekli hareket etmesinin önüne geçilmeye çalışılmıştır.

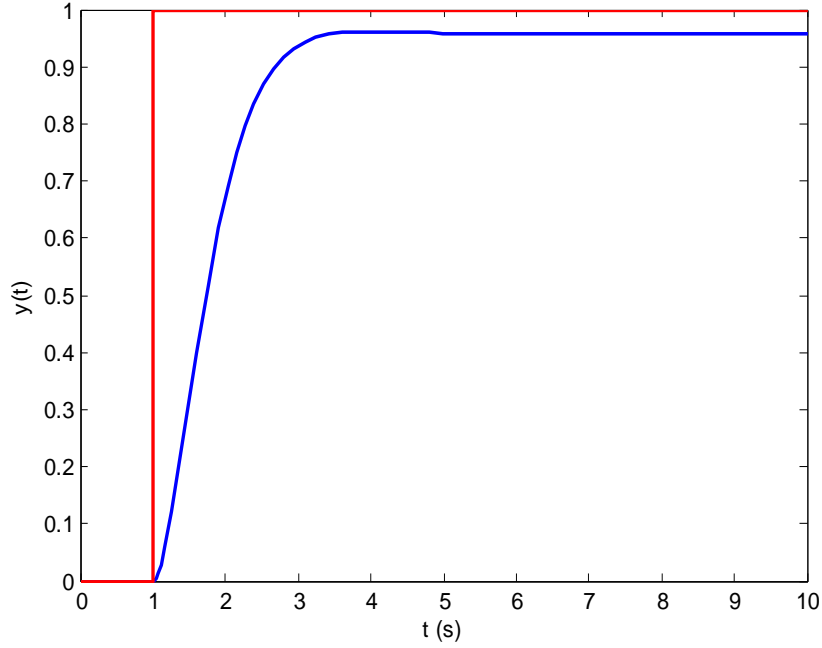
Oluşturulan modellerde enerji üretimini maksimum seviyeye getirebilmek için rotorun rüzgarın yönüne en kısa yolu kullanarak dönmesi sağlanmıştır. Dönüş yönü sapma açısının büyüklüğüne göre belirlenmiştir. Sapma açısı  $\theta$   $5^\circ$ - $180^\circ$  arası olduğu zaman saat yönünün tersine,  $181^\circ$ - $355^\circ$  arasında olduğu zaman ise saat yönünde hareket sağlanmıştır.

Modellerde ayrıca yönelme mekanizmasına giden kablonun neden olduğu fiziksel sınırlamalar dikkate alınmıştır. Aynı yönde üst üste belli bir değerden fazla dönüş kablo dolaşımına neden olacaktır. Kablo dolaşım sınırı her iki yönde 4 tur olarak belirlenmiş, bu sınıra gelindiğinde rotorun sadece ters yönde hareketine izin verilmiştir. Ayrıca kablo dolaşım sınırına ulaşma olasılığının düşürülmesi için rüzgar belli bir süre (400 s) boyunca jeneratörün devreye girme değerinin altında eserse rotorun ters yönde dönmesi sağlanarak başlangıç pozisyonuna getirilmesi amaçlanmıştır.

Kontrolör dizaynı için sistemin dinamik modeli gerekmektedir. Sistemin transfer fonksiyonu için tipik bir yatay eksenli rüzgar türbininin yönelme mekanizmasına uygun olarak 2. mertebeden aşırı sönümlü bir fonksiyon kullanılmıştır. Yüksek hızlı yönelme hareketi türbinin mekanik parçaları üzerinde jiroskopik momente neden olur. Bunun önlenmesi için yönelme sisteminin hızı düşük tutulmaktadır. Bu çalışmada oluşturulan modellerin kararlı hal durumundaki dönel hızları  $0.475^\circ/s$  dir. Transfer fonksiyonun basamak girişe cevabı Şekil 5.1’de verilmektedir.

## 5.2 Yönelme Algoritmaları

Yönelme sistemi için belirlenen temel prensipler kullanılarak farklı algoritmalara ait modeller oluşturulmuştur. Modeller arasındaki temel fark rüzgardaki yön değişimine farklı cevaplar vermeleridir. Bu algoritmaların performans analizlerinin yapıp karşılaştırılabilmeleri için MATLAB®/Simulink programında modellemeler yapılmıştır.



**Şekil 5.1:** Transfer fonksiyonunun basamak giriş cevabı.

### 5.2.1 Algoritma 1

Birinci algoritmada sisteme herhangi bir ölü zaman uygulanmamış, bölüm 5.1’de tartışılan genel prensipler uygulanmıştır.

Rüzgarın geliş yönü ile rotor düzleminin normali arasında +/- 5 derece açıdan fazla fark olması durumunda yönelme mekanizmasının beklemeden tepki vermesi böylece sistemin bu aralıktaki her rüzgar yönü değişimine duyarlı olması sağlanmıştır.

Rüzgara ait hız ve yön verileri kontrol sistemine giriş değerleri olarak verilmiştir. Türbini devreye alma değeri olarak 2.4 m/s, devreden çıkma değeri içinse 25 m/s kullanılmıştır. Rüzgar şiddeti bu değerlerin arasındaysa rüzgar yönü ve türbinin rotor ekseninin mevcut doğrultusu arasındaki fark referans olarak alınarak türbinin saat yönü veya tersinde hareket etmesi sağlanmıştır. Rüzgar yönünü en kısa yoldan yakalamak için sapma açısı iki paralel kola gönderilerek farklı yönlerde hareket elde edilmiştir. Sapma açısı 5-180 dereceler arasındaysa, saat yönünün tersinde 181-355 dereceler arasında olduğu zaman ise saat yönünde hareket sağlanmıştır.

Rotor pozisyonuna ait bilgi, sistemde geri beslemede kullanılmıştır. Kablo dolaşımının önlenmesi içinse rotorun saat yönünde veya saat yönünün tersinde üst üste 4 turdan (1440 derece) fazla dönmesi engellenmiş, bu durumda sadece ters yönde harekete izin verilmiştir. Sistemin bu sınıra geliş olasılığını azaltmak için rüzgar şiddeti en az 400 sn boyunca devreye alma hızının altındaysa, rotorun 0

konumuna getirilebileceği şekilde hareket sağlanmış, şiddet devreye alma hızının üstüne çıktığı an işleme son verilmiştir.

Bu algoritmaya ait Simulink modeli Ek 1’de verilmektedir.

### **5.2.2 Algoritma 2**

Kademeli erteleme süreleri tabanlı algoritma, günümüzde yaygın olarak kullanılan bir yöntem olarak oluşturulmuştur. Bu algoritmanın kullanıldığı gerçek bir model Hau (2006) tarafından verilmiştir.

Bu algoritma, sapma açıları bölümlere ayırarak her bölüm için farklı birer erteleme süresi atanmasına dayanır. Böylece, motorun sapma açısının her değişimine tepki vermesi önlenmiş, erteleme süresi sonunda dönme komutu devam ediyorsa hareketin başlaması sağlanmıştır. Erteleme sürelerinin belirlenmesinde sapma açısının büyüklüğü temel alınmıştır. Küçük sapma açıları için büyük erteleme süreleri uygulanmış, sapma açısı 180 dereceye yaklaştıkça erteleme süreleri düşürülmüştür.

Bu algoritmada değişik açı farkı aralıklarından birbirine geçişte, sistemin yeniden beklemeye başlamaması için Simulink/Stateflow Chart kullanılarak sayaçlar oluşturulmuş, sistemde hafıza elemanları olarak kullanılmıştır. Böylece sadece anlık veriye değil, geçmiş bilgiye de bağlı olarak hareket sağlanmıştır.

Bu algoritmada kademe sayısının sistem performansı üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için, farklı modeller üretilmiştir. Oluşturulan üç farklı modelde 180°’lik sapma açısı 2, 4 ve 6 kademeye ayrılmış ve her kademe için birer erteleme süresi atanmıştır. erteleme süreleri 10 s ve 60 s arasında seçilmiştir, saat yönü ve saat yönünün tersindeki sapma açıları için erteleme süreleri simetriktir.

#### **5.2.2.1 2 kademeli model**

Bu modelde 180 derecelik sapma açısı 2 bölmeyle ayrılmıştır. Rüzgar şiddeti rüzgar türbininin devreye alma ve devreden çıkma değerleri arasındaysa sapma açısının hesaplanıp 360 derecenin ayrıldığı 4 paralel kola gönderilmiştir. Farklı sapma açıları için belirlenen erteleme süreleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

**Çizelge 5.1:** 2 kademeli model için erteleme süreleri.

<i>Sapma açısı (°)</i>		<i>Erteleme süresi (s)</i>
<i>Saat yönü tersinde dönüş</i>	<i>Saat yönünde dönüş</i>	
5-90	181-270	60
91-180	271-355	10

#### 5.2.2.2 4 kademeli model

Bu modelde 180 derecelik sapma açısı 4 bölmeye ayrılarak sistemin daha hassas hale getirilmesi amaçlanmıştır. Bu model için erteleme süreleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

**Çizelge 5.2:** 4 kademeli model için erteleme süreleri.

<i>Sapma açısı (°)</i>		<i>Erteleme süresi (s)</i>
<i>Saat yönü tersinde dönüş</i>	<i>Saat yönünde dönüş</i>	
5-40	321-355	60
41-90	271-320	40
91-150	211-270	20
151-180	181-210	10

4 kademeli modele ait Simulink modeli Ek 2’de verilmiştir.

#### 5.2.2.3 6 kademeli model

Saat yönü ve tersi için 6 farklı erteleme süresi uygulanan modelin erteleme süreleri Çizelge 5.3’te verilmiştir.

**Çizelge 5.3:** 6 kademeli model için erteleme süreleri.

<i>Sapma açısı (°)</i>		<i>Erteleme süresi (s)</i>
<i>Saat yönü tersinde dönüş</i>	<i>Saat yönünde dönüş</i>	
5-30	331-355	60
31-60	301-330	40
61-90	271-300	30
91-120	241-270	26
121-150	211-240	20
151-180	181-210	10

#### 5.2.3 Algoritma 3

Bu algoritmada rüzgar türbini kontrol sistemi için alternatif bir yaklaşım önerilmiştir. Genel dizayn yöntemleri korunmuş, erteleme süresi algoritması için kademeli bekleme süresi tabanlı algoritmadan farklı olarak sapma açısına bağlı sürekli fonksiyonlar erteleme süresi olarak kullanılmıştır, dolayısıyla sonsuz sayıda kademesi olan bir algoritma önerilmiştir. Bu sayede daha hassas bir sisteme ulaşmak hedeflenmiştir.

Kademeli erteleme süresi algoritmaları kullanılan modellerde karşılaştırmanın tutarlı olabilmesi için erteleme süreleri 10-60 s arasında tutulmuştur. Bu algoritmanın kullanıldığı iki farklı model oluşturulmuştur. Bunların birincisinde sapma açısına bağlı lineer polinom, ikincisinde eksponansiyel fonksiyon erteleme sürelerinin belirlenmesi için kullanılmıştır.

### 5.2.3.1 Lineer fonksiyon tabanlı model

Bu modelde saat yönü ve tersindeki dönüşler için sapma açısına bağlı iki lineer polinom tanımlanmıştır.

Saat yönü tersindeki dönüş için;

$x = [5 \ 180]$  ve  $y = [30 \ 5]$  noktalarından geçen fonksiyon belirlenmiştir.

Bu fonksiyon denklem 5.2’de verilmiştir.

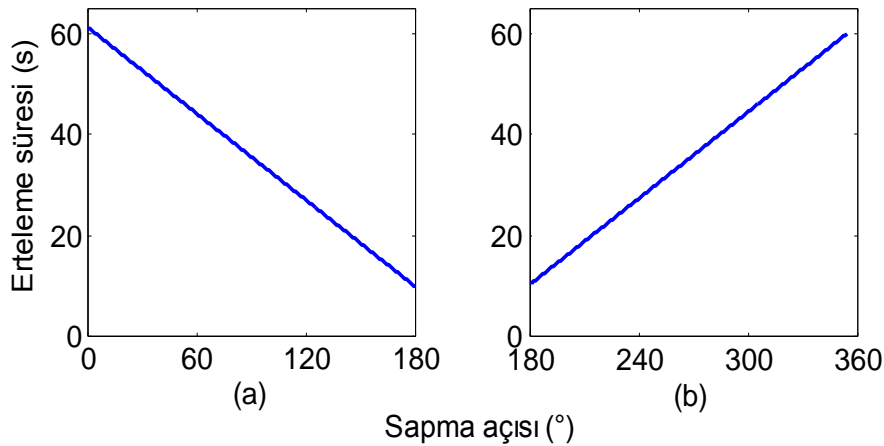
$$T_d = -0.1429\theta + 30.71 \quad (5.2)$$

Saat yönündeki dönüş içinse  $x = [355 \ 180]$  ve  $y = [30 \ 5]$  noktalarından geçen fonksiyon

$$T_d = 0.1429\theta - 20.71 \quad (5.3)$$

kullanılmıştır.

Şekil 5.2’de erteleme süresi olarak kullanılan fonksiyonlar verilmektedir.



Şekil 5.2: a) Saat yönünün tersi b) Saat yönü için lineer erteleme süresi-sapma açısı grafikleri.



### 5.2.3.1 Eksponansiyel fonksiyon tabanlı model

Bu modelde bekleme süresi fonksiyonları olarak lineer polinom yerine aynı sınır noktalarından geçen eksponansiyel eğriler kullanılmıştır.

Saat yönünün tersindeki sapma açlarına verilecek cevap için belirlenen bekleme fonksiyonu denklem 5.4'te verilmiştir.

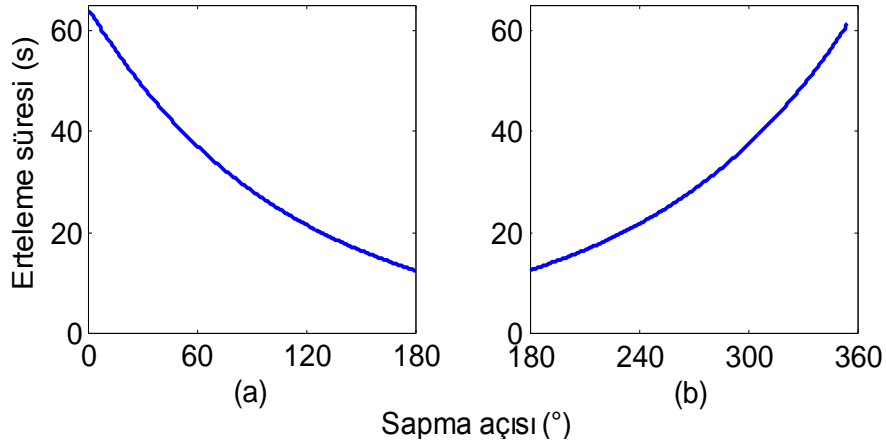
$$T_d = 32.14 \exp(0.009101\theta) \quad (5.4)$$

Saat yönündeki dönüş için belirlenen eğrinin fonksiyonu

$$T_d = 1.214 \exp(0.009101\theta) \quad (5.5)$$

olarak belirlenmiştir.

Şekil 5.3'te bu fonksiyonlar verilmektedir.



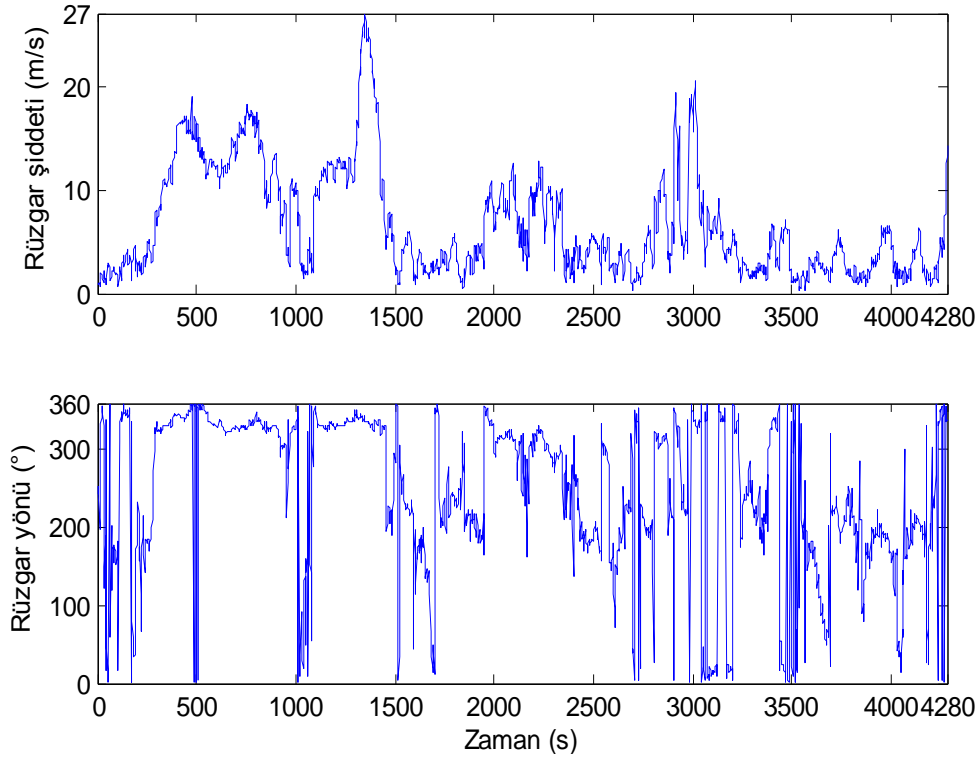
**Şekil 5.3:** a) Saat yönünün tersi b) Saat yönünde dönüşler için eksponansiyel erteleme süresi-sapma açısı grafikleri.

Bu algoritmaya ait Simulink modeli Ek 3'te verilmiştir. Ölü zaman fonksiyonları, simulink modellerindeki değişken erteleme bloklarına uygulanmıştır.

## 5.3 Enerji Dönüşümleri

Simülasyonlar sırasında rüzgarın şiddet ve yön verisinin 2 saniyelik örneklerden oluştuğu varsayılmıştır. Giriş işareti olarak gerçek bir rüzgar şiddet ve yön verisi, örnekleme periyodu 2 saniye gibi kullanılarak gerçek rüzgar karakterine yakın işaret elde edilmiştir. Mevcut rotor pozisyonu ve istenen pozisyon farkı 2 saniyede bir

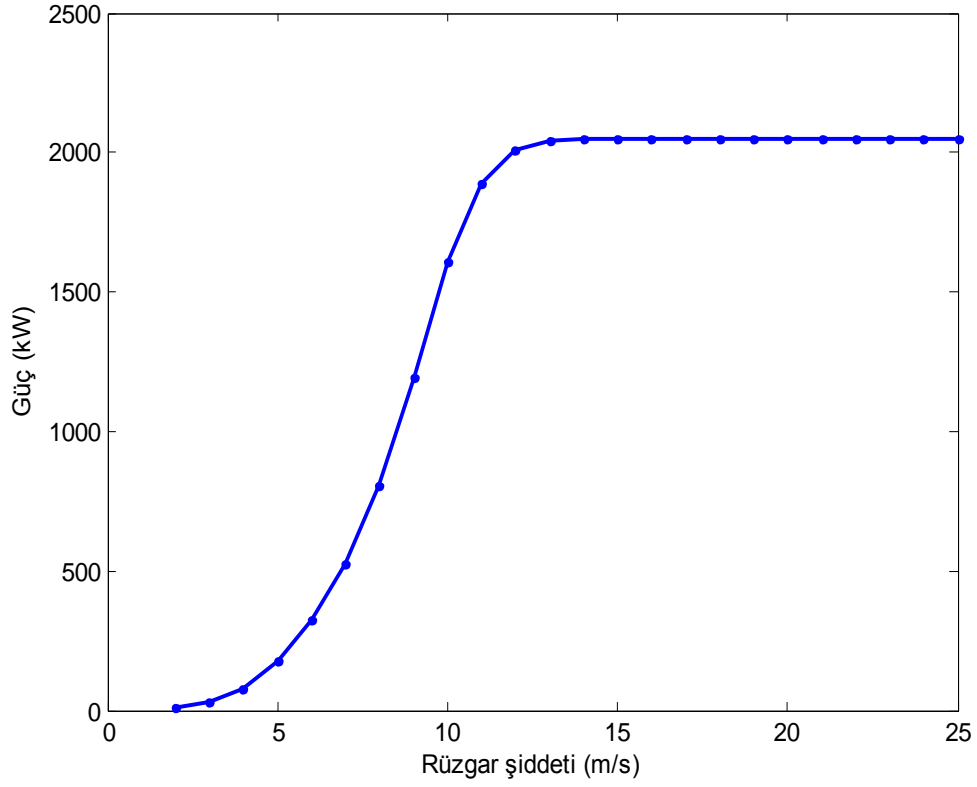
hesaplanarak kullanılan algoritmaya göre farklı işlemler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan rüzgar şiddeti ve hızına ait işaretler Şekil 5.4'te verilmiştir.



**Şekil 5.4:** Rüzgar şiddeti ve yönü.

Şekil 5.4'te görüldüğü gibi kullanılan giriş işaretleri yoğun değişimler göstermektedir. İşaretler 2140 veriden oluşmaktadır.

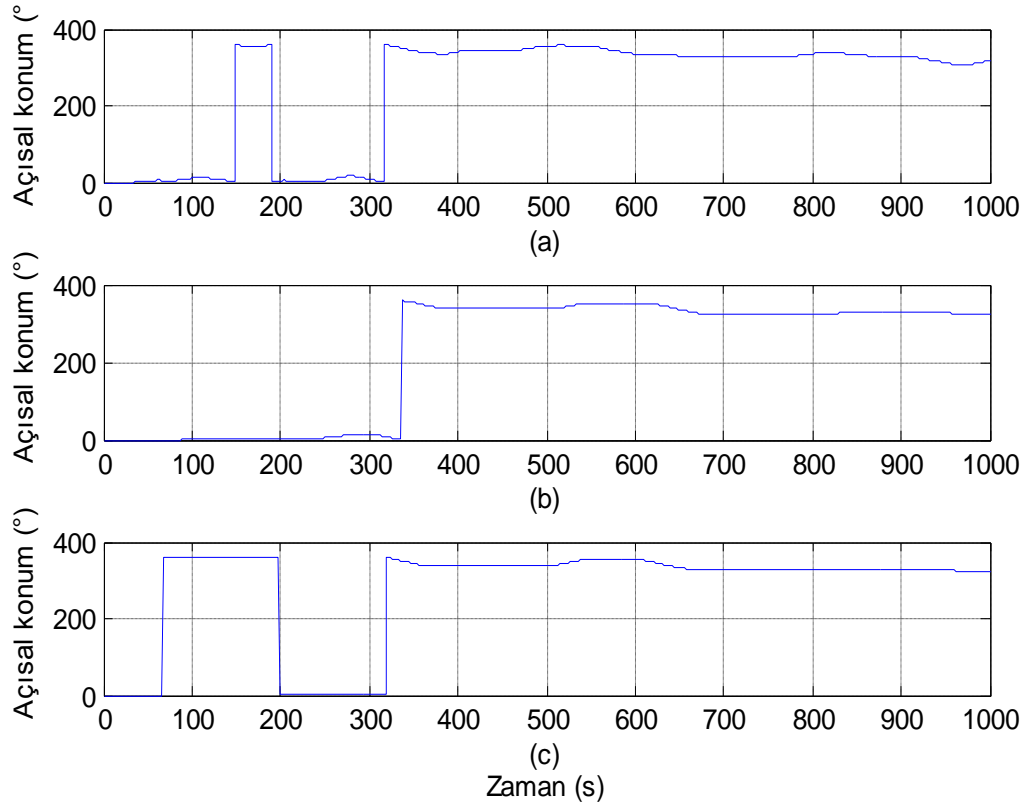
Modellerin performanslarının karşılaştırılabilmesi için güç ve enerji üretimleri incelenmiştir. Hesaplamalar yapılırken rüzgar türbini olarak 2 MW anma gücüne sahip Enercon E-82 seçilmiştir. Bu türbine ait rüzgar şiddeti- güç grafiği Şekil 5.5'te verilmektedir. Rüzgar şiddeti - güç eğrisine uygun olarak devreye alma hızı 2 m/s, devreden çıkma hızı ise 25 m/s alınarak hesaplamalar yapılmıştır.



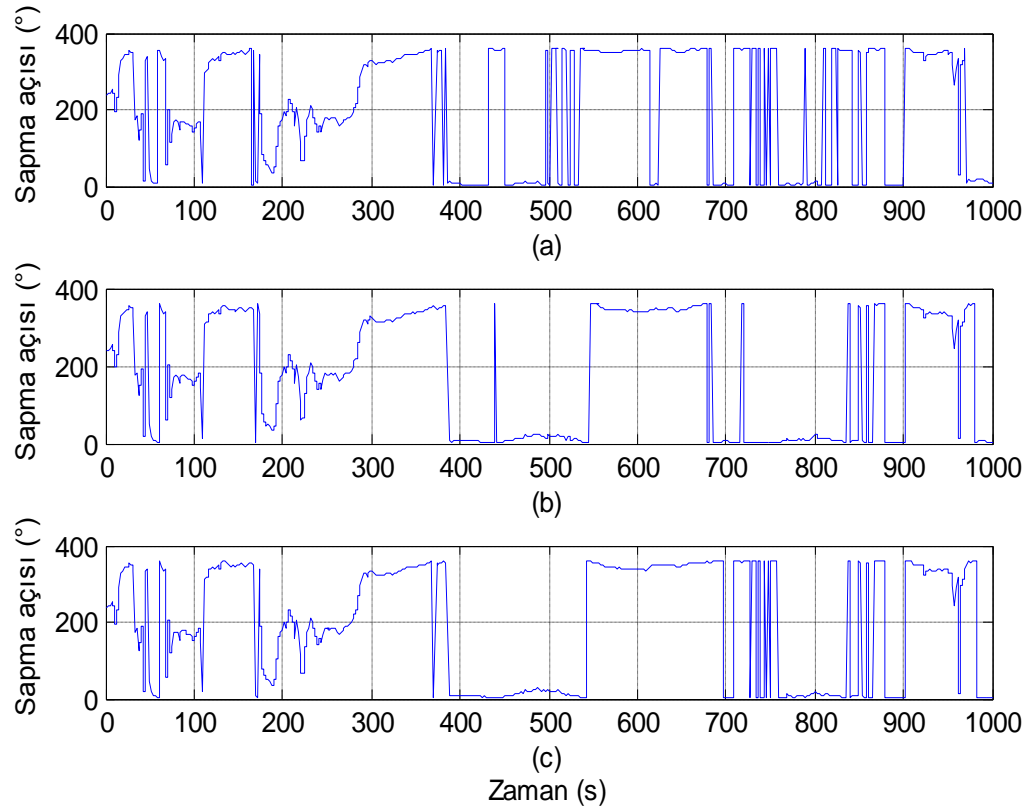
Şekil 5.5: Rüzgar şiddeti – güç eğrisi.

#### 5.4 Simülasyon Sonuçları

Şekil 5.6’da ilk 1000 veri için her algoritmadan birer modelin türbin rotorunun açılmal pozisyonu gösterilmektedir. Şekiller sırasıyla erteleme süresi kullanılmayan algoritma, 4 kademeli model ve eksponansiyel fonksiyon tabanlı modele aittir. Görüldüğü gibi farklı erteleme süreleri uygulanması sonucu türbin rotorlarının açılmal konumu değişkenlik göstermektedir. Erteleme süresi uygulanmayan algoritmada türbin rüzgar yönündeki her değişime tepki verdiği için daha değişken bir grafik ortaya çıkmıştır. Diğer iki model ise uygulanan erteleme sürelerine bağlı olarak farklı konumlarda bulunmaktadır.



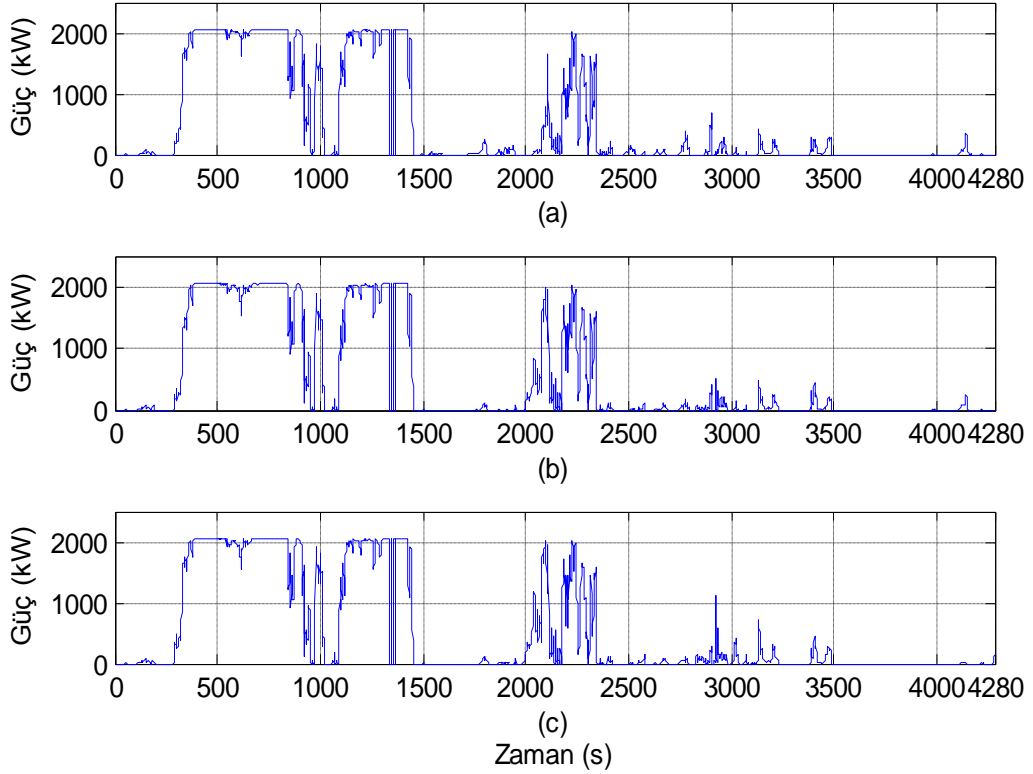
**Şekil 5.6:** a) Erteleme süresi kullanılmayan model b) 4 kademeli model c) Eksponansiyel erteleme süreli model için açısal konum-zaman.



**Şekil 5.7:** a) Erteleme süresi kullanılmayan model b) 4 kademeli model c) Eksponansiyel erteleme süreli model için sapma açısı-zaman.

Şekil 5.7 ilk 1000 veri için a) erteleme süresi kullanılmayan algoritmanın b) 4 kademeli modelin c) eksponansiyel fonksiyon tabanlı modelin sapma açılarını vermektedir.

Şekil 5.8 ise söz konusu modellerin tüm simülasyon süresi için güç dönüşümlerini vermektedir. Şekilden görüldüğü gibi sapma açısı değişkenliğine bağlı olarak aynı rüzgar verisi altında farklı miktarlarda güç dönüşümü ortaya çıkmaktadır.



**Şekil 5.8:** a) Erteleme süresi kullanılmayan model b) 4 kademeli model c) Eksponansiyel erteleme süreli model için güç-zaman.

Çizelge 5.4'te çalışmada oluşturulan tüm modellerin gerçek veri olan 6.6 m/s rüzgar hız ortalamasıyla yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen enerji dönüşümleri görülmektedir. Görüldüğü üzere erteleme süresi kullanılmayan algoritmanın enerji dönüşümü en düşük çıkmıştır. Sapma açısının kademelere ayrılarak erteleme süresi uygulanan modellerde enerji dönüşümünde artış görülmektedir. 180 derece fark açısının ayrıldığı kademe sayısı arttıkça, daha hassas modeller elde edilmiştir. Görüldüğü gibi modellerin enerji dönüşümü, kademe sayısı arttıkça artış göstermektedir. Kurulan modeller arasında en iyi sonucu ise sürekli fonksiyon tabanlı erteleme süresine sahip olan modeller vermiştir. Bu modellerde kademe sayısı sonsuza gittiği için daha hassas yaklaşım uygulama imkanı oluşmaktadır. Bu

çalışmada kullanılan bölgeye ait rüzgar yön verisi için oluşturulan modeller arasında en uygun sonuç eksponansiyel polinom tabanlı erteleme süresi uygulanarak elde edilmiştir.

**Çizelge 5.4:** Modellerin enerji dönüşüm sonuçları.

<i>Model</i>	<i>Enerji (Wh)</i>
Erteleme süresi yok	605.8
2-kademeli	607.5
4-kademeli	614.3
6-kademeli	621.1
Lineer fonksiyon tabanlı	623.6
Eksponansiyel fonksiyon tabanlı	627.8

Rüzgar hızı ortalamasının sonuçlar üzerindeki etkisinin görülebilmesi için, rüzgar hız verisi farklı şekillerde ölçeklendirilerek modellerin simülasyonları yeniden yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir. 6.6 m/s ortalamaya sahip olan gerçek veri ortalaması 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s ve 8 m/s ortalamalı verilere dönüştürülerek modellerin 4280 saniyelik simülasyonları yapılmıştır. Çizelge 5.5, 5.6, 5.7 ve 5.8 sırasıyla 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s ve 8 m/s ortalamalı rüzgar hızları için enerji üretim değerlerini göstermektedir.

**Çizelge 5.5:** 5 m/s ortalama rüzgar hızı için enerji üretimleri.

<i>Model</i>	<i>Enerji (Wh)</i>
Erteleme süresi yok	435.7
2-kademeli	448
4-kademeli	440.4
6-kademeli	453.5
Lineer fonksiyon tabanlı	453.5
Eksponansiyel fonksiyon tabanlı	451.7

**Çizelge 5.6:** 6 m/s ortalama rüzgar hızı için enerji üretimleri.

<i>Model</i>	<i>Enerji (Wh)</i>
Erteleme süresi yok	566.9
2-kademeli	583.5
4-kademeli	573.9
6-kademeli	586.4
Lineer fonksiyon tabanlı	587.5
Eksponansiyel fonksiyon tabanlı	583.8

**Çizelge 5.7:** 7 m/s ortalama rüzgar hızı için enerji üretimleri.

<i>Model</i>	<i>Enerji (Wh)</i>
Erteleme süresi yok	622.8
2-kademeli	625.5
4-kademeli	632.5
6-kademeli	640.2
Lineer fonksiyon tabanlı	642.9
Eksponansiyel fonksiyon tabanlı	642

**Çizelge 5.8:** 8 m/s ortalama rüzgar hızı için enerji üretimleri.

<i>Model</i>	<i>Enerji (Wh)</i>
Erteleme süresi yok	664.3
2-kademeli	653.6
4-kademeli	663.2
6-kademeli	663.5
Lineer fonksiyon tabanlı	661.5
Eksponansiyel fonksiyon tabanlı	664.6

Çizelge 5, 6, 7 ve 8’de görüldüğü gibi sürekli fonksiyon tabanlı erteleme süresi algoritması 5 m/s, 6 m/s ve 7 m/s ortalama rüzgar hızına sahip verilerin kullanıldığı durumda erteleme algoritması kullanılmayan modele göre daha iyi sonuç vermiştir. Rüzgar hız ortalaması artırıldıkça beklenen sürede enerji kaybının yüksek olması nedeniyle algoritmaların etkinliği azalmıştır. 8 m/s ortalama rüzgar hızı kullanılan simülasyonda erteleme süresi kullanılmayan algoritma ile eksponansiyel fonksiyon tabanlı erteleme süresi kullanılan algoritma arasında fark kalmamıştır.





## 6. SONUÇ

Bu çalışmada rüzgar türbini yönelme sistemlerinin enerji dönüşüm performansını artırmak için MATLAB®/Simulink programı kullanılarak farklı algoritmalar geliştirilip simülasyonları yapılmıştır. Rüzgar şiddeti ve yönünün genel karakteristikleri nedeniyle oluşabilecek problemlerin etkisini azaltmak için erteleme süresi tabanlı modeller oluşturulmuştur.

Enerji dönüşüm performansının artırılması için temel kriter olan rüzgar yönünün takip edilmesi sağlanırken rüzgar özelliklerindeki sık değişimler ve türbinin fiziksel kısıtlamaları göz önünde bulundurularak oluşturulan genel prensipler tüm modellere uygulanmıştır. Etkili bir kontrolör dizaynı için rüzgar türbini yönelme kontrolüne ait genel prensiplerin yanında çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir.

Öncelikle erteleme süresi uygulanmadan rüzgar yönündeki 5° nin üzerindeki tüm sapma açılarına tepki veren bir sistem kurulmuştur. Rüzgar şiddeti türbinin devreye alma ve devreden çıkma hızları arasında ise sürekli takip sağlanmıştır. İkinci algoritma için günümüzde rüzgar türbini yönelme kontrolünde sıklıkla görülen yöntem kullanılmıştır. Sapma açıları kademelere ayrılmış, her kademe için farklı birer erteleme süresi uygulanmıştır. Büyük sapma açılarında kısa, küçük açılarda daha uzun erteleme süreleri kullanılmıştır. Bu algoritma ile 180 derecenin 2, 4 ve 6 kademeye bölüdüğü üç farklı model oluşturulmuştur. Üçüncü algoritmada farklı bir prensip ile erteleme sürelerinin atandığı yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu algoritmada sapma açılarına bağlı sürekli fonksiyonların kullanıldığı değişken erteleme süreleri kullanılmıştır. Bu yöntem ile oluşturulan iki farklı modelden birinde lineer polinom, diğerinde ise eksponansiyel fonksiyon kullanılarak erteleme süreleri atanmıştır.

Modellerde giriş için öncelikle 2 saniye aralıklı 6.6 m/s'lik ortalamaya sahip 2140 veri kullanılmıştır. Modellerin erteleme süreleri 10-60 saniye arasında tutulmuştur. 2 saniyede bir rotorun mevcut pozisyonu ve rüzgarın geliş yönü karşılaştırılarak sapma açısına göre sistem cevabı sağlanmıştır. Modellerin enerji dönüşüm karşılaştırmalarının yapılması için 2 MW kapasiteli bir rüzgar türbinine ait rüzgar şiddeti-güç grafiği kullanılmıştır.

6.6 m/s ortalama hıza sahip veriyle yapılan simülasyonlar sonucu en düşük enerji dönüşüm sonucunun erteleme süresi içermeyen birinci algoritma ile elde edildiği görülmüştür. Kademeli modellerin performansı kademe sayısı arttıkça sistemin daha hassas hale gelmesine bağlı olarak artmıştır. 2 kademeli modelde 607.5 Wh, 4 kademeli modelde 614.4 Wh, 6 kademeli modelde ise 621.1 Wh enerji dönüşümü olduğu görülmüştür. Önerilen sürekli fonksiyon tabanlı erteleme süresine sahip modeller en yüksek enerji dönüşüm sonuçlarını vermiştir. Lineer polinom tabanlı erteleme süresi fonksiyonu kullanılan modelde 623.3 Wh, eksponansiyel fonksiyon tabanlı modelde ise 626.1 Wh enerji dönüşümü gerçekleşmiştir. Bu tür bir kontrol stratejisinin günümüz kontrolörleri ile uygulanması mümkündür.

Ortalama rüzgar hızının sistem üzerindeki etkisinin görülebilmesi için verinin ortalama hızı 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s ve 8 m/s'ye dönüştürülerek modellerin simülasyonları yapılmıştır. Sürekli fonksiyon tabanlı algoritmaların 5 m/s, 6 m/s ve 7 m/s ortalama hıza sahip rüzgarlarda erteleme süresi kullanılmayan algoritmadan daha yüksek enerji üretimi sağladığı görülmüştür. 8 m/s ortalama rüzgar hızı kullanılan simülasyonların sonucunda ise erteleme sırasında oluşan enerji kaybının yüksek olması nedeniyle algoritmaların performansının düştüğü görülmüştür.

Rüzgar türbinlerinde rotor yönü kontrolü için uygun stratejinin belirlenmesinde türbinin kurulacağı bölgenin rüzgar rejiminin büyük önemi vardır. Bu çalışmada kullanılan rüzgar yön verisi yoğun değişimler göstermektedir. Farklı durumlar için rüzgar rejimi ve türbin özelliklerine göz önüne alınarak daha uygun sonuç verebilecek algoritmalar üretilebilir.

## KAYNAKLAR

- Ackermann T., Söder L.** (2002). An Overview of Wind Energy Status 2002, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **6**, 67-128.
- Ackermann T.** (2005). *Wind Power in Power Systems* (editor), John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.
- Barutçu B.** (2009). Wind Energy and Conversion Technology Ders Notları. İTÜ Enerji Enstitüsü.
- Baumbach G.** (1991). *Luftreinhaltung*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Bianchi F. D., Battista H. D., Mantz R. J.** (2007). *Wind Turbine Control Systems; Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*. Springer-Verlag London.
- Bossanyi E.** (2000). The Design of Closed Loop Controllers for Wind Turbines. *Wind Energy* **3**, 149-163.
- Bridner H.** (1999). Power Control for Wind Turbines in Weak Grids: Concepts Development. *Technical Report RISO-R-1118(EN)*, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Bu F., Huang W., Hu Y., Xu Y., Shi K., Wang Q.** (2009). Study and Implementation of a Control Algorithm for Wind Turbine Yaw Control System. *Proceedings of the World-Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference*, Nanjing, China, 24-26 Eylül.
- Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E.** (2001). *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons Ltd. England.
- Chen F., Yang J.** (2009). Fuzzy PID controller used in yaw system of wind turbine. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, IEEE-PESA*; 20-22 Mayıs, 1-4.
- Choi H. S., Kim J. G., Cho J. H., Nam Y.** (2010). Active Yaw Control of MW Class Wind Turbine. *International Conference of Control, Automation and Systems*; 27-30 Ekim.
- Det NorskeVeritas and Riso National Laboratory** (2002). *Guidelines for Design of Wind Turbines* 2nd ed. Jydsk Centraltrykkeri, Copenhagen.
- Fröde E.U.F.** (1981). *Windmühlen*, Cologne, Du Mont Buchverlag.
- Hansen M., Hansen A., Larsen T., Oye S., Sorensen P., Fuglsang P.** (2005). Control Design for a Pitch-Regulated, Variable Speed Wind Turbine. *Technical Report RISO-R-1500 (EN)*, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Hau E.** (2006). *Wind Turbine Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd Edition, Germany.

- Hoven I. V. D.** (1957). Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in The Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycles per Hour, *Journal of Meteorology*, **14**, 160-164.
- Jauch C., Matevosyan J., Ackermann T., Bolik S.** (2005). International Comparison of Requirements for Connection of Wind Turbines to Power Systems. *Wind Energy* **8** (3), 295-306.
- Johnson G. L.** (2001). *Wind Energy Systems*, Electronic Edition, Manhattan, KS.
- Johnson K., Fingersh L., Wright A.** (2005). Controls Advanced Research Turbine: Lessons Learned During Advanced Controls Testing. *Technical Report NREL/TP-5000-38130*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, USA.
- König, F. von** (1978). *Windenergie in Praktischer Nutzung*, München, Udo Pfriemer Verlag.
- Kuo B. C.** (1967). *Automatic Control Systems*, Prentice-Hall.
- Leithead W., Connor B.** (2000). Control of Variable Speed Wind Turbines: Design Task. *International Journal of Control* **73** (13), 11889-1212.
- Lopez K.** (2007). *Control Systems - Digital Systems*. Global Media.
- Manwell, J. F., McGowan, J.G. and Rogers, A. L.** (2002). *Wind Energy Explained- Theory, Design and Application*, John Wiley of Sons Ltd University of Massachusetts, Amherst, USA.
- Mejia E. R., Filipek J. W., Salazar J. T.** (2003). A cheap, reliable and efficient regulator for small horizontal axis wind turbines. *Applied Energy* **74**, 229-237.
- Menteş Ş. S.** (2010). Rüzgar Enerjisi ve Sistemleri Ders Notları. İTÜ Uçak Uzay Fakültesi.
- Miller T.** (1982). *Reactive Power Control in Electric Systems*, John Wiley & Sons, New York, USA.
- Piao H., Wang Z.** (2008). Simulative Study of a New Control Algorithm for Yawing Control System with PSCAD, *The third international conference on deregulation and restructuring and power technologies, DRPT*, Nanjing, China 6-8 Nisan.
- Shepherd D. G.** (1994). *Historical Development of The Windmill, in Wind Trubine Technology*, p.2, Ed. Spera, D., A., ASME Press, New York.
- Tripathi S.** (1984). *Modern Control Systems*. Infinity Science Press, 2008. Hingham, Massachusetts.
- Tapia A., Tapia G., Ostolaza J.** (2004). Reactive Power Control of Wind Farms for Voltage Control Applications. *Renewable Energy* **29**, 377-392.
- Url-1** <[http:// en.wikipedia.org/wiki/File:Sailing\\_ship\\_Chance,\\_aground\\_at\\_Bluff,\\_1902.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sailing_ship_Chance,_aground_at_Bluff,_1902.jpg) >, alındığı tarih: 10.11.2011.
- Url-2** <[http:// www.lsrhs.net/departments/science/faculty/brandesa/images/winds.jpg](http://www.lsrhs.net/departments/science/faculty/brandesa/images/winds.jpg) >, alındığı tarih: 10.11.2011.

**Url-3** <[http:// www.ux1.eiu.edu/~cfjps/1400/FIG06\\_011.jpg](http://www.ux1.eiu.edu/~cfjps/1400/FIG06_011.jpg) >, alındığı tarih: 11.11.2011.

**Url-4** <[http:// www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ed403\\_01.htm](http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ed403_01.htm)>, alındığı tarih: 14.11.2011.

**Url-5** <<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Wind.turbine.yaw.system.configurations.svg>>, alındığı tarih: 21.10.2011.

**Url-6** <[http://windpoweralternators.co.uk/Alternator\\_Wind\\_Generator.php](http://windpoweralternators.co.uk/Alternator_Wind_Generator.php)>, alındığı tarih: 20.10.2011.

**Url-7** <<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Wind.turbine.components.and.coordinates.svg>>, alındığı tarih: 21.10.2011.

**Wu K. C, Joseph R. K., Thupili N. K.** (1993). Evaluation of classical and fuzzy logic controllers for wind turbine yaw control. In: *Proceedings of the First IEEE Regional Conference on Aerospace Control Systems*; 25-27 Mayıs, 254-258.

**WWEA** (2011). World Wind Energy Association Half-Year Report.



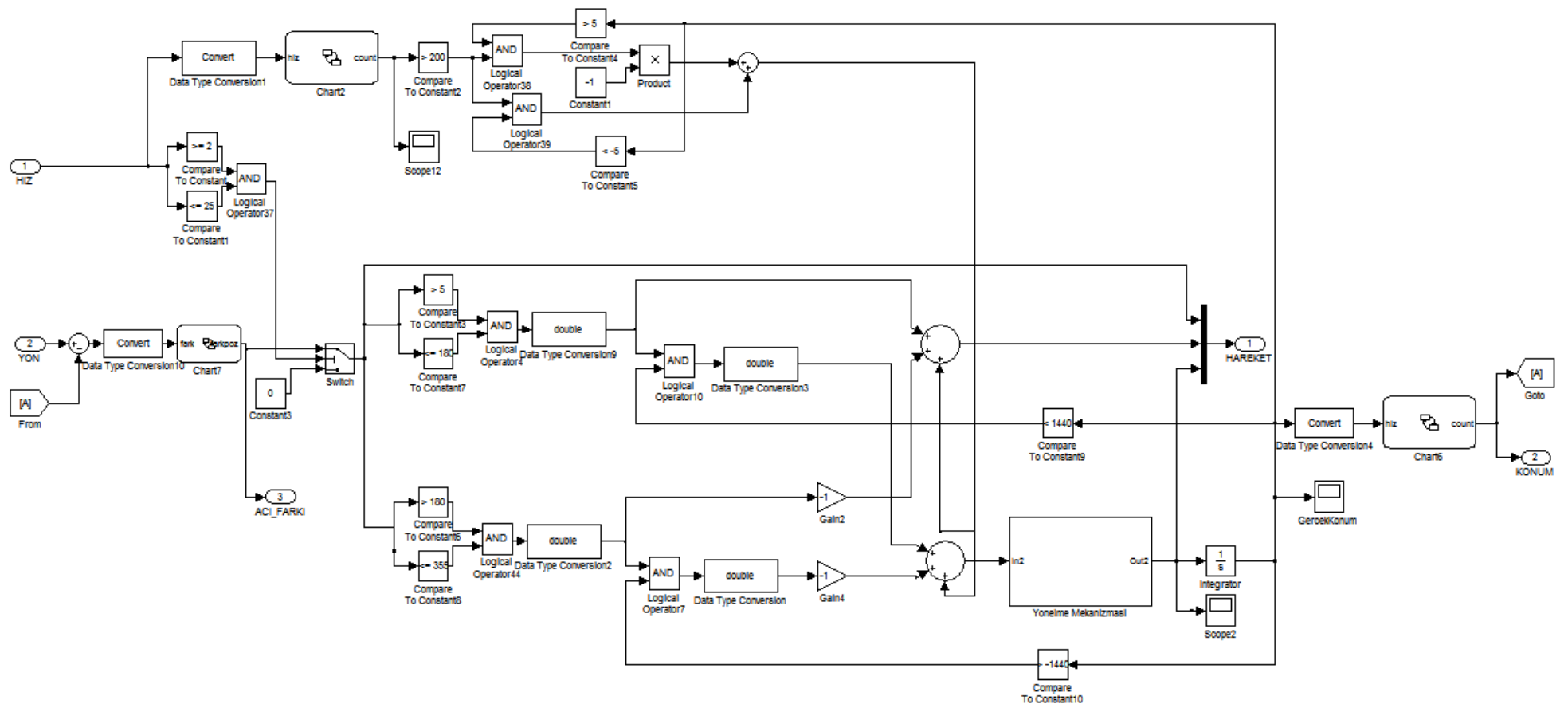
## **EKLER**

**EK A.1** : Algoritma 1'in Simulink Modeli

**EK A.2** : Algoritma 2'nin (4 Kademeli) Simulink Modeli

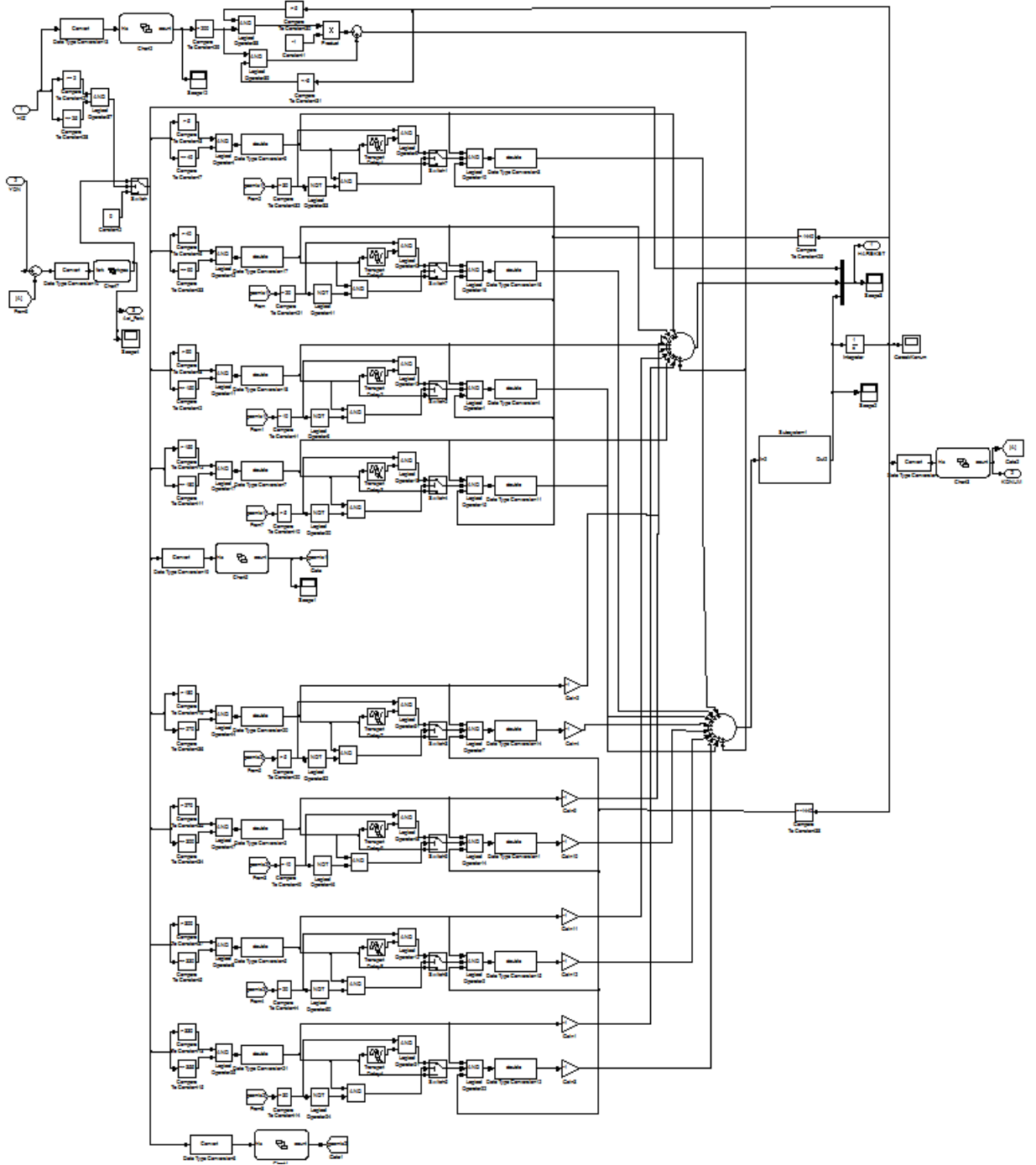
**EK A.3** : Algoritma 3'ün (Eksponansiyel Fonksiyon) Simulink Modeli

**EK A.1: Algoritma 1'in Simulink Modeli**





## EK A.2: Algoritma 2'nin (4 Kademeli) Simulink Modeli





## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad: Ayşe Gökçen KAVAZ**

**Doğum Yeri ve Tarihi: Kastamonu / 1986**

**Adres: İstanbul**

**E-Posta: agkavaz@itu.edu.tr**

**Lisans: Yeditepe Üniversitesi Sistem Mühendisliği**

**Mesleki Deneyim: İ.T.Ü Enerji Enstitüsü Araştırma Görevlisi (Aralık 2010 - halen)**