

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**İTÜ RT-1 RÜZGAR TÜRBİNİ
PERFORMANS ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Derya ALYAMAÇ**

Anabilim Dalı : Enerji Bilim ve Teknoloji

Programı : Enerji Bilim ve Teknoloji

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**İTÜ RT-1 RÜZGAR TÜRBİNİ
PERFORMANS ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Derya ALYAMAÇ**

301071034

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Haziran 2010

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU (İTÜ)

Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Önder GÜLER (İTÜ)

Yrd. Doç. Dr Güven KÖMÜRGÖZ (İTÜ)

HAZİRAN 2010

Anneannem Cemile Tuncer'e,

Babaannem Hanım Alyamaç'a

ve

Dedem Hüseyin Cahit Tuncer'e

ÖNSÖZ

Rüzgar türbinlerinin enerji üretiminde gün geçtikçe daha çok kullanılması ve büyük ölçekli türbinlerin yanısıra küçük ölçekli türbinlerin de giderek daha çok yaygınlaşması; rüzgar türbinlerinin performans analizinin de daha çok önem kazanmasına sebep olmuştur. Rüzgar türbin üreticileri tarafından verilen rüzgar hızı – güç üretimi gibi eğriler veya tablolar türbinlerin ideal şartlardaki performanslarını göstermektedir. Küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin konumlarını belirleyen parametre genellikle rüzgar şartlarının iyi olmasından çok enerji ihtiyacıdır. Bu nedenle küçük ölçekli türbinler çoğunlukla kötü rüzgar şartları bulunan konumlarda kullanılmaktadırlar. Kulelerinin kısa olması da ayrı bir dezavantaj getirmektedir. Dolayısıyla –özellikle küçük ölçekli– rüzgar türbinlerinin performans analizlerinin sahada daha da iyisi kullanılacakları bölgede yapılması önem taşımaktadır

Bu tez çalışmasında İTÜ Enerji Enstitüsünde bulunan 1.8 kW anma gücüne sahip RT-1 Rüzgar Türbininin (Skystream 3.7), Enstitü binası çatısında kurulu bulunan meteoroloji istasyonunu ve türbinin kendisinden toplanan veriler kullanılarak performans analizleri yapılmıştır.

Bu çalışmada yardımları, sabrı, bilgi ve tecrübesi ile her zaman bana yol gösteren sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Burak Barutçu'ya, her daim bana destek olan sevgili aileme ve özverili yardımlarıyla hep yanımda olan Uğur Serbes'e teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2010

Derya ALYAMAÇ
(Fizik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	xviii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tarihsel Gelişim	2
1.2 Rüzgar Türbini Türleri	8
1.2.1 Düşey eksenli türbinler.....	8
1.2.2 Yatay eksenli türbinler	9
1.3 Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Durumu	16
1.3.1 Dünya’da rüzgar enerjisinin durumu.....	16
1.3.2 Türkiye’de rüzgar enerjisinin durumu.....	17
2. METEOROLOJİ	21
2.1 Atmosfer	21
2.1.1 Basınç gradyan kuvvetleri.....	22
2.1.2 Coriolis kuvvetleri.....	22
2.1.3 Merkezci kuvvet	22
2.1.4 Sürtünme kuvveti	22
2.2 Rüzgarın Sınıflandırılması.....	23
2.2.1 Küresel rüzgarlar	23
2.2.2 Yerel rüzgarlar	25
2.2.1.1 Kara - deniz meltemleri	26
2.2.1.2 Dağ - vadi meltemleri	27
2.3 Rüzgar Üzerinde Yer Etkisi.....	28
3. ÖLÇÜM VE İSTATİSTİK	33
3.1 Rüzgar Ölçümü	33
3.2 Rüzgar İstatistiği.....	36
3.2.1 Weibull olasılık dağılım fonksiyonu	36
3.2.2 Rayleigh olasılık dağılım fonksiyonu	38
4. TÜRBİN MEKANİĞİ	41
4.1 Türbin Aerodinamiği	41
4.1.1 Momentum teorisi	43
4.2 Türbin Mekanizması.....	46
4.2.1 Büyük ölçekli türbinler.....	48
4.2.2 Orta-küçük ölçekli türbinler	49
5. PERFORMANS ANALİZİ	53
5.1 Rüzgar Türbini.....	53
5.1.1 Türbin arayüz yazılımı	55
5.2 Meteoroloji İstasyonu	55
5.2.1 Entegre sensör cihazı.....	56
5.2.2 Konsol	57
5.2.3 Meteoroloji istasyonunun arayüz programı.....	57
6. SONUÇLAR	59

6.1 Yapılan Ölçümler	59
6.1.1 Bölgenin rüzgar profili	59
6.1.2 Zamana karşılık performans grafikleri	61
6.1.3 Rüzgar hızına karşılık performans grafikleri.....	65
6.1.4 Diğer performans grafikleri	70
6.2 Sonuç ve Öneriler	73
KAYNAKLAR.....	75

KISALTMALAR

EPDK	: Enerji Piyasası Denetleme Kurumu
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
ISS	: Integrated Sensor System
SI	: International System of Units
USDA-ARS	:United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service
UV	: Ultra Violet
WWEA	: World Wind Energy Association

SEMBOLLER

α	: “Inflow” Faktör
$\Gamma(y)$: Gama Fonksiyonu
μ	: Ortalama Rüzgar Hızı
φ	: Faz açısı
ρ	: Yoğunluk
ρ_d	: Diskten Geçiş Bölgesi Yoğunluk
ρ_w	: Uzak İz Bölgesi Yoğunluk
ρ_∞	: Uzak Rüzgarüstü Bölge Yoğunluk
a	: Yüzeyle Özelliklerine Bağlı Katsayı
A	: Kesit Alanı
A_d	: Diskten Geçiş Bölgesi Kesit Alanı
A_w	: Uzak İz Bölgesi Kesit Alanı
A_∞	: Uzak Rüzgarüstü Bölge Kesit Alanı
b	: Rayleigh Dağılım Fonksiyonu Parametresi
c	: Boyut Parametresi
C_p	: Güç Katsayısı
C_T	: “Thrust” Katsayısı
F	: Kuvvet
g	: Yerçekimi İvmesi
h	: Yükseklik
h_d	: Diskten Geçiş Bölgesi İçin Yükseklik
h_w	: Uzak İz Bölgesi İçin Yükseklik
$h(v)$: Herhangi Bir Zaman Aralığındaki Rüzgar Hızı Olasılığı
h_1	: Ölçüm Yapılan Yükseklik
h_2	: Rüzgar Hızı Öğrenilmek İstenilen Yükseklik
h_∞	: Uzak Rüzgarüstü Bölgesi İçin Yükseklik
k	: Şekil Parametresi
p	: Statik Basınç Enerjisi
P_d^+	: Diskten Geçmeden Önceki Basınç
P_d^-	: Diskten Geçtikten Sonraki Basınç
U	: Akış Hızı
U_d	: Diskten Geçiş Bölgesi Akış Hızı
U_w	: Uzak İz Bölgesi Akış Hızı
U_∞	: Uzak Rüzgarüstü Bölge Akış Hızı
v	: Herhangi Bir Zaman Aralığındaki Rüzgar Hızı Olasılığı
v_d	: Diskten Geçiş Bölgesi İçin Rüzgar Hızı
v_w	: Uzak İz Bölgesi İçin Rüzgar Hızı
v_1	: Ölçüm Yapılan Yükseklikteki Rüzgar Hızı
v_2	: h_2 Yüksekliğindeki Rüzgar Hızı
v_∞	: Uzak Rüzgarüstü Bölgesi İçin Rüzgar Hızı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Değişik ölçekli türbinler için genel rotor çapı, süpürme alanı ve yaklaşık güç değerleri.	47
---	----

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Poul La Cour'un 1891 yılında Askov, Danimarka'da elektrik üreten rüzgar türbini.	3
Şekil 1.2 : Smith-Putnam rüzgar türbini.	5
Şekil 1.3 : U.Hütter W-34 rüzgar türbini.	7
Şekil 1.4 : Amerika Flowind şirketinin Darrieus rüzgar türbini.	9
Şekil 1.5 : a-Klasik yel değirmeni; b-Yavaş rüzgar türbini	10
Şekil 1.6 : a-b: Rüzgarüstü türbin; c: Rüzgaraltı türbin.	11
Şekil 1.7 : Kanat sayısına göre-uç hız oranları.	12
Şekil 1.8 : Tek kanatlı türbin.	13
Şekil 1.9 : İki kanatlı türbin.	14
Şekil 1.10: Modern 3 kanatlı türbin	15
Şekil 1.11: Dünya'da senelere göre kurulu güç artışı.	16
Şekil 1.12: Türkiye'de 2000-2009 rüzgar kurulu gücü gelişimi.	17
Şekil 2.1 : Dünya üzerinde ısı akışı.	21
Şekil 2.2 : Gradyan rüzgâr ve eğrilik yarıçapı.	23
Şekil 2.3 : Atmosferin genel sirkülasyonu ve küresel sistemler.	24
Şekil 2.4 : Küresel sirkülasyon.	24
Şekil 2.5 : Kara- deniz meltemi	26
Şekil 2.6 : Dağ - vadi meltemleri.	27
Şekil 2.7 : Sınır tabaka.	28
Şekil 2.8 : Bir momentum iz şeması.	29
Şekil 2.9 : Düz arazi koşulu gösterimi.	29
Şekil 2.10 : Doğal engellerin gösterimi.	31
Şekil 2.11 : Türbin alanının yeterliliği üzerine sırtın pozisyonu ve şeklinin etkisi. ..	32
Şekil 3.1 : Kepçe anemometre.	34
Şekil 3.2 : Weibull dağılımın farklı şekil parametreleri için grafikleri.	37
Şekil 3.3 : Weibull dağılımının farklı boyut parametreleri için grafikleri.	38
Şekil 3.4 : Rayleigh dağılımı.	39
Şekil 4.1 : Türbin aerodinamiği.	41
Şekil 4.2 : Türbülans.	42
Şekil 4.3 : Güç ve "thrust" katsayılarının α 'ya bağlı olarak değişimi.	46
Şekil 4.4 : Küçük-orta-büyük ölçekli türbin gösterimi, boy ve güç miktarlarına göre.	47
Şekil 4.5 : Büyük ölçekli bir rüzgar türbininin iç mekanizması.	48
Şekil 5.1 : İ.T.Ü RT-1 Skystream 3.7 Rüzgar Türbini.	53
Şekil 5.2 : Skystream 3.7 rüzgar türbinin üretici tarafından verilen enerji ve performans analizleri.	54
Şekil 5.3 : Rüzgar şiddeti dağılım atlası.	54
Şekil 5.4 : Birim alanda enerji üretim potansiyelinin dağılımı.	55
Şekil 5.5 : Meteoroloji istasyonu ve rüzgar türbinin konumları.	56
Şekil 5.6 : Vantage Pro-2 Meteoroloji İstasyonu Entegre Sensör Cihazı.	56
Şekil 5.7 : Vantage Pro 2 konsolu.	57

Şekil 6.1 : Zamana bağlı rüzgar şiddeti.	59
Şekil 6.2 : Rüzgar işaretinin Weibull dağılımı.	60
Şekil 6.3 : Devir hızı-zaman.	61
Şekil 6.4 : Aktif güç-zaman.	62
Şekil 6.5 : Akım-zaman.	63
Şekil 6.6 : Gerilim-zaman.	64
Şekil 6.7 : Günlük aktif güç-zaman.	64
Şekil 6.8 : Toplam aktif güç-zaman.	65
Şekil 6.9 : Rüzgar şiddeti-devir hızı.	66
Şekil 6.10 : Rüzgar şiddeti-uç hızı oranı.	67
Şekil 6.11 : Rüzgar şiddeti-güç.	67
Şekil 6.12 : Aktif güç-rüzgar şiddeti.	68
Şekil 6.13 : Akım-rüzgar şiddeti.	69
Şekil 6.14 : Güç çarpanı-rüzgar şiddeti.	70
Şekil 6.15 : Uç hızı oranı- aktif güç grafiği.	71
Şekil 6.16 : Devir hızı-aktif güç.	72
Şekil 6.17 : Devir hızı- güç çarpanı ...	73

İTÜ RT-1 RÜZGAR TÜRBİNİNİN PERFORMANS ANALİZİ

ÖZET

Rüzgar türbinlerinin enerji üretiminde gün geçtikçe daha çok kullanılması ve büyük ölçekli türbinlerin yanı sıra küçük ölçekli türbinlerin de giderek daha çok yaygınlaşması; rüzgar türbinlerinin performans analizinin de daha çok önem kazanmasına sebep olmuştur. Rüzgar türbin üreticileri tarafından verilen rüzgar hızı – güç üretimi gibi eğriler veya tablolar türbinlerin ideal şartlardaki performanslarını göstermektedir. Küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin konumlarını belirleyen parametre genellikle rüzgar şartlarının iyi olmasından çok enerji ihtiyacıdır. Bu nedenle küçük ölçekli türbinler çoğunlukla kötü rüzgar şartları bulunan konumlarda kullanılmaktadırlar. Kulelerinin kısa olması da ayrı bir dezavantaj getirmektedir. Dolayısıyla –özellikle küçük ölçekli– rüzgar türbinlerinin performans analizlerinin sahada daha da iyisi kullanılacakları bölgede yapılması önem taşımaktadır. Rüzgar türbinlerinde performans analizi için en önemli iki parametre rüzgar hızı ve türbinin ürettiği güçtür.

Bu tez çalışmasında İTÜ Enerji Enstitüsünde bulunan 1.8 kW anma gücüne sahip İTÜ RT-1 Rüzgar Türbininin (Skystream 3.7), Enstitü binası çatısında kurulu bulunan meteoroloji istasyonunun (Vantage Pro 2) verileri kullanılarak performans analizlerinin yapılması hedeflenmiştir. Rüzgar türbininin akım, gerilim, aktif güç, devir/dakika ve enerji enstitüsünde kurulu olan meteoroloji istasyonundan elde edilen rüzgar hızı, sıcaklık ve basınç verileri ile yoğunluk, rotor süpürme alanından geçen rüzgarın gücü, rüzgar türbinin görünür gücü, güç çarpanı ($\cos \phi$), uç hızı oranı hesaplanmış ve söz konusu türbinin performans analizleri yapılmıştır.

PERFORMANCE ANALYSIS OF ITU RT-1 WIND TURBINE

SUMMARY

Wind turbine performance analysis has become more important as the widespread use of small-scale wind turbine as well as large scale turbines for producing energy. Wind speed-power generation curves or tables given by the manufacturers of the wind turbines show the wind turbine performance in ideal conditions. The parameter which specifies the position of the small-scale wind turbine is generally requirement of power rather than better wind conditions. For this reason small-scale wind turbines are mostly used in poor wind conditions. Also short length of tower sets a disadvantage. Consequently, especially for small-scale wind turbines, it is important to make performance analysis of a wind turbine on field where it would be used. The most important parameters for the performance analysis of wind turbine are wind speed and the power generated by the wind turbine.

In this thesis, it is the aim of the study to make performance analysis of RT-1 Wind Turbine (Skystream 3.7) located at Energy Institute of ITU which has rated power of 1.8 kW by using the datas of meteorology station (Vantage Pro 2) also located on the roof of Energy Institute. To make the performance analysis of this wind turbine, the power of wind which passes through rotor swept area, visible power, $\cos\phi$ and tip speed ratio are calculated from current, voltage, active power, appearant power, rpm datas of wind turbine and wind speed, temperature and pressure with density datas of meteorolgy station.

1. GİRİŞ

Rüzgar enerjisinin işlevsel olarak kullanımı antik çağlara kadar dayansa da elektrik üretmek amacıyla ilk denemeler 1800'lerin sonunda 1900'lerin başında Amerika'da elektrik mühendisi Charles F. Brush tarafından yapılmıştır. Ardından Danimarka'da meteorolog Poul La Cour ile başlayan rüzgar türbinin gelişimi ile günümüzdeki rüzgar türbini konseptine ulaşılmıştır. Günümüz enerji piyasasında rüzgar enerjisi büyüme potansiyel olan ve gelişmeye halen açık bir alandır. Bugün dünyada kurulu olan rüzgar gücü potansiyeli 2009 yılı itibariyle 159,213 MW'a kadar ulaşmıştır. Bu sayının 2010 yılı yeni eklenen güçle birlikte katlanması beklenmektedir (WWEA,2010).

Dünya genelinde büyük ölçekli rüzgar türbinlerinde görülen hızlı artışın yanısıra son yıllarda küçük ölçekli türbinlerin kullanım ve üretiminde de büyük artış görülmektedir. Küçük ölçekli türbinler özellikle şebekeden uzak bölgelerde lokal enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla kullanılmaktadır. Küçük ölçekli türbinler için üreticiler tarafından verilen performans bilgileri türbinlerin sahada değil ideal şartlarda çalışma durumlarını yansıtmaktadır. Bu nedenle özellikle küçük ölçekli türbinlerin sahada performans ölçümlerinin yapılması türbinden beklenecek enerji üretiminin tahmini için gerekli bilgiyi sağlamak açısından gereklidir. Bu tez çalışmasının sonucunda da görüldüğü gibi türbinin bulunduğu mikro-konum enerji üretimi açısından çok büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada İTÜ Enerji Enstitüsünde bulunan 1.8 kW anma gücüne sahip RT-1 Rüzgar Türbininin (Skystream 3.7), Enstitü binası çatısında kurulu bulunan meteoroloji istasyonunun verileri kullanılarak performans analizlerinin yapılması hedeflenmiştir. Rüzgar Türbininin akım, gerilim, ürettiği güç, devir/dakika ve enerji enstitüsünde kurulu olan meteoroloji istasyonunun elde edilen rüzgar hızı, sıcaklık ve basınç verileri ile yoğunluk, rotor süpürme alanından geçen rüzgarın gücü, görünür gücü, güç çarpanı ($\cos \phi$) hesaplanmış ve söz konusu türbinin performans analizleri yapılmıştır.

1.1 Tarihsel Gelişim

Rüzgar enerjisinin işlevsel olarak kullanımı antik çağlara kadar dayanmaktadır. Bu dönemlerde rüzgar gücü buğday öğütmek, su pompalamak, denizcilik gibi bir çok faaliyet için önem teşkil etmekteydi (Burton ve diğ., 2001). Bilinen ilk kayıtlara göre rüzgar gücünü ilk kullanan uygarlıklardan biri buğday öğütme amaçlı olarak M.Ö 644'te düşey eksenli türbin kullanan Persler olsa da rüzgar gücününün bunun öncesinde kullanımının mevcut olduğu düşünülmektedir (Hau, 2006).

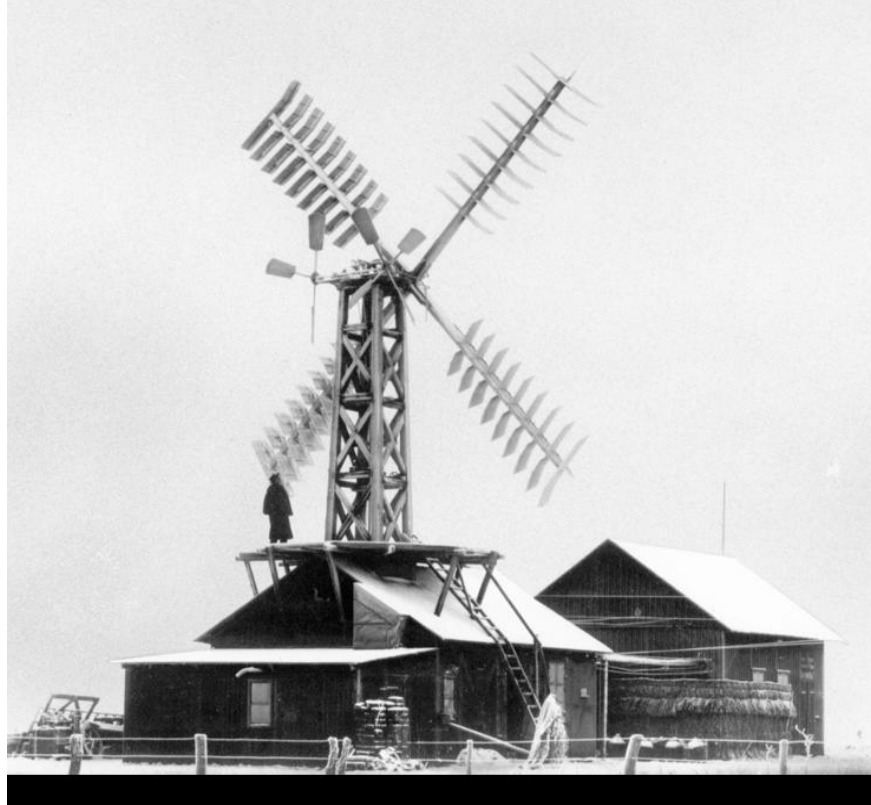
Bunun sonrasındaki zamanda rüzgar türbinlerinin Avrupa'ya 10. yüzyılda geçtiği bilinmektedir (Ültanır, 2009). İngiltere'nin ilk rüzgar türbini 1191'de kayıtlara geçmiştir (Johnson, 2001). Avrupa'da görülen rüzgar türbinleri doğudakinin aksine yatay eksenli türbinlerdir ve çoğu su pompalamak amacıyla geliştirilmiş sistemlerdir, bu türbinler kısa sürede Avrupa'nın kuzeybatısından Avrupa'nın kuzeyine ve doğusuna yayılmıştır. 13. yüzyıla gelindiğinde Almanya'da rüzgar türbinleri görmek artık mümkündür (Hau, 2006). Özellikle 16. yüzyıla gelindiğinde Hollanda'da rüzgar türbini teknolojisi gelişmiştir ve "Dutch Windmill" (Hollanda Yel Değirmeni) tabiri ile bilinen türbin kullanılmaktadır (Hau, 2006). Sabit çark yuvası (millhouse) yapısı ile sadece kulenin tepe kısmı rüzgar pervanesi (wind wheel) ile dönmektedir bu yapı uygulamaların hem boyutlarını hem de dağılımını arttırmıştır (Hau, 2006). Amerika'nın keşfi ile birlikte 1700'lerin ortaları 1800'lerin başında yeni dünyaya başlayan göçlerle Hollandalılar "Dutch windmill" türbin türünü Amerika'ya da getirmişlerdir (Johnson, 2001).

Ancak 18. yüzyılın başlangıcındaki endüstri devrimi ile beraber buhar makinalarının ortaya çıkması fosil yakıtları ön plana çıkarmış, istenildiği zaman, istenilen yerde enerji üretimi sağlanması sayesinde bu dönemde rüzgar enerjisi geri planda kalmıştır (Url-1, 2009). Rüzgar türbinlerine olan ilgi iki önemli teknolojinin ortaya çıkışı ve geliştirilmesi ile yeniden canlanmıştır: biri, iletimi kolay olan elektrik enerjisinin diğer enerji türlerine çok yönlü olarak dönüştürülebilmesi ve ikinci olarak uçak yapımındaki gelişmeler kapsamında aerodinamik mühendisliğin gelişimidir (Shepherd, 1991).

Bu döneme kadar olan zamanda rüzgar enerjisi işlevsel olarak ele alınmıştır ancak rüzgar enerjisinden elektrik üretmek amacı ile ilk denemeler 1800'lerin sonunda

1900'lerin başında Amerika'da Elektrik Mühendisi Charles F. Brush tarafından Cleveland'da 17 metre çapında 144 rotor kanadından oluşan bir türbin ile yapılmıştır (Ur1-1, 2009). Ancak elektrik enerjisi üretme amaçlı eski rüzgar türbinlerinden modern rüzgar türbinlerine gelişimin dönüm noktasını Avrupa'da Poul La Cour çalışmaları ile oluşturmuştur. La Cour geleneksel rüzgar türbinlerini bilimsel prensiplerle teknolojik temele uyarlayan ve rüzgar enerjisinden elektrik üretilmesinde öncü isimlerden biridir (Hau, 2006).

Danimarka hükümetinden aldığı destekle Poul La Cour bir dinamoyu çeviren deneysel bir rüzgar türbinini 1891'de yaptı (Şekil 1.1). Ayrıca bu deneyi ile üretilen enerjiyi depolamak amaçlı sorunu da türbinin ürettiği doğru akımı elektrolizde kullanıp, oluşan hidrojeni gazını depolayarak çözdü. (Hau, 2006)



Şekil 1.1 : Poul La Cour'un 1891 yılında Askov, Danimarka'da elektrik üreten rüzgar türbini (Hau, 2006)

Rüzgar mili (değirmeni) düşünüldüğünde, La Cour'un elektrik üreten rüzgar türbini geleneksel türbinlere benzemektedir. Bu zamanlarda 1. Dünya savaşının başlamasıyla artan benzin fiyatları rüzgar türbinlerine olan ilgiyi arttırdı. (Hau, 2006)

Bu esnada Albert Betz'in 1920'de rüzgar enerjisi dönüşümlerinde fiziksel prensipleri formüle etmesiyle kanat tasarımları değişti, Major (Binbaşı) Kurt Bilaou bu prensipleri rüzgar türbinlerine uyguladı. (Hau, 2006)

2. Dünya savaşı zamanında La Cour konseptinden farklı olarak, Smidth şirketi iki kanatlı türbinlerle piyasaya giriş yaptı. Ancak çift kanatlı rotorun dinamik karakteristikte yarattığı problemler, şirketi daha büyük üç kanatlı rotor tipine yöneltti. Böylece Danimarka konseptinin aerodinamik ve mekanik dizaynının tipik özellikleri oluşmuş oldu. (Hau, 2006)

1941'de 1250 kW'lık gücüyle, en büyük rüzgar türbini Palmer C. Putnam tarafından Rutland yakınlarındaki Grandpa's Knob'da üretildi. Putnam'ın elektrik maliyetini düşürmek amacıyla rüzgar türbinlerinde kullanılabilcek elektrik jeneratörleri üzerine ürettiği fikirleri 1939 yılında Pensilvanyalı bir şirket olan S. Mogan Smith şirketiyle paylaşmasıyla, Smith-Putnam türbin deneyleri başlamış oldu. Üretilen çift kanatlı türbinin kule yüksekliği 34 m iken rotor çapı 53 m idi (Şekil 1.2). Kanatlar paslanmaz çelik iskeletlere sahipti ve her bir kanat 7300 kg geliyordu. Türbin 13m/s üzerindeki hızlarda 1250 kW elektrik üretecek şekilde senkron bir jeneratörle çalışıyordu. 1944-1945 yılları arasında toplamda 1100 saat çalıştırılan türbin teknik olarak başarılı görülse de ekonomik olarak aynı görüş desteklenmiyordu (Johnson, 2001). Bu süre zarfında ilk kez denenen büyük bir sistemin teknik sorunlarıyla karşılaşan türbinde, sistem düzeltmeleri, maliyet çalışmaları ve daha basitleştirilmiş makine modellemesi konusundaki incelemelere devam edildi. Ancak 1945'de kanatlardan birinin hasar görmesiyle beraber türbin ekonomik olarak çıkmaza girdi ve proje durduruldu (Savino, 1974).



Şekil 1.2 : Smith-Putnam rüzgar türbini Vermont, Amerika, (Rotor çapı 53.3 m, anma gücü 1250kW)(Hau, 2006)

Gene aynı dönemde, ilk defa olarak, türbinlerde daha önceleri kullanılmakta olan “doğru akım jeneratörleri” yerine, elektrik şebekeleri için bağlantı uyumu olan “alternatif akım jeneratörleri” kullanılmaya başlanmıştır. Günümüz modern rüzgar türbinlerinin öncüsü olan tasarım ise, 1957 yılında La Cour’un öğrencisi olan Mühendis Johannes Juul tarafından yapılmıştır (Url-1).

Smith-Putnam rüzgar türbininin denemeleri Percy H. Thomas’ı rüzgar enerjisinde kullanılan elektrik jeneratörleri konusunda 10 yıllık bir çalışmaya teşvik etti. (Johnson, 2001). 1972 yılında federal enerji komisyonu tarafından elektrik enerjisi üreten büyük bir rüzgar türbin tesisi konusunda araştırmayla görevlendirilen Thomas, bu amaçla bir proje geliştirdi. Projedeki temel amaçları, bir enerji kaynağı olarak rüzgarın karakteristiğinin belirlenmesi ve hali hazırda kullanılan elektrik güç santralleri (hidroelektrik, buhar türbini, vs) ile birlikte rüzgar enerjisinin kullanılmasının fizibilite çalışmalarını yapmaktı. Bu amaçları gerçekleştirmek üzere öncelikle, Amerika rüzgar verilerini inceledi, çalışan bir rüzgar türbinin ön dizaynını, varolan elektrik şebekesiyle çalışabilecek şekilde geliştirerek, tesisin performansını ve maliyetini, dolayısıyla elektrik üreten bir rüzgar enerjisi sisteminin ekonomik ve

işletme fizibilite çalışmasını yaptı, elektrik üreten rüzgar enerjisi sistemlerinin bazı detaylarını varolan hidrolik ve buhar türbini ile elektrik üreten tesislerle pratik olarak nasıl kullanılabileceğini inceledi (Savino, 1974). Thomas proje kapsamında biri 6500 kW'lık diğeri 7500 kW'lık olmak üzere iki büyük rüzgar türbini tasarladı. Bunlar arasında 6500 kW'lık türbinin kulesi 145 m yüksekliğinde ve rotor 61 m çapında olacaktı. Rotor bir doğru akım jeneratörünü çeviriyordu ve bu doğru akım bir DC/AC çeviriciye aktararak şebekeye bağlanıyordu. Thomas'ın türbininin toplam maliyeti kurulu kW başına 75 Dolar olması federal enerji komisyonunun desteğini alabilecek nitelikte görünse de, Kore savaşını başlamasıyla proje iptal edildi. Böylece Amerika'nın bir 20 yıl sonraki petrol krizine kadar rüzgar enerjisi araştırmaları da sonlanmış oldu. (Johnson,2001)

Aynı zamanlarda Dr. Ulric Hütter Almaya'da 100 kW'lık bir türbin tasarlamıştır (Şekil 1.3). Türbin anma gücüne 8 m/s gibi önceki türbinlerden daha düşük bir hızda ulaşmaktaydı. Hütterin türbin dizaynının özelliği hafif olmasıydı, kanatlar 34 m çapında ve fiberglastan üretilmişlerdi. Hütter'in tasarladığı bu türbin 11 sene boyunca 4000 saatten fazla işletmede kaldı. Hütter'in bu çalışması büyük çaplı rüzgar türbinlerinin gelişiminde önemli bir rol oynadı. (Johnson,2001).



Şekil 1.3 : U. Hütter W-34 rüzgar türbini Stötten, Almanya (Rotor çapı 34 m, anma gücü 100kW) (Hau, 2006)

Ancak ekonomik sebeplerden ötürü rüzgar enerjisinin kullanımı 1970'lerde baş gösteren petrol krizine kadar tekrar arka planda kalmıştır. Bu dönemin ardından rüzgar enerjisi teknolojileri konusundaki çalışmalar tekrar hız kazanmış, rüzgar potansiyeli araştırmaları başlamış ve bu araştırmalara dayanan rüzgar çiftlikleri kurulmaya başlamıştır (Durak, 2000).

Bundan sonraki dönemde rüzgar enerjisi teknolojisinin önem kazanmasında beş önemli faktör göz önünde bulundurulacak olursa bunlardan birincisi enerji ihtiyacı ve bu ihtiyacı hali hazırda karşılamak üzere kullanılmakta olan fosil yakıtların yan etkileri (CO₂ emisyonu vs) ve bu kaynakların sonlu olması, ikincisi rüzgar potansiyelinin kullanılabilir enerji üretimine elverişli olması, üçüncü olarak teknolojik kapasitenin var olması ve bu üçüne ek olarak rüzgar kullanımı için yeni bir görüş oluşması ve politik açıdan desteklenmesidir. (Manwell ve diğ., 2002)

1.2 Rüzgar Türbini Türleri

Genel olarak türbinler dönme eksenlerinin yeryüzüne göre konumları açısından düşey ve yatay eksenli olmak üzere iki kısımda incelenirler.

1.2.1 Düşey eksenli türbinler

Düşey eksenli rotorlar sapma sistemine ihtiyaç duymaması, kanatların sabit bir profile sahip olmasının, üretimi kolaylaştırması ve ucuzlaştırması, redüktörün yere yakın ve sabit bir kuleye koyulabilmesi açısından avantajlıdır. Ancak, dönüşten kaynaklanan (cyclic) aerodinamik yüklerin genelde alüminyumdan üretilmiş düşey eksenli türbinin kanatlarında yorulmaya sebep olması, yapı ile kontrol arasındaki uyumsuzluklar açısından dezavantajlıdır (Barutçu, 2008)

Düşey eksenli rüzgar türbinleri arasında en çok bilinen tür Darrieus türbinleridir (Şekil 1.4). Bu türbin Gerorges Darrieus tarafından 1931 yılında tasarlanmıştır. Jeneratör, dişli kutusu gibi ağır elemanların yerde olması, rüzgar yönüne göre yön verme gereksiniminin olmaması bu türbinin olumlu yanlarını oluştururken, aynı zamanda kanatların da yere yakın bölgede olması sınır tabaka etkisiyle düşük rüzgar hızlarıyla karşılaşması, veriminin düşük olması ve makinenin dışarıdan bir kuvvetle başlatma gereksinimi bu türbinin olumsuz yanlarını oluşturur (Hau, 2006).



Şekil 1.4 : Amerika Flowind şirketinin Darrieus rüzgar türbini (Rotor çapı 19 m, anma gücü 170 kW) (Hau,2006)

1.2.2 Yatay eksenli türbinler

Elektrik üretimi için verimi daha yüksek olan yatay eksenli türbinler tercih edilmektedir. Yatay eksenli rotorlar, rotor katılığının (katılık: kanat alanının rotor süpürme alanına oranı) düşük olması sayesinde birim kW başına maliyeti düşürmesi, rotor tarama alanının ortalama yüksekliğinin yerden daha yüksek olmasıyla birim kW başına üretimi arttırması açısından avantajlıdır. (Barutçu, 2008)

Yatay eksenli türbinler dönüş hızlarına göre, klasik yel değirmenleri, yavaş rüzgar türbinleri ve hızlı rüzgar türbinleri olarak gruplandırılır (Şekil 1.5: a-b).

Klasik yel değirmenleri dört veya daha fazla kanattan oluşan dakikada 10-40 devir yapabilen türbinlerken, yavaş rüzgar türbinleri 12-24 kanattan oluşan genelde su pompalamak amacıyla kullanılan ve 2-3 m/sn gibi hızlarda çalışabilen yüksek torka sahip türbinlerdir (Şekil 1.5: a).

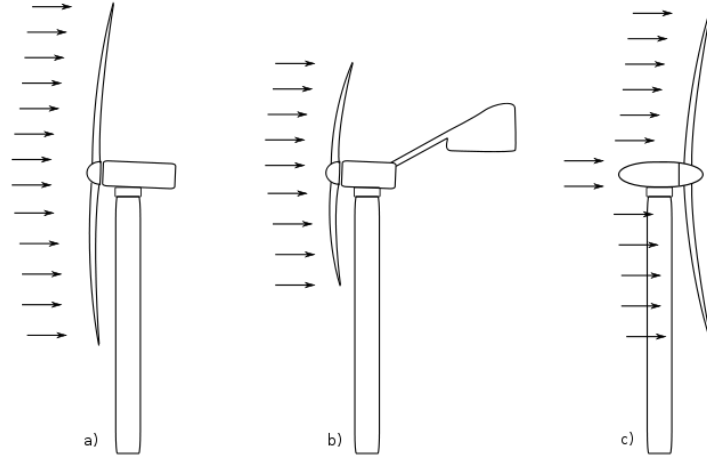


Şekil 1.5 : a-Klasik yel değirmeni(Hau, 2006); b-Yavaş rüzgar türbini (Hau, 2006)

Yüksek hızlı türbinler 2-4 kanattan oluşan, düşük torka sahip, hafif türbinlerdir. Yüksek hızlı türbinler minimum 5 m/sn gibi bir hızla çalışmaya başlasalar da özel donanımla bu hız düşürülebilir. Bu türbinler elektrik üretimi için uygundur. Türbin ile jeneratör arasındaki hız koordinasyonunu sağlamak amacıyla türbin ile jeneratör arasında redüktör yerleştirilir. (Url-2)

Yüksek hızlı türbinler rotorlarının rüzgara konumuna göre rüzgar üstü ve rüzgar altı türbinler olarak iki kısma ayrılır (Şekil 1.6). Rüzgar üstü türbinlerde kanatlar nasele'nin (nacelle box) önündedir, karşı taraftan gelen rüzgar önce kanatlara ardından nasele doğru eser, rüzgar altı türbinlerde ise kanatlar nasele'nin arkasında kalır bu yüzden gelen rüzgar naselden sonra kanatlara geçer.

Aktif sapma kullanan türbinler rüzgar üstü rotora sahipken, rüzgar altı rotor türbinin serbest saptmaya olanak tanır. Bu yüzden kanatlar genelde rüzgar altı konuma yerleştirilir. Ancak kule rüzgaraltı konumdayken, bu yönde bir iz oluşturur ve kanat da her seferinde bu izden geçmektedir. İz kaynaklı periyodik yükler kanatlarda yorulmaya sebep olur ve bu üretilmekte olan elektrik gücünü de etkiler. İzin bu etkisi özel kule tasarımı ile azaltılabilir. Bu iz aynı zamanda rüzgaraltı türbinlerin kule gölgelemesi sebebiyle rüzgarüstü türbinlerden daha fazla gürültülü çıkarmasına sebep olur. (Barutçu, 2008, Manwell ve diğ., 2002)

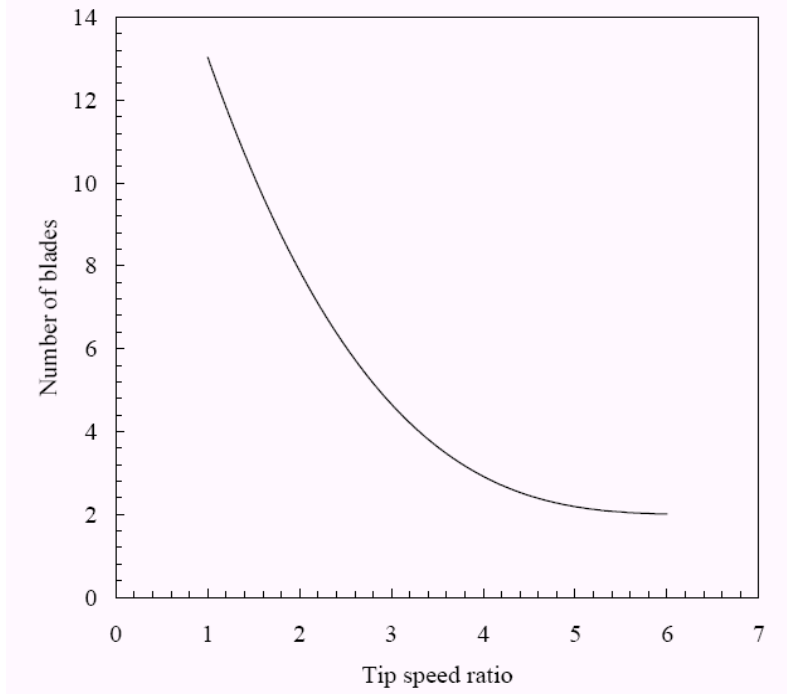


Şekil 1.6 : a-b: Rüzgarüstü türbin; c: Rüzgaraltı türbin (Url-3)

Rüzgar üstü çalışan türbinlerde kanat üzerinde oluşan kule gölgelemesi görülmez, bu sayede gürültü oranı daha az, kanatlardaki yorulma daha az ve üretilen güç daha düzgün bir profildedir (Patel, 1999)

Birbirinden farklı kanat sayısına sahip türbinler karşılaştırılırken performans, yükler, rotor maliyeti, redüktör maliyetine etkisi, gürültü ve görüntü gibi faktörler göz önünde bulundurulur. Kanat sayısının açılma hızı ve katılık üzerine etkisi önemlidir. (Burton ve diğ., 2001)

Kanat sayısının az olması dönüş hızını artırır. Uç hızı oranını arttırmak için kanat sayısı azaltılmalıdır (Şekil 1.7).



Şekil 1.7 : Kanat sayısına göre-uç hızı oranları

Düşük katılıkta kanat boyutlarının küçük olması sebebiyle kanatların yeterli güç ve sertlikte dizayn edilmesi de zorlaşır. Verilen katılıkta rotor süpürme alanını birkaç kanada bölmek, herbir kanadın kesit alanını büyüklüğünü ve gücünü artırır. Bu yüzden modern rüzgar türbinlerinin rotor kanatları 2 veya 3 kanatlıdır (Divone, 1994).

Tek kanatlı türbin rotorlarının güç katsayıları iki ve üç kanatlılara oranla %5 ila %10 oranında daha azdır. Yatay eksenli türbinlerin yapısal dinamik yapısal karakterlerini analiz etmek oldukça zor olduğundan, deneysel çalışmalarda kanat sayıları bire düşürülür. Tek kanatlı rotor araştırmaları Almanya, İtalya ve Amerika gibi bazı ülkelerde yapılmış ve yürütülen çalışmalarda asimetric yüklenmeye bağlı dinamik yapısal sorunların tek kanat konsepti için dezavantaj oluşturduğu gözlemlenmiştir. (Divone, 1994).

Tek kanatlı rotorlar yüksek uç hız oranı ve düşük maliyetleri ile avantajlı olmakla beraber tek kanadın ağırlığı bir karşı ağırlık ile dengelenmelidir (Şekil 1.8). (Barutçu, 2008)



Şekil 1.8 : Tek kanatlı türbin (Hau, 2006)

Tek kanatlı türbinler ekonomik ve hafif olmakla beraber yüksek rotasyonel hızda çalışırlar, ancak gürültü ve görüntü etkisi sebebiyle bu türbin daha az tercih edilmektedir. Ayrıca tek kanatlı olan bu türbinlerin kanat dizaynı daha zordur. (Durak ve Özer, 2007)

Büyük çaplı iki kanatlı rüzgar türbinlerinde yüksek uç hızı oranı, düşük şaft hızı, yüksek elektrik gücü için gereksinim, yüksek tork ve toplam kuruluma karşı düşük rotor maliyeti açısından önemlidir. Bununla birlikte büyük çapta türbin üretimi yapan üreticiler daha çok mühendislik, analitik serbestliğe ve yapısal dinamik sorunlarını çözmek için daha büyük bütçeye ihtiyaç duymaktadırlar. (Divone, 1994).

İki kanatlı türbinler de tek kanatlı türbinler gibi ekonomik ve hafif olmakla beraber tek kanatlı türbinlerin uygulama ve tasarımdaki dezavantajlarına sahiptir (Şekil 1.9). (Durak ve Özer, 2007)



Şekil 1.9 : İki kanatlı türbin (Hau, 2006)

İki kanatlı türbinin eylemsizlik momenti düşey konumdayken yatay konuma göre daha düşüktür. Bu yüzden birçok iki kanatlı türbinde “teetering” rotor kullanılır. (Barutçu, 2008)

Az sayıda kanada sahip rotorlar daha hızlı dönebilir ve bununla birlikte fiziksel kanat alanı daha azdır. Teorik olarak kanat sayısı arttıkça güç katsayısı da artmalıdır. Ancak amerikan tipi rüzgar türbinlerinde gözlemlendiği gibi fazla kanat sayısı güç katsayısını düşürmüştür. Rotorun katılığı yüksek olduğunda aerodinamik akış şartları da daha karmaşık ve teorik modellerle açıklanamaz hale gelir. (Hau, 2006)

Ayrıca uç hız oranı fonksiyonunun güç katsayısı eğrisi varyasyonunda artan kanat sayısına göre, optimum uç hız oranı için kanat sayısı azalır. Örneğin üç kanatlı rotor için bu değer 7 ila 8 arasında değişirken, iki kanatlı türbin için bu değer 10, tek kanatlı türbin için 15'tir. Bu yüzden güç katsayısının rotor kanat sayısına bağımlılığı

göz önüne alındığında düşük sayıda kanat tercih edilmesinin sebebi de anlaşılmış olur. (Hau, 2006)

Kanat sayısındaki artış rotorun tercih edilmeyen dinamik davranışlar sergilemesine sebep olabilir. Aerodinamik olarak asimetrik olan rotorun yarattığı fazla dinamik yükler, türbinin diğer elemanlarına ek komplekslik kazandırır. Ayrıca iki ve tek kanatlı rotorların yüksek uç hızı oranlarından kaynaklanan yüksek ses de tercih edilen bir durum değildir. Ayrıca görsel olarak da rahatsız edici bulunmaktadır. (Hau, 2006)

Bütün bunlar ticari bazda üretilen rüzgar türbinlerinin üç kanatlı tercih edilmesine sebep olur. (Hau, 2006)

Elektrik üretimi için kullanılan türbinlerin çoğu üç kanatlıdır (Şekil 1.10). Bu tip türbinler sabit sapma açısına göre polar eylemsizlik momenti yönünden avantajlıdır ve rotorun azimutal pozisyonundan bağımsızdır. Üç kanattan fazlası maliyeti arttırdığı için tercih edilmez (Barutçu, 2008)

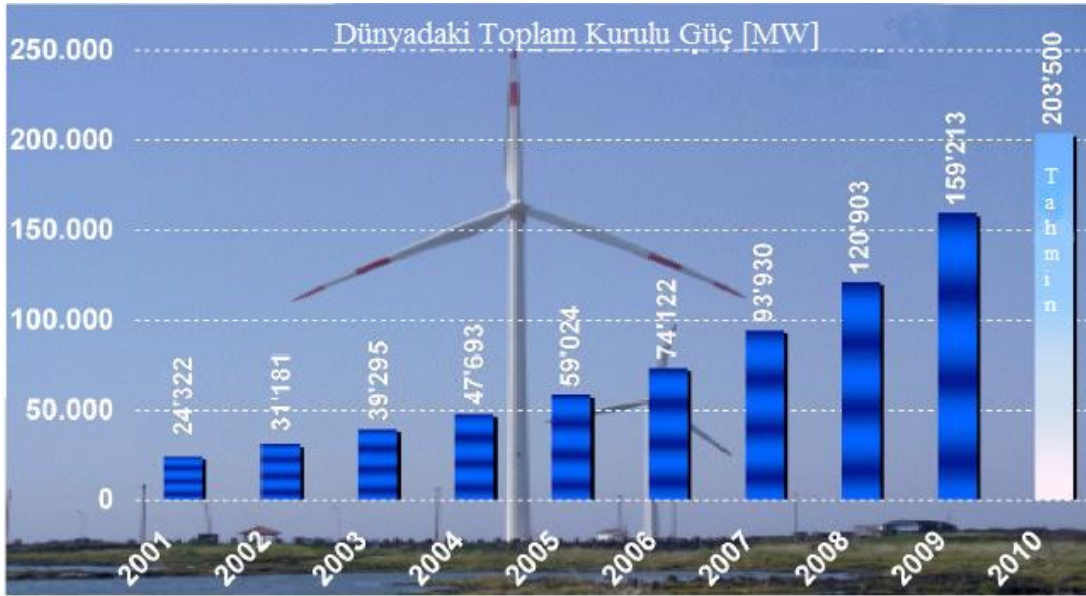


Şekil 1.10 : Modern 3 kanatlı türbin (Hau,2006)

1.3 Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Durumu

1.3.1 Dünya’da rüzgar enerjisinin durumu

WWEA’nın 2009 rüzgar enerjisi raporuna göre bu sene eklenen 38,312 MW güç ile rüzgar enerjisi toplam kurulu gücü 159,213 MW’a ulaşmıştır. Bu artış ile birlikte %31.7’lik büyüme oranı ile 2001’den beri en yüksek büyüme oranını sergilemiştir. 2009’un sonunda kurulan bütün rüzgar türbinleri ile beraber 340 TWh üretim yapılabilmektedir, bu rakam dünyanın yedinci büyük ekonomisine sahip İtalya’nın toplam elektrik talebine ve küresel elektririk tüketiminin %2’sine denk gelmektedir. Rüzgar sektörünün 2009 yılı itibariyle toplam cirosu 50 milyar Euro’yu bulmuştur. Sektörün 2009 yılında 550,000 kişiye sağladığı istahdamın 2012 ile birlikte bir milyon kişiye iş imkanı sağlaması beklenmektedir. Dünyadaki toplam kurulu güç artışları senelere göre Şekil 1.11’de görülmektedir. (WWEA, 2010)



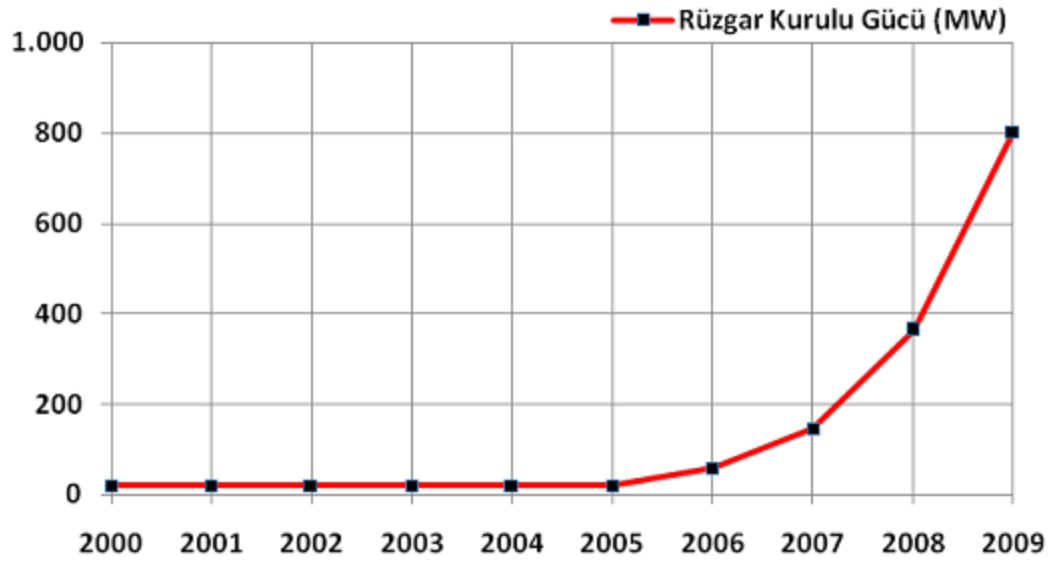
Şekil 1.11 : Dünya’da senelere göre kurulu güç artışı (WWEA, 2010)

Uluslararası rüzgar endüstrisinde ise Çin liderliğini devam ettirerek yeni türbinlerin en büyük pazarı olarak bir yıl içinde 13,800 MW’lık kurulum yapmıştır. Toplam kurulu güçte Amerika Birleşik Devletleri birinciliği devam ettirirken, Çin aynı alanda ufak bir farkla Almanya’yı geçerek ikinci olmuştur. Asya yeni kurulumlarda en büyük paya sahip olarak %40.4’lük bir pay alırken Kuzey Amerika %28.4 ile 2.sırayı almış ve Avrupa %27.3 ile üçüncü sıraya düşmüştür. Latin Amerika, Brezilya ve

Meksika'nın atılımlarıyla umut vaadedici bir büyüme ile kurulu gücünü ikiye katlanmıştır. 2010 yılı ile birlikte toplam kapasitenin 200,000 MW, gelişmeler ve geliştirilen politikalarla birlikte 2020 yılında küresel kurulu gücün 1,900,000 MW olması beklenmektedir. (WWEA, 2010)

1.3.2 Türkiye'de rüzgar enerjisinin durumu

1998'de otoprodüktör olarak İzmir, Çemede bölgesinde 1.74 MW kurulu güç ile ilk rüzgar enerjisi santralının kurulmasıyla Türkiye'de rüzgar sektörüne giriş yapılmıştır. Bundan sonra 2006 yılıyla birlikte rüzgar sektöründe gelişmeler başlamıştır. 2000 yılından 2009 yılına kadar Türkiye'de rüzgar enerjisi kurulu gücü 800 MW'a ulaşmıştır (ETKB, 2010). Yıllık gelişimine göre kurulu güç artışı Şekil 1.12'de verilmiştir. Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından bildirilen Türkiye'de kurulma imkanı olan toplam rüzgar enerjisi santrali kurulu gücü 131,756.40 MW'dır.



Şekil 1.12 : Türkiye'de 2000-2009 rüzgar kurulu gücü gelişimi (ETKB, 2010).

Türkiye’de bu kapsamda çıkarılmış kanunlardan; “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği” gereğince “Bir bağlantı noktasında, sistemin kısa devre gücünün en fazla %5’i kadar kurulu güçte rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi bağlantısına izin verilir.” (T.C. Resmi Gazete S. 25639, 2004; T.C. Resmi Gazete S. 27007, 2008) denilerek tesisin gücü kısa devre gücünün %5’i ile sınırlandırılmıştır.

Ayrıca 18/4/2007 tarihli ve 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanununun 17. Maddesiyle, 10/5/2005 tarihli ve 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun 6. maddesinde yapılan değişiklikle yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen elektrik enerjisinin satın alınması için uygulanacak fiyat “c) Bu Kanun kapsamında satın alınacak elektrik enerjisi için uygulanacak fiyat; her yıl için, EPDK’nın belirlediği bir önceki yıla ait Türkiye ortalama elektrik toptan satış fiyatıdır. (T.C Resmi Gazete S.25819, 2005, T.C. Resmî Gazete, S. 26510, 2007) Ancak uygulanacak bu fiyat 5 Euro Cent/kWh karşılığı Türk Lirasından az, 5.5 Euro Cent/kWh karşılığı Türk Lirasından fazla olamaz. Ancak 5.5 Euro Cent/kWh sınırının üzerinde serbest piyasada satış imkânı bulan yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı lisans sahibi tüzel kişiler bu imkândan yararlanırlar.” (T.C. Resmî Gazete, S. 26510, 2007) ile belirlenmiş, aynı yasanın 8. Maddesi, 5627 sayılı kanununun 18. Maddesi ile değiştirilerek (T.C. Resmî Gazete, S. 26510, 2007) rüzgar enerjisi kaynaklı elektrik üreten santrallere alım garantisi getirilmiş, teşvik amaçlı olarak kurulum için arazi ve santral sahası temininde kolaylık sağlanmıştır.

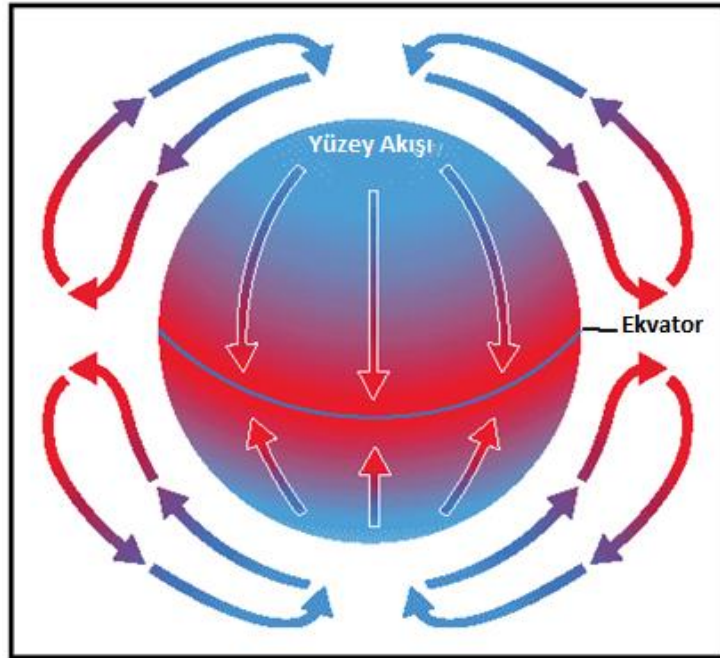
Bununla birlikte 2009 yılında Türkiye, küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda uluslararası tek anlaşma olan Kyoto protokolüne imza atmasıyla, atmosfere salınan sera gazı miktarının %5’e çekilmesini, endüstri motorlu taşıt ve ısıtmadan kaynaklanan sera gazını azaltamayı amaçlayan mevzuatların düzenlenmesini, daha az enerjiyle ısınma, araçların daha uzun yol katetmesi, daha az enerji tüketen teknoloji sistemelerinin endüstride kullanılmasının sağlanması, atmosfere bırakılan metan ve karbondioksit oranının düşürülmesi için alternatif enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesi, fazla yakıt tüketen ve fazla karbon üreten fazla vergi alınması gibi şartları da uygulayacağını kabul etmiştir. (Url- 4, T.C Resmi Gazete S.27227, 2009)

Aynı zamanda WWEA 2009 raporuna göre Türkiye Rüzgar sektöründe büyüme oranı olarak %132 ile ikinci en yüksek oranda büyümeyi göstermiştir. Raporda Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Anlaşması'na uyum sağlamak amacıyla yaptığı çalışmalarla Türkiye'nin yenilenebilir enerji alanında, hızla dünya çapında bir gelişme göstereceği belirtilmektedir.

2. METEOROLOJİ

2.1 Atmosfer

Atmosferi dev bir ısı makinası olarak ele alırsak, atmosfer sıcak rezervuar olan güneşten aldığı ısıyı daha düşük sıcaklıktaki rezervuar olan uzaya aktarır. Süreç içinde, iş atmosferdeki gazlar üzerinden yeryüzü-atmosfer sınırında yapılır. Hava basıncının geçici olarak ortalama değerden düşük ya da yüksek olacağı yerler bulunur, hava basıncındaki bu fark atmosferik gazların diğer adıyla rüzgarın yüksek basınç alanlarından düşük basınç alanlarına doğru akmasına sebep olur ki genel olarak bu alanların çapı yüzlerce kilometre olabilir (Şekil 2.1). Güneş kaynaklı radyasyon, su buharı, bulut kaplaması (cover) ve yüzey özellikleri gibi özelliklerin hepsi atmosfer şartlarını belirlemede önemli rol oynar (Johnson, 2001).



Şekil 2.1 : Dünya üzerinde ısı akışı (Url-5)

Rüzgarın temel kaynağı güneş olmakla beraber, rüzgar oluşumuna sebep olan temel atmosferik kuvvetler; basınç gradyan kuvvetleri, dünyanın dönmesinden kaynaklanan

Coriolis kuvvetleri, merkezci kuvvet (kaynakta merkezkaç olarak ifade edilmiş), dünya yüzeyindeki sürtünme kuvvetleridir (Donn, 1975).

2.1.1 Basınç gradyan kuvvetleri

Basıncın belirli bir mesafedeki değişimine basınç gradyanı denmektedir. Bu basınç farklılığının hava kütlesi üzerinde oluşturduğu kuvvet basınç gradyan kuvvetidir ve yönü basıncın yüksek olduğu yerden düşük olduğu yere doğrudur. Basınç gradyanının değeri arttıkça buna bağlı olarak basınç gradyanının kuvveti ve dolayısıyla rüzgar şiddeti de artacaktır (Şekil 2.2). (Johnson, 2001)

2.1.2 Coriolis kuvvetleri

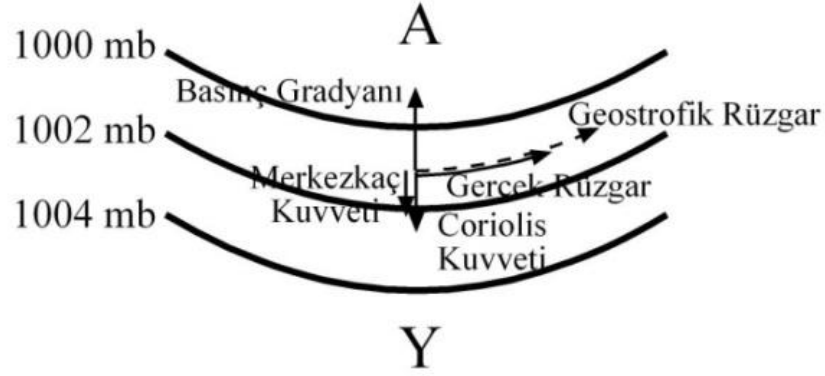
Coriolis kuvvetleri, dünyanın dönüş hareketinin hareket halindeki hava kütleleri üzerinde oluşturduğu bir kuvvettir. Bu kuvvetin büyüklüğü rüzgarın hızı, bulunulan enlem ve dünyanın açısal hızına bağlı olarak değişir. (Johnson, 2001)

2.1.3 Merkezci kuvvet

Dönme hareketi yapan hava kütlelerinde, rüzgarın yönüne ve şiddetine bağlı olarak oluşan kuvvettir. Merkezdeki izobar eğrileri daireselliğine bağlı olarak merkezci kuvvet etkisi de o kadar etkili olmaktadır. (Johnson, 2001)

2.1.4 Sürtünme kuvveti

Sürtünme kuvveti tanımı gereği hareketin yönüne zıt yönde etkiyen bir kuvvettir yüzden hareket halindeki hava kütlelerinin hızını düşürücü bir etki yaratır. Sürtünme kuvvetinin bu etkisi yeryüzü koşullarına bağlıdır. Deniz üzerinde esen rüzgara etkiyensürtünme kuvveti daha azken, kara üzerinde esen rüzgara etkiyen sürtünme kuvveti daha fazla olmaktadır. Ayrıca yeryünden uzaklaştıkça yeryüzünün rüzgar üzerindeki sürtünme etkisi azalmaktadır. (Johnson, 2001)



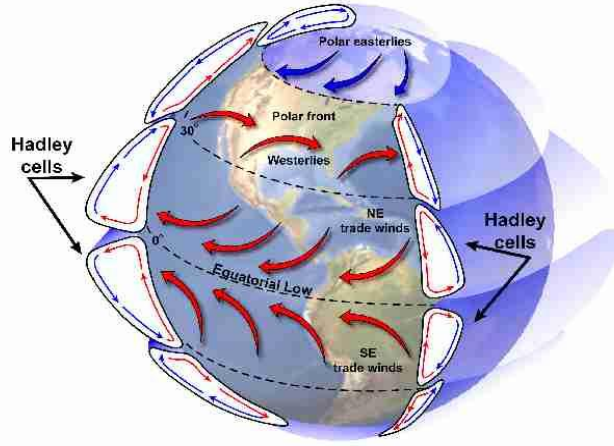
Şekil 2.2 : Gradyan rüzgâr ve eğrilik yarıçapı

2.2 Rüzgarın Sınıflandırılması

Rüzgar etki alanları göz önünde bulundurularak iki temel kısımda ele alınabilir. Bunlar küresel rüzgar sistemleri ve yerel rüzgarlardır.

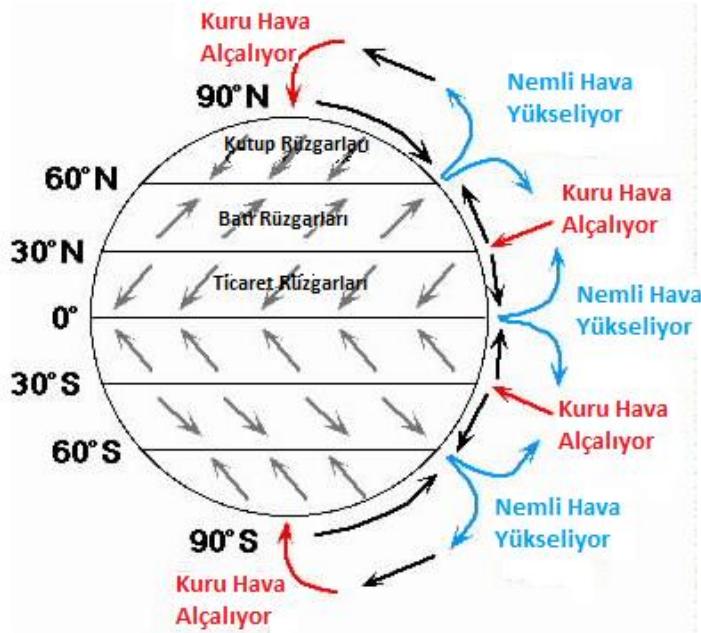
2.2.1 Küresel rüzgarlar

Yeryüzündeki basınç farklılıkları rüzgar oluşumunun ana sebebidir. Bu basınç farklılıklarını oluşturan güneş radyasyonu yeryüzünde en çok ekvatorunda en az kutuplarda emilir. Bu emilim farkının yarattığı ısı değişimi atmosferin troposfer tabakasında küresel ölçekte sirkülasyona sebep olur. Bu sirkülasyona “Atmosferin Genel Sirkülasyonu” adı verilir (Şekil 2.3). (Durak ve Özer, 2007). Bu tanım atmosferde enerji dengesini sağlayan bütün hava hareketlerini resmetmek için kullanılır (Johnson, 2001).



Şekil 2.3 : Atmosferin genel sirkülasyonu ve küresel sistemler (Url-6)

Gelen güneş radyasyonunun ekvatorunda fazla, kutuplarda az olması genel olarak ekvatorunda bir enerji kazancı, kutuplarda ise enerji kaybına sebep olur. Atmosfer bu farkı dengelemek amacıyla ekvatordaki sıcak hava kümesini kutuplara, kutuplardaki soğuk hava kümesini ise ekvatora aktarır. Bu şekilde oluşan genel sirkülasyon, dünyanın kuşakları arasında küresel rüzgara (hava hareketlerine) sebep olur (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Küresel sirkülasyon

Ekvatorial bölgelerde yılın hemen hemen her zamanı güneş ışınlarının dik veya dike yakın açılarla gelmesi ve gün boyu uzunluğunun aynı kalmasıyla sürekli bir ısınma söz konusudur. Bu ısınma topraktan hava kütlelerine geçer, ısınan hava kütleleri genişler ve yoğunluğu azalır ve yükselmeye başlar. Tropopoz seviyesine kadar yükselen hava kütlesi burada yayılır ve kutuplara doğru ilerler. 25-35 kuzey-güney enlemlerine geldiğinde burada sıkışan hava kütlesi, radyatif soğumanın ve sıkışmanın etkisiyle alt tropikal bölgelere ilerler. Coriolis kuvvetinin etkisiyle kutba doğru yönelmekte olan bu hava kütlesi kuzey yarımkürede sağa, güney yarımkürede sola sapar. Tropikal bölgeden kutup bölgelerine doğru ilerlerken radyasyon ile soğuyarak yoğunlaşır ve orta enlemlerde geldiğinde toplanma (konverjans) oluşturur. Yukarı kesimlerde oluşan toplanma, aşağı kesimlerde ayrılma (diverjans) oluşumunu tetikler ve böylece yüksek basınç alanlarının oluşmasını sağlar. Bu yüzden 30 enlemleri subtropikal yüksek basınç kuşağı bölgesidir. Yukarı kesimlerde toplanma yapan bu hava kütlesi aşağı inerek daha sıcak ve kuru bir hava külesine dönüşür. Bunun sonucu olarak bu enlemlerde açık ve sıcak yeryüzeyi meydana gelir. Deniz kesimleri için bu enlemlere at enlemleri denir. 30 enlemlerinde hava külesinin bir kısmı da kutuplara yönelimine devam ederek kutuplardan gelen soğuk hava kütlesi ile karşılaşır ve farklı fiziksel özelliklere sahip olduklarından karışmayıp bir sınır oluştururlar. Burada Coriolis etkisiyle 30N ve 60N enlemlerinde sağa sapma ile batılı rüzgarlar oluşur (Durak ve Özer, 2007). Kutuplarda ısı kaybı nedeniyle yoğunluğu artan oldukça soğuk olan hava kütlesi yeryüzüne doğru iner ve yüksek basınç alanları oluşturur. Ekvatora doğru hareket etmekte olan bu soğuk hava kütlesi 60N-S enlemlerinde batılı rüzgarlarla karşılaşarak subpolar alçak basınç kuşağını meydana getirir. Bu şekilde küresel rüzgar ve basınç kuşakları üç hücreli modelle tanımlanmış olur (Johnson, 2001). Bilinen bazı küresel rüzgar akımları; yüksek basınç kuşağı olan subtropikal tropikal arasında ekvator yönelimli ticari rüzgarlar olarak adlandırılan alizeler, 30.enlemlerdeki yüksek basınç alanından 60.enlemlerdeki alçak basınç alanına doğru esen ve değişken bir karakter gösteren batı rüzgarları, kutuplardaki yüksek basınç alanından 60. Enlemlerdeki alçak basınç alanına doğru yönelmiş soğuk kutup rüzgarlarıdır.

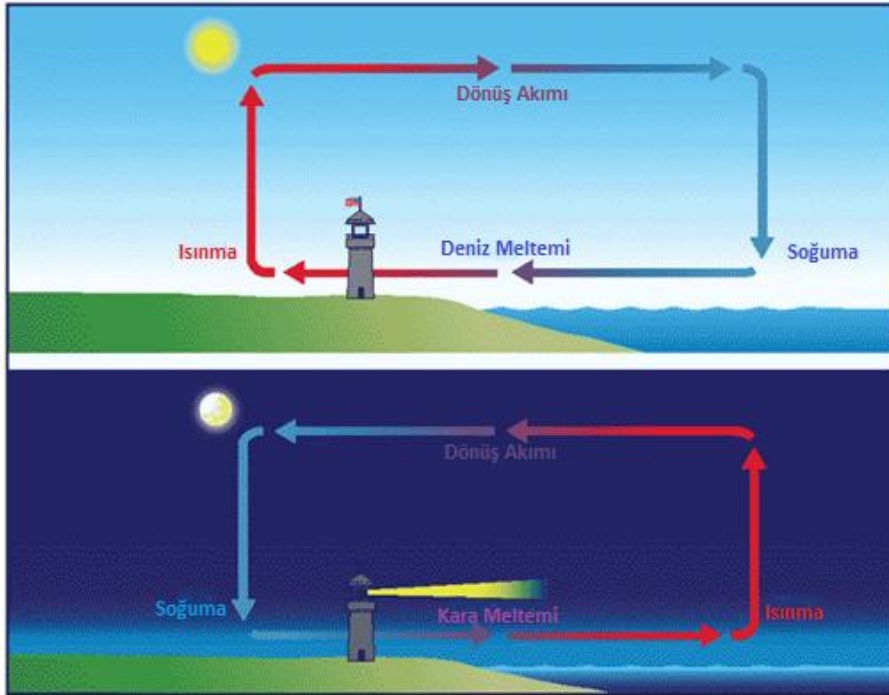
2.2.2 Yerel rüzgarlar

Yerel rüzgarlar genelde buldukları bölgenin coğrafik yapılarına bağlı olarak kara-deniz etkileşimlerinden, gece-gündüz değişimlerinden, kanal etkisi vs. gibi sebeplerden

oluşur. (Durak ve Özer, 2007) Esiş yerleri ve zamanları bilinir ve oluştukları yere göre soğuk veya sıcak veya soğuk karakterli olabilirler.

Türkiye ve Dünyada gözlemlenen bazı yerel rüzgarlar: Afrika, Güney Akdeniz'e yönelmiş alçak basınç merkezleri önünde gözlemlenen sıcak karakterli Samyeli, fön dağlık alanlarda gözlemlenen nemli hava kütlelerinin dağ yamacı boyunca yükselip sonunda burada yağış bırakarak dağın öteki kısmında sıcak ve kuru karakterli bir rüzgar, soğuk, şiddetli ve kuru karakterli rüzgarlar olan Bora, Dalmaçya, Adriya denizi kıyılarında kış ve ilkbahar mevsimleri gözlenirken, Mistral, Fransa'da kuzey-kuzeybatı yönünde eser, Krivetz Romanya'da kış ve ilkbahar mevsimlerinde gözlemlenir, Poyraz ise Karadeniz ve Marmara bölgelerinde kuzeydoğudan esen yağış getiren rüzgarlardır. (Donn, 1975)

2.2.2.1 Kara - deniz meltemleri

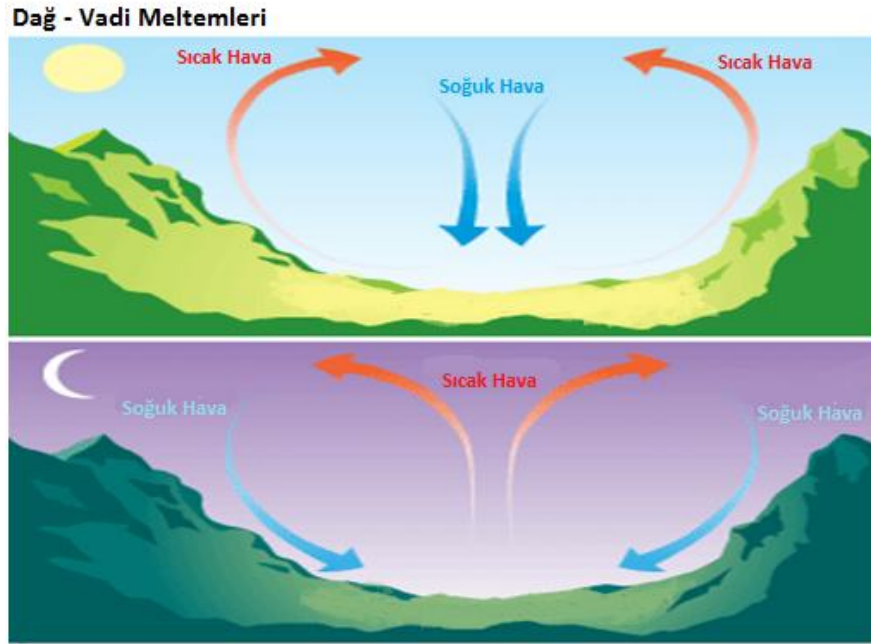


Şekil 2.5 : Kara-deniz meltemi. (Url-7)

Kara ve deniz meltemlerinin ana sebebi, karaların ve denizlerin gün içerisinde farklı zamanlarda ısınması ve soğuması ve sahip oldukları ısıyı farklı zamanlarda kaybetmelerinden ileri gelir (Şekil 2.5). Gündüz karalar denizlere oranla daha kolay ısındığından, kara üzerinde alçak basınç alanı meydana gelirken, karaya oranla daha

soğuk olan deniz üzerinde ise yüksek basınç meydana gelir, bu durum denizden karaya doğru bir hava akımı meydana getirir. Bu hava akımına deniz meltemi denir. Benzer şekilde gece, karalar denize oranla ısınıpı daha çabuk yitirdiğinden (birim kütle başına kaybedilen ısı miktarı daha fazla olduğundan) daha kolay soğur, kara üzerinde yüksek basınç alanı oluşur, buna karşın deniz ısınıpı daha geç kaybettiği için alçak basınç alanı deniz üzerinde oluşur ve bu sefer hava akımı karadan denize doğrudur. Bu hava akımına ise kara meltemi denir. Kara ve deniz meltemleri genel olarak yaz aylarında, ekvator kuşağında ve orta enlemlerde gözlemlenir. Deniz meltemi nemli ve serinken, kara meltemi kurudur ve deniz meltemlerine oranla daha az şiddetli rüzgarlardır. Etki alanları kıydan iç kesimlere doğru 20-40km ve yükselti olarak 300-400m arasında değişir. (Donn, 1975)

2.2.2.2 Dağ - vadi meltemleri



Şekil 2.6 : Dağ – vadi meltemleri (Ur1-8)

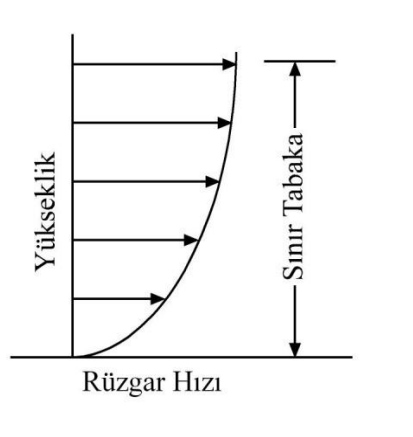
Gündüzleri dağın güneşe bakan yamaçları, vadilere oranla daha çabuk ısınır, bu dağ yamacında alçak basınç alanı oluştururken, dağ yamacına oranla daha soğuk olan vadiye yüksek basınç alanı oluşur (Şekil 2.6). Buna bağlı olarak, vadiden dağ yamacına doğru rüzgar gözlemlenir. Geceleri ise tam tersine dağ yamacının vadiye oranla daha çabuk soğumasına bağlı olarak yüksek basınç alanı oluşturur ve bu esnada daha sıcak olduğu

için alçak basınç alanı olan vadiye doğru rüzgar esişi gözlemlenir. Dağdan vadiye doğru esen bu rüzgara dağ meltemi denirken, vadiden dağa doğru sen rüzgara vadi meltemi denir (Donn, 1975).

2.3 Rüzgar Üzerinde Yer Etkisi

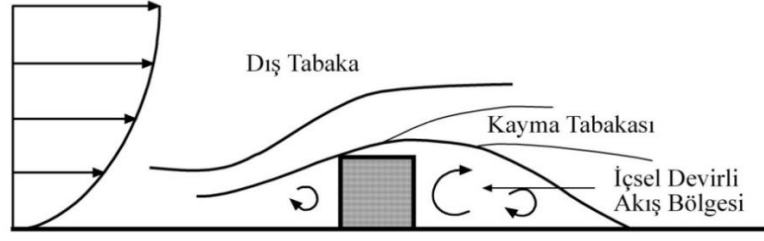
Meteorolojik etkilerle birlikte, coğrafik özellikler de rüzgar profilinde etkili bir faktördür. Rüzgarın estiği yerin engebeli veya engebesiz olması, orografi, yapılar, pürüzlülük gibi yüzey koşulları rüzgarın akışını etkiler. (Durak ve Özer, 2007)

Yüzeye yakın yerde rüzgar profili engebeye bağlı olarak bozulma gösterir ve türbülans oluşturur. Yüzey engebesinin rüzgar üzerindeki türbülans etkisi yer yüzünden yukarı çıkıldıkça azalmaktadır. Atmosferik sınır tabakanın üstünde, laminer akış gözlemlenmeye başlar. Yeryüzüne çok yakın kısım olan laminer akış gösteren ince alt katmanda moleküler transfer akı iletimini sağlar. Bu akış Newton'un viskozite kanunu ile açıklanabilir. (Durak ve Özer, 2007) Rüzgar profili nötr olan bir akışta rüzgarın hızı önce artmakta ardından belirli bir yüksekliğe ulaşınca sabitlenmektedir (Şekil 2.7).



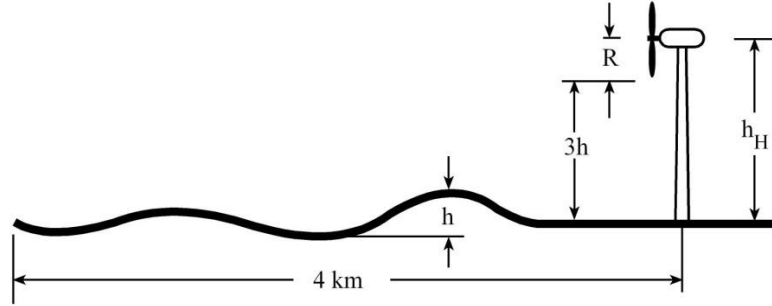
Şekil 2.7 : Sınır tabaka

Rüzgarın esiş yönündeki yapılar, bu yapıların birbirine olan mesafesi, ağaçlar, vs. gibi doğal ve ya insan yapımı oluşumlar rüzgarın akışını karmaşılaştırır. Örneğin dikdörtgen bir engele dik olarak gelen rüzgarın hızı yavaşlar ve buna bağlı olarak momentumu düşer (Şekil 2.8). Engelin arka kısmında bir iç sirkülasyon gözlemlenir. Ancak akış dış tabaka da bozulmadan devam eder. (Durak ve Özer, 2007)



Şekil 2.8 : Bir momentum iz şeması (Manwell ve diğ., 2002).

Akışta arazinin düz veya kompleks oluşu, yüzeydeki yapıların uzunluğu, pürüzlülüğü de önemlidir. Yükseklik farkı, tepe, vadi gibi coğrafik öğeler barındıran araziler kompleks araziler olarak tanımlanırken, rüzgarın estiği 11.5 km çapındaki bölge ve çevresinde 60m'yi geçmeyen yükselti, rüzgar türbinin kurulacağı alanın 4 km öncesinde türbin boyunun üçte birini aşmayan yükselti araziye düz kabul edilmesini sağlar (Şekil 2.9). (Durak ve Özer, 2007)



Şekil 2.9 : Düz arazi koşulu gösterimi (Manwell ve diğ., 2002)

Engellerin varlığı rüzgar hızının yüksekliğe bağlı olarak değişmesine sebep olur. Belirli bir yükseklikten ölçülen rüzgar hızı bu yükseklikten yukarıda veya bu yükseklikten aşağıda farklı değerler alacaktır. Bu hızların belirlenebilmesi için basit bir eşitlik olan eşitlik 2.1 kullanılır.

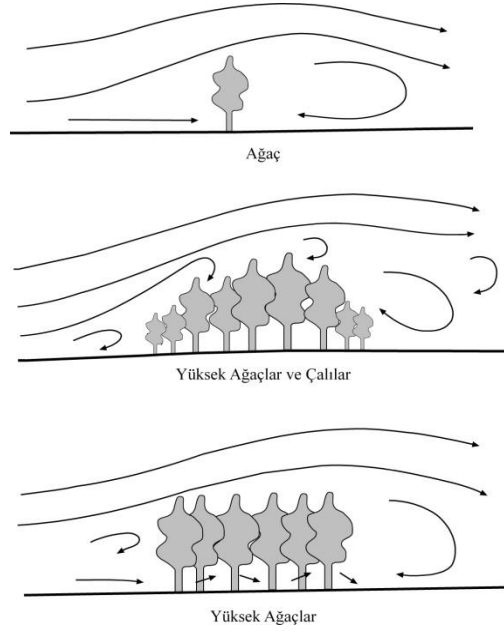
$$v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

Burada h_1 , ölçüm yapılan yüksekliği, h_2 , rüzgar hızı öğrenilmek istenilen yüksekliği, v_1 , ölçüm yapılan yükseklikteki rüzgar hızını, v_2 , h_2 yüksekliğindeki rüzgar hızını verir, α deneysel, yüzey özelliklerine bağlı bir katsayıdır (Johnson, 2001).

Düz bir arazide akışı bozan engeller, doğal engeller (ağaç, kaya, vs.) ve insan yapımı engeller (ev, site, vs.) olmak üzere iki kısımda incelenebilir.

İnsan yapımı engeller genel olarak geometrik yapılar oldukları için akışın bozulmalara uğradığı yer; türbülans gözlemlendiği, rüzgar hızının düşüş gösterdiği bölgeler tahmin edilebilir. Rüzgar ölçümünün yapıldığı bu tarz engeller içeren bölgelerde, ortaya çıkan akış bozukluklarına perdeleme etkisi denir. Perdeleme etkisi, engelin uzunluğuna, yüksekliğine, ölçüm alınan noktanın engele olan uzaklığına, ölçüm alınan noktanın yüksekliğine ve engelin geçirgenlik değerine bağlıdır. Geçirgenlik değer katı olan ev duvar gibi yapılarda sıfır iken, yoğun cisimler için 0.35-0.5 arasında değişir.

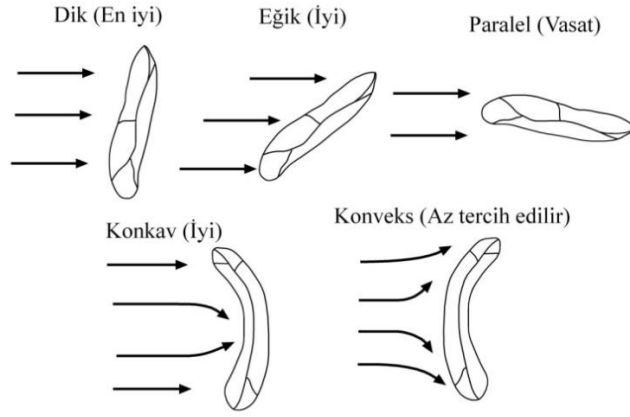
Doğal engeller (ormanlık arazi, su yüzeyleri, çalılık, çimen, vs) heterojen bir dağılıma sahip olup yüzey pürüzlülük özellikleri değişkenlik gösterir (Şekil 2.10). Bu durum rüzgarın akışında iki yüzey arasındaki geçişlerde bir geçiş tabakası oluşturmasına sebep olur ve bu geçiş tabakası rüzgar profilini değişmesinde etkilidir. (Durak ve Özer, 2007)



Şekil 2.10 : Doğal engellerin gösterimi

Düz olmayan araziler, tepeler, sıradağlar ve dağlar olarak tanımlanır. Akışın zorlandığı bu tarz arazi yapısına bakıldığında esiş profilinde engele yaklaşan rüzgarın engelin hemen önünde bir iç sirkülasyon meydana getirdiğini, ardından engelin hemen üzerindeki akış profilinde bir türbülans oluşturduğunu, belli bir mesafeden sonra engelin akış profili üzerindeki etkisini kaybeder ve bu rüzgar hızını artırır. (Durak ve Özer, 2007)

Sıradağlar, yeryüzüne yakın kesimlerde görülen soğumayla oluşan durağan havanın olmaması ve sırt üzerinde ivmelenme etkisiyle hızlanmış bir akışın gözlemlenmesi açısından rüzgar profili açısından olumlu, ancak yüksek kesimlerde hava yoğunluğunun düşmesi ve türbülanslı bir rüzgar profili gözlemlenmesi açısından olumsuz etkileyebilecek özelliklere sahip oluşumlardır (Şekil 2.11). Bununla birlikte rüzgarın akış yönüne göre uzanma şekli ve akışın denk geldiği sırtın şekli de rüzgar profili açısından önem teşkil eder. (Durak ve Özer, 2007)



Şekil 2.11 : Türbin alanının yeterliliği üzerine sırtın pozisyonu ve şeklinin etkisi
(Manwell ve diğ., 2002).

Bununla birlikte tepe ve dağ gibi lokal engellerde, hava engel üzerinden ve etrafından geçerken bir kanal içinde hareket eder gibi davranır. Havan akışında tepenin biçimi ve boyutları da etkilidir. Pürüzsüz bir tepe üzerinden aşağı doğru akarken rüzgar akım vektörleri sıklaştığından rüzgar hızı artar. Bu hız artışı bitki örtüsüne de bağlı olarak 20-30 dereceden daha az eğime sahip tepelerde uygun bir rüzgar profili oluşturur. Bununla birlikte rüzgarın çarptığı tepenin dış bükey kısımlarından iç bükey kısımlarına doğru hızlanarak akacağı düşünüldüğünde daha uygun bir rüzgar profili oluşturduğu görülmektedir. Türbülans etkileri göz önünde bulundurulduğunda 400 metreden fazla uzun kayalıkların rüzgar profilini bozabileceği gözlemlenmiştir. (Durak ve Özer, 2007)

3. ÖLÇÜM VE İSTATİSTİK

Rüzgar enerjisinin olası bir bölgedeki potansiyelinin hesaplanabilmesi, rüzgar türbinin kurulacağı yerin belirlenmesinde rüzgar hızının ve yönün ölçülmesi, dağılımının gösterilmesi esas işlemlerden biridir. Bunun için seçilen bölgede, belirlenen yüksekliklerde, belirli bir zaman periyodu içinde, yön ve hız ölçümleri alınması rüzgar profilinin anlaşılması için gereklidir (Şaylan, 2009).

3.1 Rüzgar Ölçümü

Rüzgar yönü ve hız parametreleri ile ifade edilebilen bir büyüklük olduğu için vektörel olarak tanımlanır (Şaylan, 2009). Bu parametreleri ölçebilmek için geliştirilmiş aletlere anemometer denir. anemometer teriminin Yunanca “anemos”(rüzgar) kelimesinden gelir. İlk olarak 1846 yılında Thomas R. Robinson tarafından tasarlanmıştır (Durak-Özer, 2007). Anemometreler günümüzde mekanik ve elektronik olarak iki türe ayrılabilir.

Mekanik anemometreler anemograf olarak bilinen grafiksel olarak rüzgar hızını kayıt altına alan rüzgar yönünü de kaydeden cihazlardır (Şaylan, 2009). Bu cihazlarda ortalama hız, rüzgar akışının zamana oranıyla bulunur. Uzak mesafelerde yer alan bölgeler için bu tip anemometreler güç kaynağı olmadan çalıştıkları için avantajlıdır (Manwell ve diğ., 2002). Elektronik anemometreler bir veri toplayıcı ile birlikte çalışarak yön ve hız bilgilerini bu veri toplayıcıda depolama ve bilgisayara aktarma imkanı sağlamaktadır (Şaylan, 2009). Elektronik anemometreler ile anlık rüzgar hızları gözlemlenebilir. Dönen milin aşağı ucu, minyatür bir AC ya da DC jeneratörüne bağlıdır. Analog çıkış bir çok metodla rüzgar hızı verisine dönüştürülür.



Şekil 3.1 : Kepçe anemometre (Manwell ve diğ., 2002)

Anemometreler dönme eksenlerine göre kepçeli (yatay) ve pervaneli (düşey) olmak üzere ele alınabilir. Kepçeli anemometer olarak adlandırılan tipte, yarım küre şeklinde üç ya daha fazla sayıda kepçe rüzgarın mukavnetine bağlı olarak bir eksen etrafında döner, dönme sayısı ile rüzgar hızı konusunda bilgi verir (Şekil 3.1). (Şaylan, 2009) Kepçeli anemometrelerin dönüş oranları, dönüş sayımları yapan mekanik bir sayaç, elektrik ya da elektronik devrelerindeki voltaj değişimleri (AC ya da DC), fotoelektrik bir devre anahtarı vasıtasıyla ölçülebilir. Kepçe anemometrelerin tepki ve doğruluğu ağırlığına ve fiziksel boyutlarına ve yapısal friksiyonuna bağlıdır. Bu parametrelerin değişimi ile tepki süresi de değişir (Manwell ve diğ., 2002). Meteoroloji istasyonlarında ölçüm için tercih edilen tip anemometreler bu tiptedir. Ölçüm alınabilmesi için genel olarak sabit bir kule üzerine yerleştirilmeleri tercih edilir (Şaylan, 2009). Pervaneli anemometrede pervaneye gelen rüzgar şaftı döndürür ve bu da AC ya da DC jeneratörünü veya küçük bir dişliyi çevirirerek sinyali oluşturur. Bu tarz anemometreler hızlı tepki için ve değişken rüzgar hızlarına uyumlu olarak kullanılmıştır. Genel yatay eksenli kullanımda, pervane bir kuyruk yelkovanı ile rüzgar yönünde tutulur bu sayede rüzgar yönü hakkında da fikir verir. Bu tarz anemometrelerin doğruluğu kepçe tipi ile aynıdır (Manwell ve diğ., 2002).

Bir eksen etrafında dönüş yaparak rüzgar hızı ölçümü alan bu tarz anemometrelere doğrudan ölçüm alan anemometreler denir. Kepçeli ve pervaneli tip anemometrelerde rüzgar hızının ölçülmesine geçilebilmesi için rüzgarın belirli bir azami hıza sahip olması gerekir. Bu azami hız aletten alete değişkenlik gösterir (Şaylan, 2009).

Ayrıca ses dalgaları, lazer ışını veya ince bir teldeki direncin değişimi gibi fiziksel ölçütlere dayanarak ölçüm alan yapan anemometrelere ise dolaylı yoldan ölçüm alan anemometreler denir. Ses dalgalarını kullanarak ölçüm alan sonik anemometreler, sabir bir sensör yardımıyla ses dalgalarının vericiden alıcıya geçiş hızına göre ölçüm yaparlar. Üç boyutlu ve oldukça hassas ölçüm alan bu aletlerin en büyük dezavantajları pahalı olmalarıdır. Lazer anemometreler ise lazer ışığı üzerinde rüzgarın oluşturduğu değişikliği temel alarak ölçüm alan anemometrelerdir. Telle ölçüm alan anemometreler ise, sıcak bir telde rüzgara bağlı olarak telin direncinde meydana gelen değişimi esasına dayanarak çalışan anemometrelerdir (Şaylan, 2009).

Bunlar dışında troposfer tabakasının da ölçüm almak için geliştirilmiş uzun mesafeli mikrodalga ve radarlı rüzgar anemometreleri de vardır (Şaylan, 2009).

Rüzgar ölçüm yüksekliği genel olarak, özel amaçlı ölçüm istasyonları dışında dünya meteoroloji örgütü standartlarına göre yüzeyden 10 m yukarıda alınır. Ölçüm alınacak bölgenin etrafı açık bir bölge olması, rüzgar hızının ve yönünün belirleneceği yerde ölçüm yapan istasyonla civarındaki engel teşkil edebilecek obje arasındaki mesafenin objenin boyunun on katı veya daha fazla olması gerekmektedir. Ayrıca ölçüm yapan istasyonun 150 m çapındaki bölgede rüzgarı engelleyebilecek bir etki bulunmamalıdır (WMO, 2006). Kurulacak bir rüzgar türbini için ölçüm yüksekliği türbin yüksekliğinin üçte ikisi kadar olması gerekli görülür (Şaylan, 2009).

Rüzgar karakteristiğinin belirlenmesi uzun süreli ölçümler gerektirdiğinden, ölçüm yapılan istasyonunun yerleşik durumda bulunması gerekir. Rüzgar hızı SI birim sisteminde m/sn cinsinden ifade edilir (Hau, 2006)

Sıcaklık, nem, basınç gibi değişkenlerin ölçülmesi de rüzgar hızı ve yönünün belirlenmesinde destekleyici parametrelerdir.

3.2 Rüzgar İstatistiği

Güçle birebir bağlantısından ötürü, rüzgar hızı türbinin kurulacağı bölgenin güç potansiyeli için en önemli veridir. Rüzgar hiçbir bölgede sabit değildir. Hava sisteminden, bölgenin coğrafi yapısından, yükseklik parametrelerinden etkilenir. Bu yüzden ortalama hız ölçümleri on yıl veya üzeri zaman sürecinde alınır. Uzun vadeli ölçümler bölgenin enerji potansiyeli açısından güvenilir olsa da oldukça pahalıdır ve bir çok proje bu kadar uzun vadeli bekletilemez. (Patel, 1999)

Rüzgar güneş ve mevsimlerin etkisinde olduğu için yıl içinde rüzgar modeli tekrarlanır. Rüzgar bölgesi genelinde hız verisinin aylık dağılımı ile ifade edilir. Belirli bir periyottaki rüzgar hız varyasyonu olasılık dağılımı ile ifade edilebilir. Rüzgar hızı frekans eğrisi bir çok dağılım fonksiyonu ile ifade edilebilse de genel olarak Weibull veya Rayleigh dağılım fonksiyonları tercih edilir. Weibull'un iki parametrelili, Rayleigh'in tek parametrelili dağılım fonksiyonları olması, Weibull'un daha geniş kapsamlı bir uygulamalarda kullanımına olanak sağlasa da, Rayleigh'in kullanımı daha kolaydır (Barutçu, 2008)

3.2.1 Weibull olasılık dağılım fonksiyonu

Waloddi Weibull tarafından malzemelerin kırılma dayanımlarını modellemek için analitik bir metod olarak geliştirilmiş olan Weibull dağılımı, aynı zamanda güvenilirlik ve ömür modellemesinde de kullanılır. Weibull dağılımı bu durumlarda eksponansiyel yaklaşıma oranla daha uygundur. Hız dağılım varyasyonu en uygun şekilde Weibull olasılık dağılım fonksiyonu ile ifade edilir (Şekil 3.2). Dağılım fonksiyonu k , şekil (shape) ve c boyut (scale) parametresi içeren bir h fonksiyonu ile ifade edilir, h herhangi bir zaman aralığındaki rüzgar hızı olasılığı v 'nin bir fonksiyonudur.

$$h(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad 0 < v < \infty \quad (3.1)$$

Weibull dağılımı genelleştirilmiş Gama dağılımının (Pearson Type 3) özel bir durumudur.

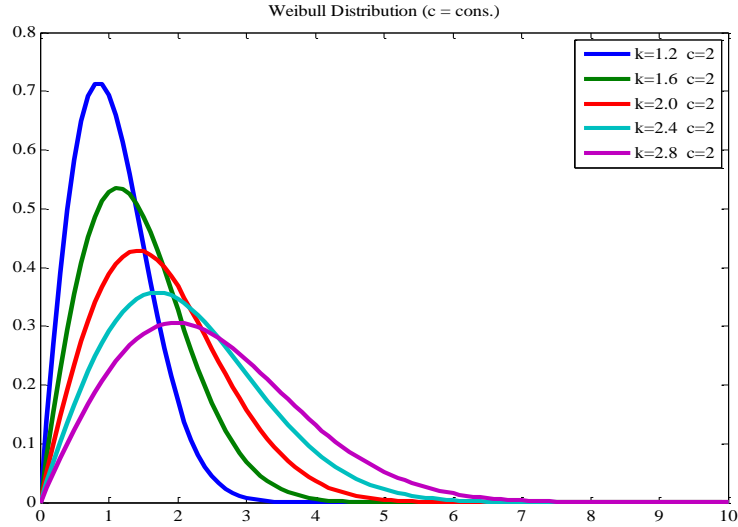
$$\bar{v} = \mu = \int_0^{\infty} v \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \quad (3.2)$$

$$x = \left(\frac{v}{c}\right)^k \text{ değeri için;}$$

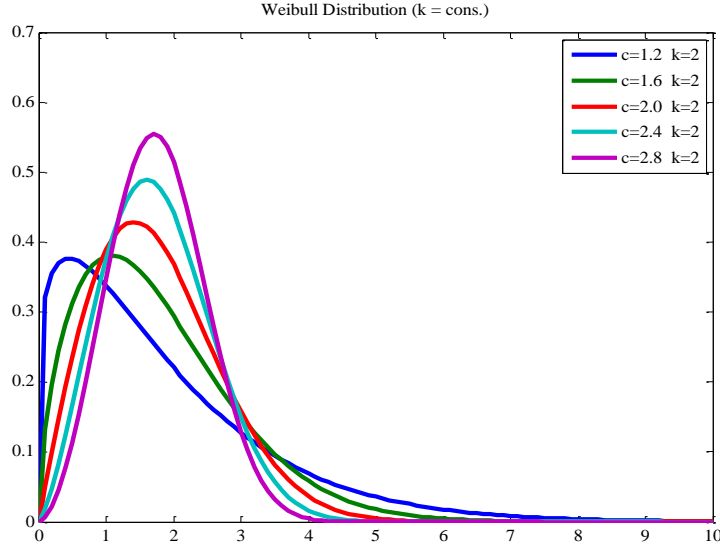
$$\bar{v} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right); \left(\Gamma(y) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{y-1} dx; y = 1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3.3)$$

$$\bar{v} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3.4)$$

Birçok bölgede toplanan veri eğer çok kısa vadeli değilse Weibull yoğunluk fonksiyonu ile gayet iyi ifade edilebilir. Weibull dağılım fonksiyonunun kullanılabilmesi için alınan ölçümlerin, bir-iki saat veya günden çok, haftalık veya yıllık olması gereklidir. (Barutçu, 2008)



Şekil 3.2 : Weibull dağılımının farklı Şekil parametreleri için değişimi (Barutçu, 2008)



Şekil 3.3 : Weibull dağılımının farklı boyut parametreleri için değişimi (Barutçu, 2008)

Buradaki şekil parametresi olan k , $k=1$ için çoğunluğu rüzgarsız ($v=0$) geçen günler için, $k=2$ birçok gün ortalama hızın altında bazı günlerde bu değer üstünde hız değerleri görüldüğünde (gözlemlenen tipik rüzgar dağılımı) için, $k=3$ ise düşük değerlerde hız değerleri gözlemlenen günlere eşit yüksek hız değerlerinin gözlemlendiği zamanlar için kullanılır. (Patel, 1999)

c parametresinin aldığı değerlerin anlamı; c değerlerinin artmasıyla birlikte eğri sağa doğru kayacak yani daha yüksek hız değerlerine geçilecektir (Şekil 3.3). Bu yüzden büyük c değerleri yüksek hız gözlemlenen gün sayısının da fazla olduğunu gösterir. (Patel, 1999)

3.2.2 Rayleigh olasılık dağılım fonksiyonu

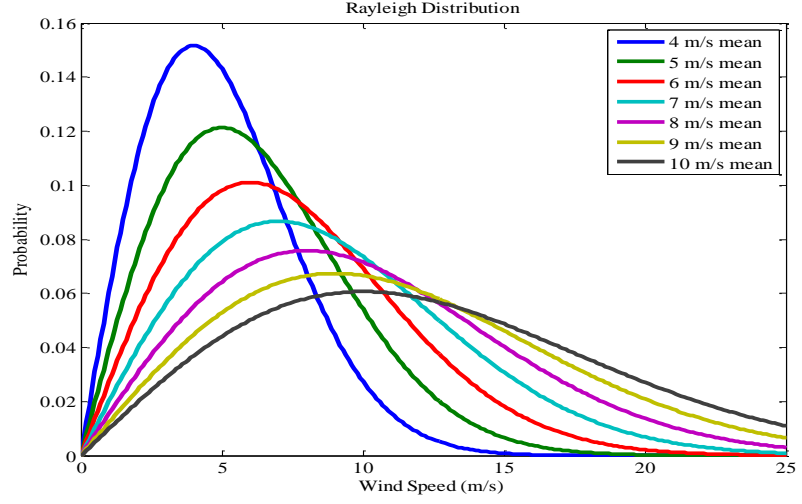
Rayleigh dağılım fonksiyonu, Weibull dağılım fonksiyonunun bir alt kümesini oluşturur (Şekil 3.4). Weibull

dağılım fonksiyonunun k ve c parametreleri Rayleigh dağılım fonksiyonunda b parametresine denktir. (Patel, 1999)

$$f^W(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \quad k=2, \quad c=\sqrt{2}b \quad (3.5)$$

$$f^R(v) = \frac{v}{b^2} e^{-\frac{v^2}{2b^2}} \quad (3.6)$$

Rayleigh dağılımı rüzgar hız dağılımını bir parametre ile göstermek için oldukça uygundur, bu açıdan kullanımı da kolaydır.

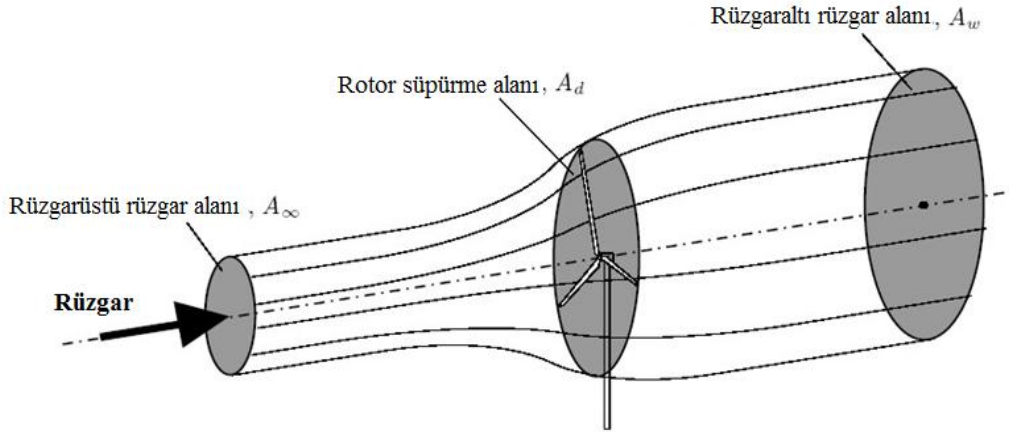


Şekil 3.4 : Rayleigh dağılımı (Barutçu, 2008)

4. TÜR BİN MEKANIĞI

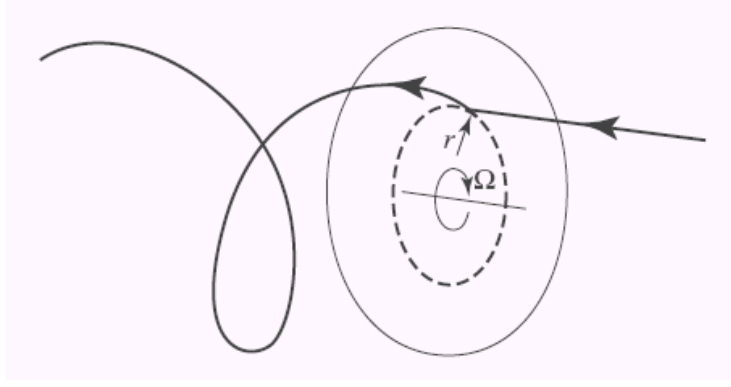
4.1 Türbin Aerodinamiği

Rotor, gelmekte olan rüzgarüstü hava akışının, yavaşlamasına sebep olur, öyle ki rotor diskine geldiğinde rüzgarın hızı, serbest (free) hızından yavaştır. Akış tüneli yavaşlamanın bir sonucu olarak genişler henüz bir iş yapılmamış olduğundan havanın statik basıncı kinetik enerjideki düşüşü absorbe etmek için artar (Şekil 4.1). (Burton ve diğ., 2001)



Şekil 4.1 : Türbin aerodinamiği (Burton ve diğ., 2001)

Hava, rotor diskinden geçerken, statik basınçta düşüş olur, bu yüzden hava diskten ayrılırken basıncı atmosferik basınç seviyesinin altındadır. Hızın ve statik basıncın düştüğü bu rüzgar altı bölgeye iz denir (Şekil 4.2). Ancak, uzak rüzgar altı bölgede, izdeki statik basınç seviyesi, atmosferik basınç seviyesine geri döner. Statik basınç artışı, kinetik enerjinin harcanmasına neden olduğu için rüzgar şiddetinde azalmaya sebep olur. Bu yüzden, uzak rüzgarüstü ve uzak iz durumları arasında statik basınçta bir değişiklik olmazken, kinetik enerjide azalma olur. (Burton ve diğ., 2001)



Şekil 4.2 : Türbülans (Burton ve diğ., 2001)

Rüzgarüstü bölgede akış tünelinin kesit alanı diskin (actuator disk) ve rüzgaraltı bölgenin kesit alanından daha küçüktür. Akış tünelinin genişlemesinin sebebi kütleli debinin her yerde aynı olması gerekliliğidir. (Burton ve diğ., 2001)

Akış tünelinin verilen kesit alanından birim zamanda geçen akışkan kütlesi, ρ yoğunluk, A kesit alanı ve U akış hızı olma üzere $\rho.A.U$ ile ifade edilir. Kütleli debi, akışkan tünelinin her yerinde aynı olmalıdır, bu durumda;

$$\rho A_{\infty} U_{\infty} = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w \quad (4.1)$$

Burada ∞ ; uzak rüzgarüstü, d ; diskten geçerken, w ise uzak iz durumlarını ifade etmektedir (Burton ve diğ., 2001).

Kesit alanı diskinin serbest akış hızına ek olarak bir hız varyasyonu oluşturduğu düşünülür. Diskteki endüklenmiş akışın akış doğrultusundaki bileşeni $-\alpha U_{\infty}$ ile ifade edilir, burada α aksiyel indüksiyon faktörüdürü diğer bir deyişle “inflow factor” olarak adlandırılır. Diskte bu yüzden net akış doğrultusundaki hızı denklem 4.2 ile ifade edilir. (Burton ve diğ., 2001)

$$U_d = U_{\infty}(1 - \alpha) \quad (4.2)$$

4.1.1 Momentum teorisi

Diskten geçen havanın bir uçtan diğer uca hız değişimi, $U_\infty - U_w$ olarak alındığında, momentum değişimindeki oran, bir uçtan diğer uca hız değişimi ve kütle akış oranının çarpımıdır. (Burton ve diğ., 2001)

$$\text{Momentum Değişim Oranı} = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_d \quad (4.3)$$

Momentum değişimine sebep olan kuvvet, kesit alanı diski boyunca oluşan basınç farkından ileri gelir, eğer akış tüneli atmosferik basınçtaki hava ile çevrili olsaydı, net kuvvet sıfır olurdu. Bu yüzden;

$$(P_d^+ - P_d^-)A_d = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_\infty (1 - \alpha) \quad (4.4)$$

Burada $(P_d^+ - P_d^-)$ basınç farkını elde etmek için Bernoulli denklemlerinin akış tüneline rüzgarüstü ve rüzgaraltı durumlar için ayrı ayrı uygulanması, rüzgarüstü ve rüzgaraltı durumlarda toplam enerjinin farklı olması açısından önemlidir. (Burton ve diğ., 2001)

Bernoulli denklemi, durağan şartlarda, akıştaki toplam enerjinin, kinetik enerji, statik basınç enerjisi ve gravitasyonel potansiyel enerjiyi kapsadığını ve iş yapılmadıkça sabit olacağını söyler. Bu yüzden, birim hacimdeki hava için;

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + P + \rho gh = \text{sabit} \quad (4.5)$$

Rüzgarüstü durum için;

$$\frac{1}{2}\rho_\infty v_\infty^2 + P_\infty + \rho_\infty gh_\infty = \frac{1}{2}\rho_d v_d^2 + P_d^+ + \rho_d gh_d \quad (4.6)$$

Rüzgaraltı durum için;

$$\frac{1}{2}\rho_w v_w^2 + P_w + \rho_w gh_w = \frac{1}{2}\rho_d v_d^2 + P_d^- + \rho_d gh_d \quad (4.7)$$

Akışkanın sıkıştırılmaz ($\rho_\infty = \rho_d$) ve yatay olduğu ($h_\infty = h_d$) kabul edilirse, 4.6 ve 4.7 denklemleri birbirinden çıkartıldığında;

$$(P_d^+ - P_d^-) = \frac{1}{2} \rho (v_\infty^2 - v_w^2) \quad (4.8)$$

Denklem 4.4'ten;

$$\frac{1}{2} \rho (v_\infty^2 - v_w^2) A_d = (v_\infty - v_w) \rho A_d v_\infty (1 - a) \quad (4.9)$$

Buradan denlem 4.10 çıkartılır.

$$U_w = (1 - 2\alpha) U_\infty \quad (4.10)$$

Akış tünelineki aksiyel hızın yarısının kaybı kesit alanı diskinin rüzgar üstü bölgesinde ve yarısı rüzgaraltı bölgede gerçekleşir.

Havadaki kuvvet denklem 4.4'ten;

$$F = (P_d^+ - P_d^-) A_d = 2 \rho A_d v_\infty^2 a (1 - a) \quad (4.11)$$

Bu kuvvet kesit alanı diskinde konsantre edilirken, iş $F v_d$ tarafından yapılır, bu yüzden havadan elde edilen güç;

$$\text{Güç} = F v_d = 2 \rho A_d v_\infty^3 a (1 - a)^2 \quad (4.12)$$

Buradan çıkartılan güç katsayısı;

$$C_p = \frac{\text{Güç}}{\frac{1}{2} \rho A_d v_\infty^3} \quad (4.13)$$

elde edilir. Paydadaki ifade kesit alanı diskinin yokluğunda havadan elde edilebilecek gücü ifade eder. Bu yüzden;

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (4.14)$$

C_p 'nin maksimum değeri;

$$\frac{dC_p}{d\alpha} = 0 \quad (4.15)$$

$$4(1-a)(1-3\alpha) = 0 \quad (4.16)$$

Buradan $\alpha=1/3$ değeri için $C_p= 16/27= 0.593$ bulunur. Güç katsayısının maksimum değeri Betz limiti olarak bilinir. Alman aerodinamikçi Albert Betz tarafından hesaplanmıştır.

$$C_p = \frac{\text{Elde Edilen Güç}}{\text{Varolan Güç}} = \frac{\text{Elde Edilen Güç}}{\frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho v_\infty^3 A_d \right)} \quad (4.17)$$

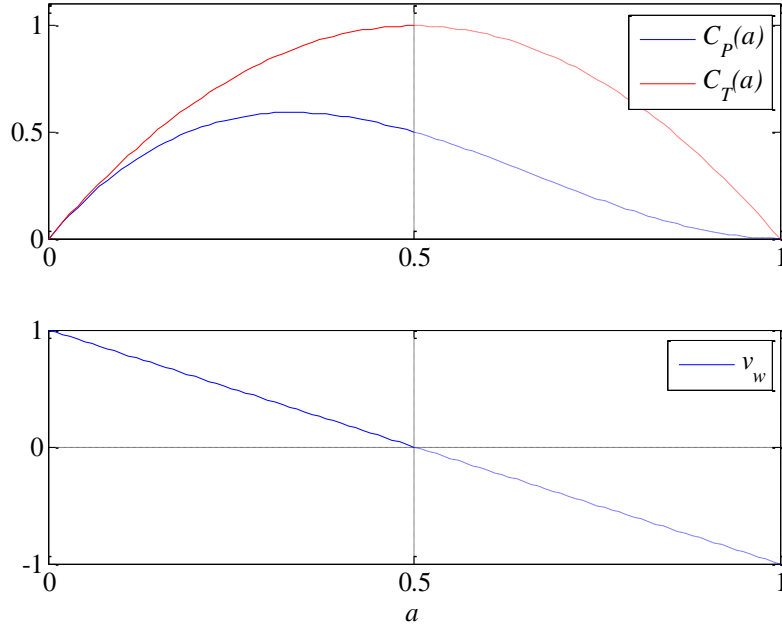
Şeklinde ifade edilebilir.

Kesit alanı diskindeki kuvvet basıncın düşmesine sebep olur. Denklem 4.11'den birimsiz "thrust" katsayısı C_T elde edilir (Şekil 4.3).

$$C_T = \frac{\text{Güç}}{\frac{1}{2} \rho A_d v_\infty^3} \quad (4.18)$$

$$C_T = 4\alpha(1-\alpha) \quad (4.19)$$

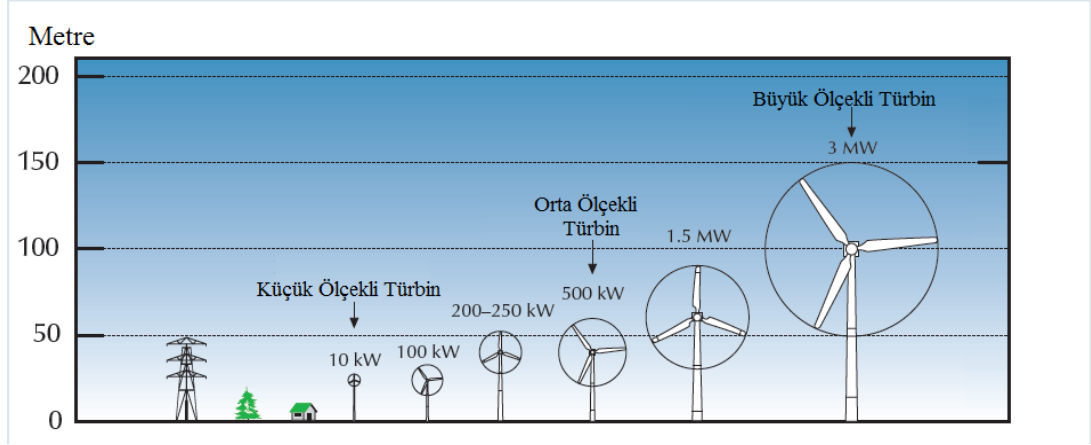
$\alpha \geq 1/2$ için problem iz hızının $(1-2\alpha)v_\infty$ ile verilmesiyle sıfır veya negatif olmasıdır. Bu durumda momentum teorisi uygulanamaz. (Burton ve diğ., 2001)



Şekil 4.3 : Güç ve “thrust” katsayılarının α 'ya bağlı olarak değişimi (Barutçu, 2008)

4.2 Türbin Mekanizması

Türbin mekanizmaları temelde aynı sisteme dayansa da büyük ve küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin çalışma alanları üretim amaçları açısından farklılıklar gösterirler (Şekil 4.4). Örneğin küçük ölçekli türbinler, büyük ölçekli türbinler gibi rüzgarın yoğun olduğu yerin aksine enerji ihtiyacının olduğu yerde kurulurlar. Bu tarz yerler genellikle rüzgarın türbülanslı ve durağan olmadığı bölgelerdir. (Wang ve diğ., 2008) Büyük ve küçük ölçekli rüzgar türbinlerinde dikkat çeken bir diğer fark ise büyük ölçekli türbinlerde kontrol mekanizmasının küçük ölçeklilere oranla verimi artırmak amaçlı daha gelişmiş olmasıdır. Küçük ölçekli türbinlerde bu mekanizma, maliyet açısından geri plandadır. (Barutçu, 2008)



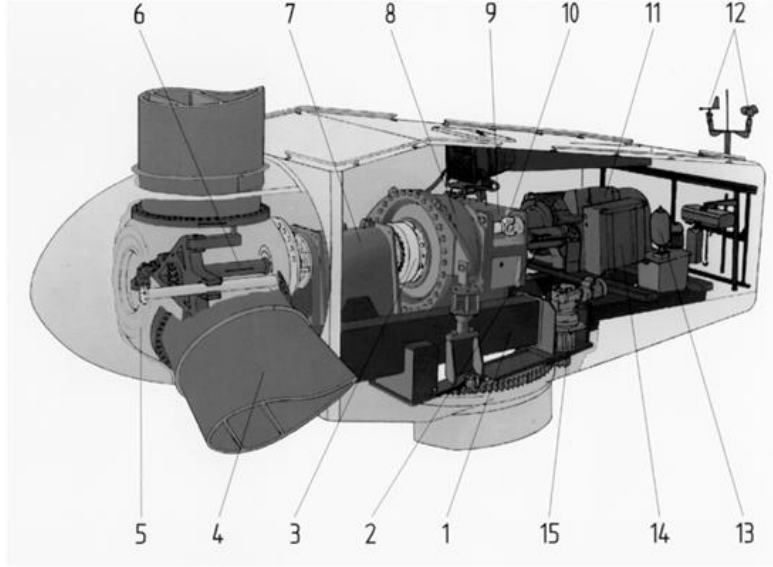
Şekil 4.4 : Küçük-orta-büyük ölçekli türbin gösterimi, boy ve güç miktarlarına göre (Gape, 2009)

Rüzgar enerjisinde, rotor çapı büyüklüğün bir ölçütüdür. Diğer bir deyişle rüzgar türbininin rotoru tarafından süpürülen alan rüzgar türbininin en önemli özelliğidir (Çizelge 4.1). Ancak rüzgar türbininin büyüklüğünde kesin bir ölçüt yoktur. (Gape, 2009)

Çizelge 4.1: Değişik ölçekli türbinler için genel rotor çapı, süpürme alanı ve yaklaşık güç değerleri (Gape, 2009)

	Rotor Çapı (m)	Süpürme Alanı (m²)	Yaklaşık Güç Değerleri (kW)
Mikro	0.5-1.25	0.2-1.2	0.04-0.25
Mini	1.25-3.0	1.2-7.1	0.25-1.4
Ev Tipi	3.0-10.0	7.0-79	1.4-1.6
Küçük Ticari	10.0-20.0	79-314	25-100
Orta Ticari	20-50	314-1963	100-1000
Büyük Ticari	50-100	1963-7854	1000-3000

4.2.1 Büyük ölçekli türbinler



Şekil 4.5 : Büyük ölçekli bir rüzgar türbininin iç mekanizması (Hau, 2006)

Şekil 4.5'te büyük ölçekli bir rüzgar türbininin iç mekanizması görülmektedir. Aerodinamik olarak şekillendirilmiş pervaneler (4) etrafından geçen havanın, dönme eksenine göre oluşturduğu tork ile türbin dönmeye başlar. Rüzgar türbininde rotor olarak adlandırılan kısım; pervanelerin ve pervanelerin bağlandıkları merkez kısmın tamamına verilen addır (5). Rotor, düşük hızlı bir mile bağlıdır, bu düşük hızlı mile dişli sistemi ile bağlantıda olan yüksek hızlı mil (7-8) jeneratörü (11) çalıştırır. Jeneratör olarak genelde alternatif akım üreten indüksiyon jeneratörü tercih edilir. Rotorun arka kısmına yerleştirilmiş anemometre ve rüzgar gülü (12) ile rüzgarın hızı ve yönü ölçülür, elde edilen veriler kontrol sistemine gönderilir. Kontrol sisteminin görevi; rüzgarın hızı yeterli olduğunda mekanizmayı harekete geçirmek, rüzgarın hızı gereğinden fazla olduğunda mekanizmayı durdurmak ve türbinin rüzgara göre yöneltme işlemleri yerine getirmektedir. Düzenleyiciler mekanizmanın dönme hızının sabit tutulması ve aşırı dönme hızlarında aksel kuvveti azaltmakta görev alırlar. Tahrik mekanizması, pervanelerin aerodinamik açıdan yüksek verim elde etmesi ve dönme hızını sabit tutmak için, pervanelerin disk düzlemine göre açılma konumlarında değişiklik yapılmasında kullanılır. Bununla birlikte düşük rüzgar hızlarında yüksek moment elde etmek için de kullanılabilir. (Eggleston ve Stoddard, 1987)

Rüzgar gülü, rüzgar yönünü tespit eder ve bu veriyi sapma mekanizmasına iletir. Sapma mekanizması, rüzgar gülünden gelen verilere göre, türbini rüzgar yönü ile paralel konuma getirir. Bu hareket tahrik mekanizmasında olduğu gibi rüzgar enerjisinden maksimum oranda yararlanabilmek açısından önemlidir. Kontrol sisteminin varlığı maksimum verimin sağlanması yönünden önemlidir. (Eggleston ve Stoddard, 1987)

Disk frenleme sistemi beklenmedik acil durumlar için, türbinin durdurulması amacıyla bulundurulmuş bir mekanizmadır. (Eggleston ve Stoddard, 1987)

Naselle; içinde düşük-yüksek hızlı milleri, regülatörü, jeneratörü, sapma motorunu ve ünitesini, disk frenini ve kontrol cihazlarını içeren aerodinamik bir yapıya sahiptir. (Eggleston ve Stoddard, 1987)

4.2.2 Orta-küçük ölçekli türbinler

Küçük Ölçekli rüzgar türbinleri bir kaç W'dan 10-20 kW'a kadar elektrik üretebilen makinelerdir. Kendi içlerinde mikro rüzgar türbinleri (en küçük tip), mini rüzgar türbinleri ve ev tipi (household) rüzgar türbinleri olarak ayrılabilirler. (Gape, 2009)

Küçük ölçekli rüzgar türbinleri bölgesel üretim için şebeke bağlantılı (on-grid) veya şebekeye bağlı olmadan (off-grid) (su pompalamak veya şarj amaçlı) kullanılabilir. (DNV-GEC,2005)

Rüzgar türbinleri genellikle oldukça engebeli ortamlarda çalışırlar, bu engebelerin etkileri küçük ölçekli rüzgar türbinlerinde açıkça gözlemlenebilir. Bu yüzden genel olarak daha ağır olan küçük ölçekli türbinler, hafif olan türbinlere oranla daha dayanıklı ve güvenilirlerdir. (Gape, 2009)

Küçük ölçekli türbinler sürücü jeneratör, doğru akım çıkışı, "lifetime" yatakları, ve türbini rüzgar yönünde tutmak için bir kuyruktan oluşur. Daha büyük ve pahalı olan türbinler alternatif akım çıkışı, redüktörlü güç düzenine sahiptir ve aktif olarak rüzgar yönüne yönlendirilir. (UrI- 9)

Değişken hızlı türbinlerde doğru akım jeneratörleri kullanılır. Bu doğru akım makineleri “commutated” alternatöre bağlıdır. Küçük çaplı türbin rotoru, bir alternatif akım jeneratörünü tahrik ederek alternatif akım üretebilir modern güç elektroniği ve kontrolleri AC'den DC'ye ve ardından tekrar AC'ye çevrilerek, güvenilir, durağan frekansta üretim yapılabilir. Bu şekilde bir evin ihtiyacını karşılamak amacıyla ev elektrik devresine bağlanabilir (Carlin ve diğ. , 2001)

Bugün birçok küçük ölçekli türbin sabit mıknatıslı alternatif akım jeneratörü kullanmaktadır. Bu en basit ve en sağlam jeneratör konfigürasyonudur, bu açıdan mikro ve mini ölçekli rüzgar türbinleri için idealdir. Birçok küçük ölçekli rüzgar türbini alternatörü 3 fazlı alternatif akım üretirler, bu şekilde nasıl içindeki alan en iyi şekilde kullanılmış olur. Bazı akü şarj eden tiplerde AC'den DC'ye geçiş jeneratörü bulundurulur. Diğerlerinde AC'yi kontrole aktarır. Bazı küçük ölçekli rüzgar türbinleri halen ucuz demir-oksit mıknatıs kullanırken, birçok yeni küçük ölçekli türbin yüksek performanslı neodmium-demir-boron veya diğer ender toprak (rare earth) mıknatıslar kullanır. (Gape, 2009)

Bir çok küçük ölçekli türbin değişken hızlı rotor kullanır. Bazı üreticiler mekanik frenleme sistemi kullanmaktadır. Küçük ölçekli rüzgar türbinleri, genellikle rüzgarüstüdür ve kuyruk vasıtasıyla sapma ve rüzgar yönünde tutulması sağlanır. (Lynette ve Gipe, 1994)

Bütün rüzgar türbinlerinin yüksek rüzgar hızlarında rotoru kontrol eden temel elemanlara sahip olması türbin dizaynının esasıdır. İlk Danimarka tipi rüzgar türbinlerinde santrifüj uyarımına bağlı olarak eğim yapabilen kanat uçları yaygındır. Birçok yeni mikro ölçekli türbin kanat açısı kontrolü rotoru korumak amacıyla kullanır. (Gape, 2009)

Neredeyse tüm küçük ölçekli türbinlerde, rotor, jeneratörü doğrudan (redüktörsüz) tahrik eder. Ölçek büyüdükçe rüzgar türbini, düşük devirle çalışan rotorun yüksek devirle çalışan alternatörü çevirebilmesi için bir redüktöre ihtiyaç duyar. (Gape, 2009)

Kanat sayısı olarak, küçük ölçekli rüzgar türbinlerinde üç kanatlılar, iki kanatlılara oranla daha düzgün döndükleri ve bu açıdan da daha dayanıklı oldukları için daha çok tercih edilirler. İki kanatlıların üç kanatlılara oranla tek avantajı büyük ölçekli rüzgar türbinlerinde olduğu gibi maliyetinin az olmasıdır. (Gape, 2009)

Küçük ölçekli rüzgar türbinlerinde, kanat açısı kontrolü, aktif hız ve güç kontrolü yoktur. Bunun yerine pasif aerodinamik güç sınırlaması ve hız sınırlaması yapılır. (Barutçu, 2008)

Kanat malzemesi olarak kumaş, tahta alüminyum veya fiberglastan üretilirler. Artık sadece bir kaç üretici metal kanat kullanmaktadır. Alüminyum metal yorgunluğuna karşı gösterdiği zayıf özelliklerden dolayı tercih edilmez. Günümüzde çoğu üretici kanat malzemesi olarak fiberglas kompozitleri ve karbon fiber kullanmaktadır. (Gape, 2009)

Orta ölçekli rüzgar türbinleri çiftlik, fabrika, küçük çaplı rüzgar tarlası ve işletme gibi ticari uygulamalarda kullanılan rüzgar türbinleridir. (Gape, 2009)

Orta ölçekli türbinler genel olarak 50 kW ile 250 kW arasında üretim gücüne sahip rüzgar türbinleridir. Uzak şebeke üretimleri için dizel jeneratör ile birlikte yüksek maliyetli şebeke gücünün tüketimini pik yükleri (peak loads) azaltmak için kurulabilirler (DNV-GEC, 2005).

5. PERFORMANS ANALİZİ

Bu tez çalışmasında bir rüzgar türbininin performans analizlerinin yapılması amaçlanmıştır. Analizlerin yapılmasında kullanılan araçlar, Skystream 3.7 rüzgar türbini ve türbinin arayüz program olan Skyview yazılımı, Davis Vantage Pro 2 meteoroloji istasyonu, konsolu ve meteoroloji istasyonunun arayüz programı olan “Weatherlink 5.8.2” yazılımıdır.

5.1 Rüzgar Türbini

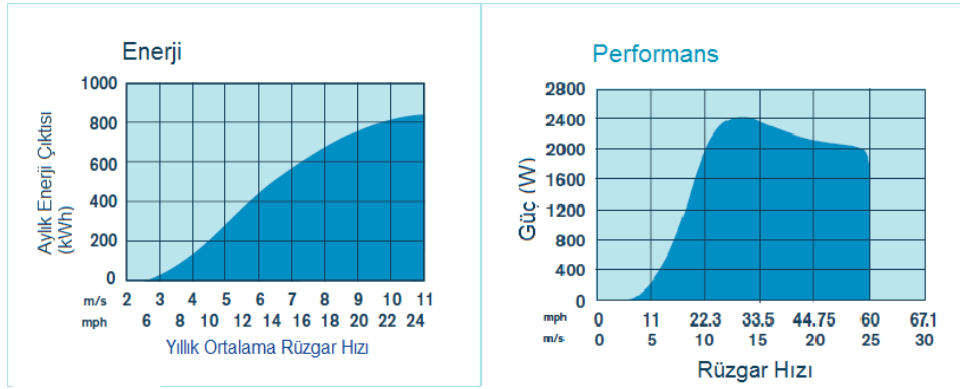
Performans analizi yapılan rüzgar türbini “Skystream 3.7” model 1.8 kW anma ve 2.4 kW pik güce sahip, kulesi 6 m’lik 4 parçadan oluşturulmuş tübüler çelik, gergilerle bağlanmış, toplam yüksekliği 24 m olan bir türbindir (Şekil 5.1). Rotor çapı 3.72 m ve süpürme alanı 10.87 m² olan türbinin sapma (yaw) kontrolü pasiftir ve rüzgaraltı çalışmaktadır.



Şekil 5.1 İ.T.Ü RT-1 Skystream 3.7 rüzgar türbini

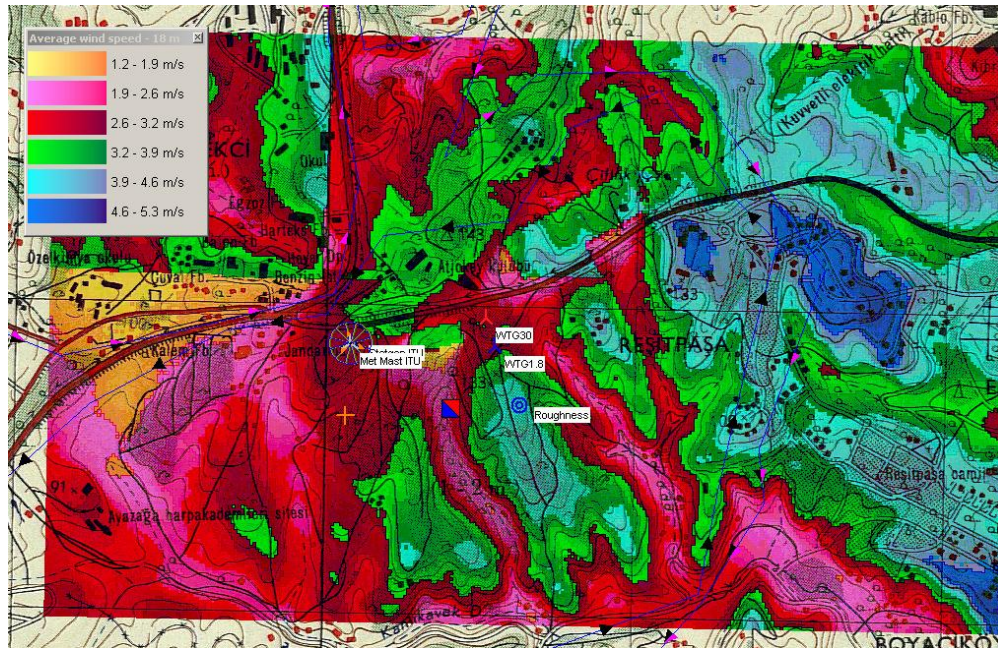
Sabit mıknatıslı alternatif akım jeneratörü kullanılmaktadır. Şebeke beslemesi 120/240 VAC, 50-60 Hz ve 120/208 VAC, 60 Hz'dir. Frenleme sistemi olarak da elektronik "stall" ayarına dayalı geçiş kontrolü kullanılır. Anma hızı 50-330 devir/dakika, kapanma hızı 370 devir/dakika, uç hızı ise 9.7-63 m/s, başlangıç hızı (cut in) 3.5 m/s ve anma rüzgar hızı 9 m/s'dir. Türbinin pervane kanatlarında kompozitle güçlendirilmiş fiberglas kullanılmıştır.

Üreticinin verdiği enerji ve performans ölçüm grafikleri Texas, Bushland'daki USDA-ARS araştırma laboratuvarları tarafından gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.2).

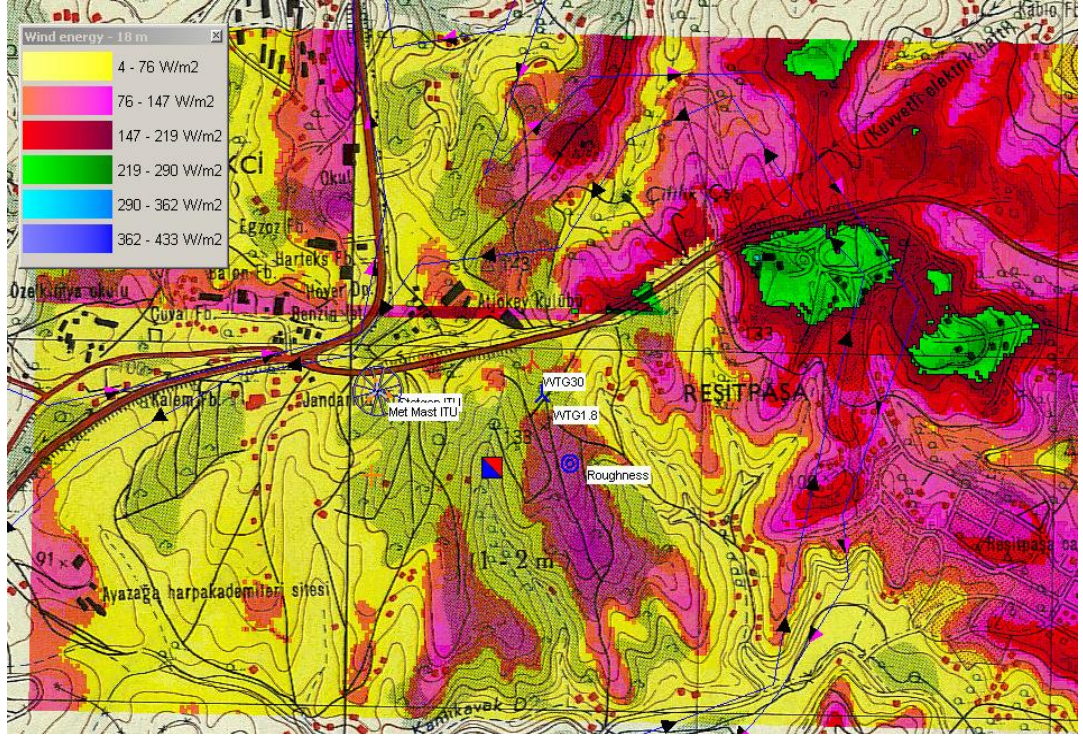


Şekil 5.2 Skystream 3.7 rüzgar türbininin üretici tarafından verilen enerji ve performans grafikleri

Türbin konumunda rüzgar potansiyeli için WaSP ve WindPRO programlarının verdiği sonuçlar şekil 5.3 ve şekil 5.4'de gösterilmiştir. (Rüstemoğlu, 2010)



Şekil 5.3 Rüzgar şiddeti dağılım atlası (Rüstemoğlu, 2010).



Şekil 5.4 Birim alanda enerji üretim potansiyelinin dağılımı (Rüstemoğlu, 2010).

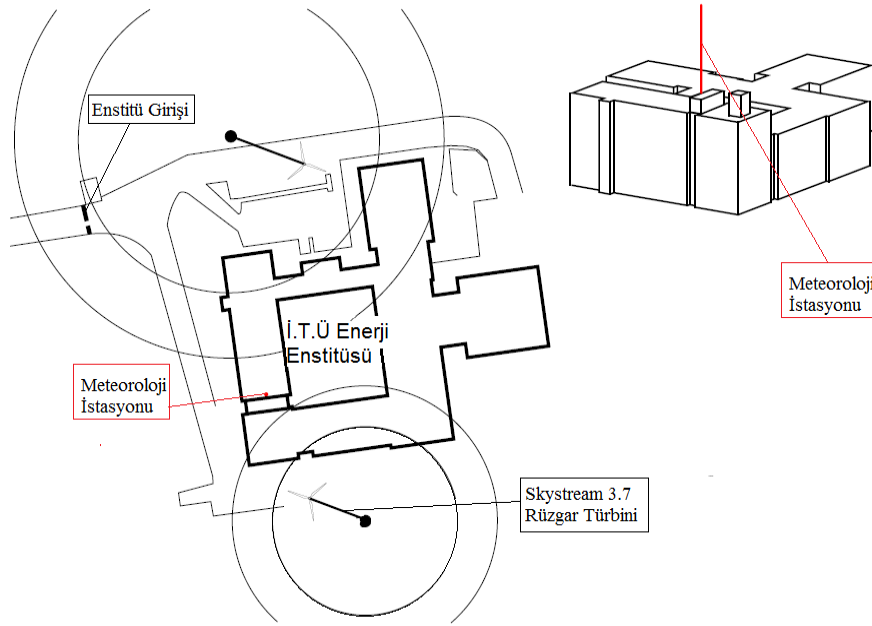
5.1.1 Türbin arayüz yazılımı

Türbin verilerini toplamak için türbinin üreticisinin verdiği “Skyview 2.0” yazılımı kullanılmıştır. Skyview yazılımı ana ekranda türbin güç çıkışı, hızı, türbin bağlantı durumu indikatörlerini gösterir. Program tarih verisiyle beraber toplanan bilgileri “.txt” dökümanı olarak kaydetmektedir. Her gece yarısı yazılım günlük toplam enerji üretimini hafızaya aktarır. Bu çalışmada dakikalık ortalamalar halinde akım, gerilim, devir/dakika, güç, frekans ve rüzgar hızı verileri kaydedilmiştir.

5.2 Meteoroloji İstasyonu

Tezde meteoroloji verilerini gözlemek amacıyla Davis Instruments şirketinin kablosuz Vantage Pro 2 marka meteoroloji istasyonu kullanılmıştır. Söz konusu meteoroloji istasyonun iki bileşenden oluşur: Enetgre sensör cihazı (ISS) ve bu cihazdan verileri kablosuz bağlantı ile alan konsol. Konsolun bilgisayara aktardığı veriler, meteoroloji istasyonunun arayüz programı olan “Weatherlink 5.8.2” yazılımı aracılığıyla bilgisayara aktarılmaktadır. Entegre sensor cihazı ile konsol arasındaki uzaklık aradaki engellere bağlı (duvar, çatı, vs.) olarak 300 m ile 60 m arasında

değişmektedir. Meteoroloji istasyonu türbinlerin izinden etkilenmeyecek bir konumda yerden 20 m yüksekliğe konulmuştur (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Meteoroloji istasyonu ve rüzgar türbinlerinin konumları

5.2.1 Entegre sensör cihazı

Entegre sensör cihazı (ISS) güç kaynağı olarak güneş enerjisi ile şarj edilen bir pil kullanır. ISS birimi rüzgar hızını ölçmek için, manyetik indüksiyonlu kepçe anemometre ve rüzgar yönü belirteci olarak da rüzgar güllü bir potensiyometre kullanır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Vantage Pro-2 Meteoroloji İstasyonu Entegre Sensör Cihazı (Url-10)

5.2.2 Konsol

Vantage Pro 2 konsolu, istasyonun meteoroloji verilerini, kayıtlarını kendi üzerinde göstermekte ve “Weatherlink” yazılımı ile verileri bilgisayara aktarmaktadır. Hesaplamalar, veri gösterimi ve kullanıcı arayüzünü sağlayan konsol, ISS ile bağlantı kurar. ISS sensörlerinden gelen veriler düşük güçte radyo dalgaları ile konsola aktarılır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Vantage Pro 2 konsolu (Ur1-11)

5.2.3 Meteoroloji istasyonunun arayüz programı

Konsol bağlantısı vasıtasıyla ISS’den gelen verileri okumak için arayüz oluşturan Weatherlink yazılımı, o anki meteorolojik verileri (basınç, yağış, sıcaklık, rüzgar hızı, rüzgar yönü, vb.) grafik şeklinde göstermekte ve verilerin zamana göre dağılımı, seçilen verilerin 3 gün ila 1 aylık değişimini grafik üzerinde göstermektedir. Ayrıca çizelge ile seçilen gün veya günler için ölçümlerin tamamını verir ve bu verileri aylık kayıtlar halinde hafızada tutar. Veriler 1 dakikalıktan 1 yıllığa kadar aralıklar halinde alınabilir.

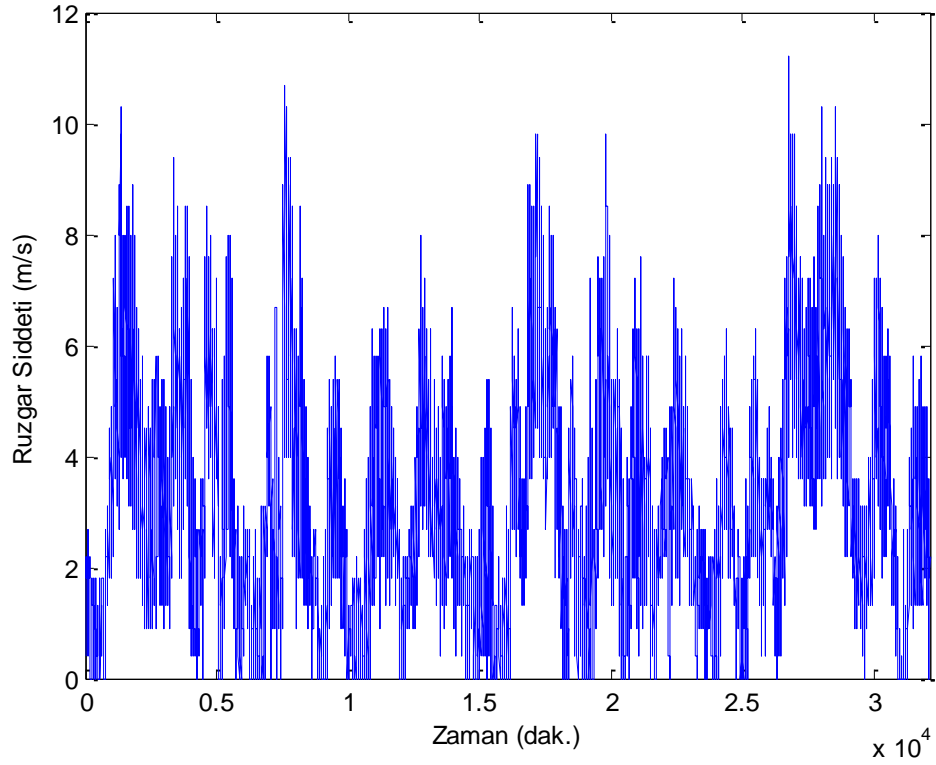
Meteoroloji istasyonunun aldığı veriler, sıcaklık, en yüksek sıcaklık, en düşük sıcaklık, nem, rüzgar şiddeti, rüzgar yönü, en yüksek rüzgar şiddeti, en olası yön, basınç, yağmur, yağmur oranı, solar radyasyon, solar enerji, en yüksek solar radyasyon ve UV dozu ölçümleridir.

6. SONUÇLAR

6.1 Yapılan Ölçümler

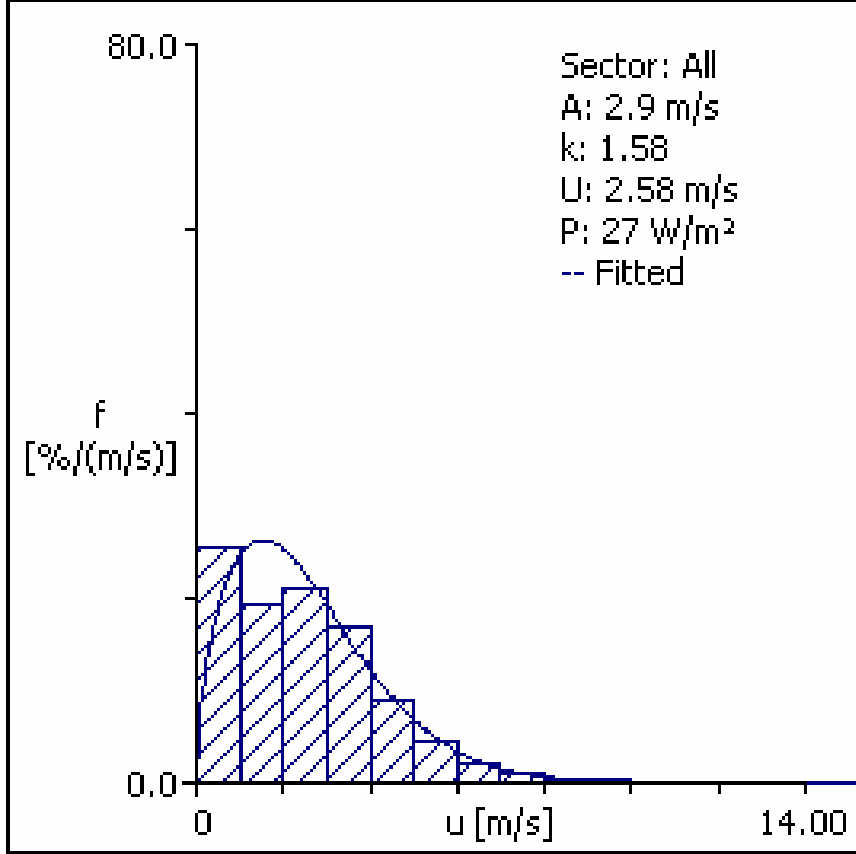
6.1.1 Bölgenin rüzgar profili

22 Mart 2010 ile 02 Mayıs 2010 tarihleri arasında yapılan ölçümlerde, meteoroloji istasyonundan bir dakikalık ortalamalarla alınan rüzgar şiddeti verileri Şekil 6.1’de verilmiştir. Bu süre içerisinde görülen maksimum rüzgar şiddeti 11.2 m/s olarak kaydedilmiştir. İ.T.Ü meteoroloji parkında 3 yıl süresince ölçülen en yüksek rüzgar şiddeti 12 m/s olarak tespit edilmiştir (Rüstemoğlu, 2010).



Şekil 6.1 : Zamana bağlı rüzgar şiddeti

Bu süre içinde alınan rüzgar işaretlerinin Weibull dağılımı parametreleri, şekil parametresi için 1.58 ve boyut parametresi için 2.9 m/s bulunmuştur. Şekil 6.2’de bu tarihler arasındaki rüzgar işaretinin Weibull dağılımı gösterilmektedir.



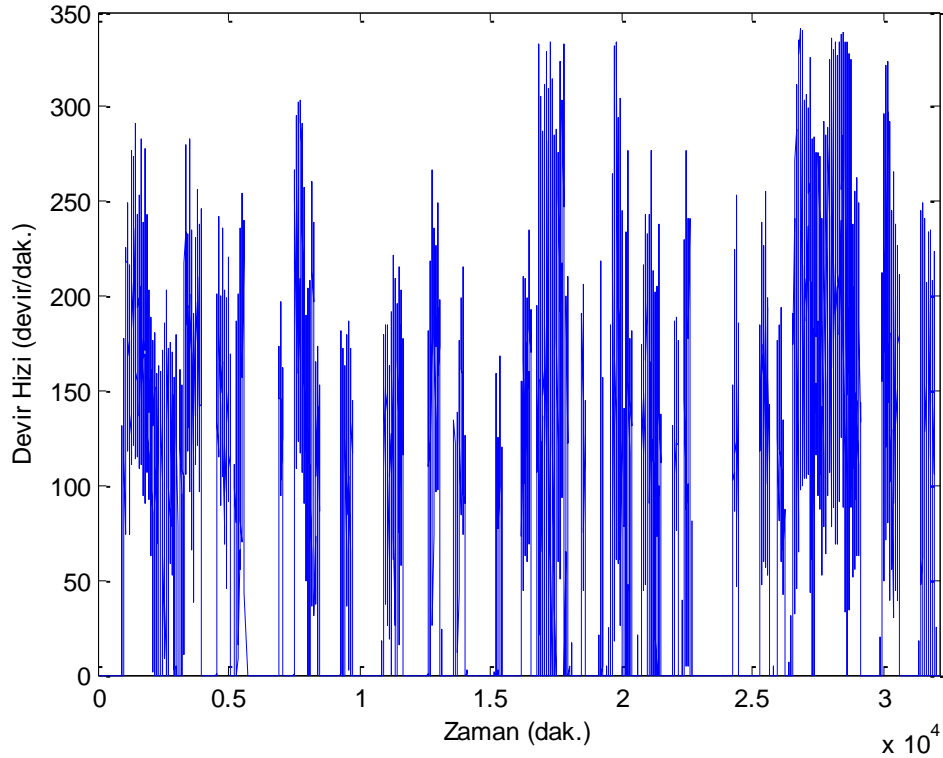
Şekil 6.2 : Rüzgar işaretinin Weibull dağılımı (Rüstemoğlu, 2010)

Üretilen toplam enerjinin kurulu güçte üretilecek olan enerjiye oranından elde edilen kapasite faktörü (C_p) 0.04 bulunmuştur. Kapasite faktörü türbinin ölçüm alınan süre boyunca ürettiği toplam enerjinin, bu süre boyunca anma gücünde çalışsa üreteceği toplam enerjiye oranıdır.

Hakim rüzgar yönü, Maslak bölgesinde de İstanbul’un genelinde olduğu gibi kuzey-kuzeydoğudur. Rüzgar türbininin kuzey-kuzeydoğu bölgesinde enstitü binası yer almakta ayrıca enstitünün orta bahçesinde bulunan çam ağaçları, rüzgar türbininin konumundaki rüzgarı olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla türbinin konumu sebebiyle kapasite faktörü (C_p) düşük çıkmaktadır.

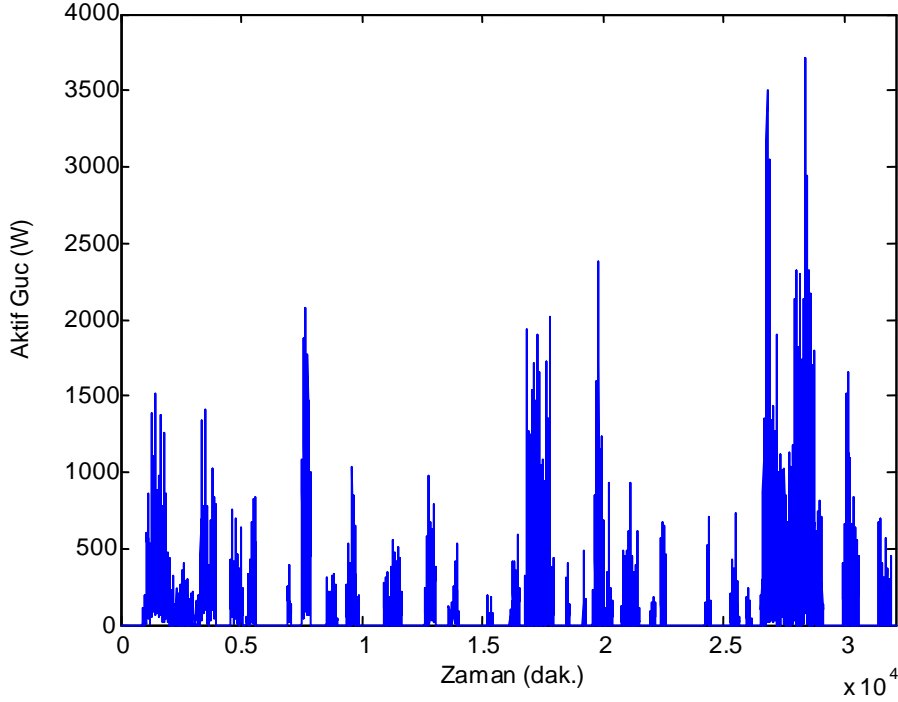
6.1.2 Zamana karşılık performans grafikleri

Ölçüm süresi boyunca rüzgar türbininden alınan akım, gerilim, aktif güç, devir hızı verileri ile bu verilerden türetilen güç çarpanı ($\cos\phi$), meteoroloji istasyonundan rüzgar şiddeti, basınç ve sıcaklık verileri kullanılarak türetilen rotor süpürme alanından akan havanın taşıdığı güç, rüzgar şiddeti ve türbin kanatlarının uç hızından uç hızı oranları belirlenmiştir. Şekil 6.3'de devir hızının zamana göre dağılımı gösterilmiştir. Grafikte Şekil 6.2 rüzgar şiddeti-zaman grafiğine paralel olarak 3.5 m/s başlangıç hızının altındaki değerlerde türbinin devir yaptığı gözlemlenmezken, 3.5 m/s'nin üstündeki değerlerde devir hızında da artış gözlenmiştir. 11.2 m/s için dakikadaki devir miktarı 340 devir/dakika'ya ulaşmıştır.



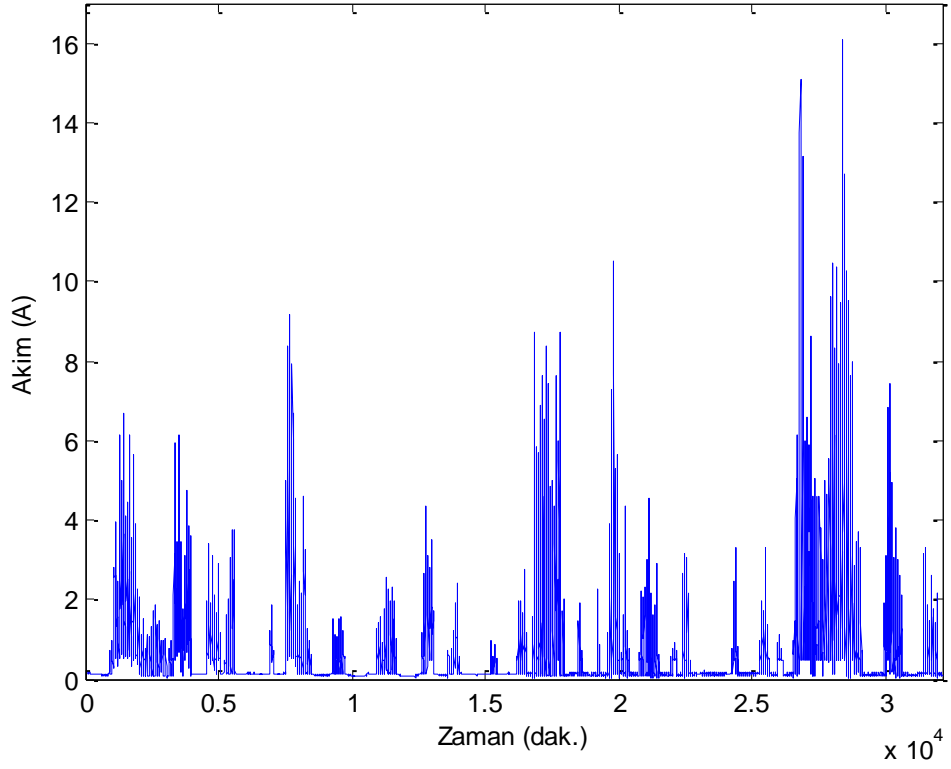
Şekil 6.3 : Devir hızı-zaman

Şekil 6.4'te rüzgar türbininin aktif gücünün zamana göre değişimi gösterilmiştir. Devir hızı-zaman grafiğine (Şekil 6.3) benzer şekilde aktif güç – zaman grafiğinde de 3.5 m/s'nin altında türbinde aktif güç üretimi gözlemlenmemiştir. Ancak 11.2 m/s şiddetinde anlık olarak 3.72 kW üretim gözlenmiştir.



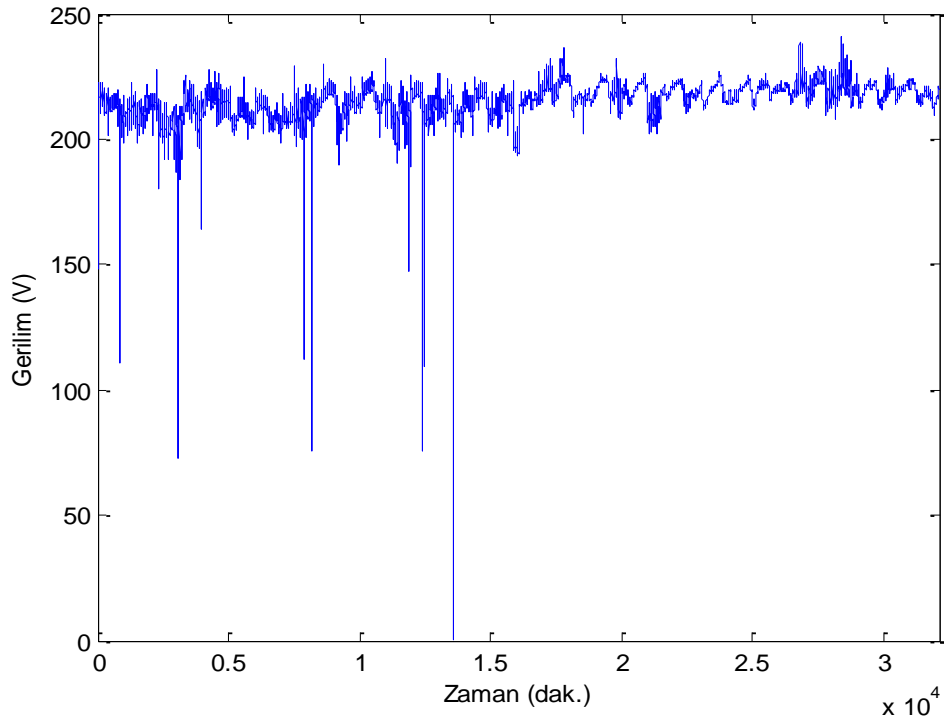
Şekil 6.4 : Aktif güç-zaman

Bu güç verilerine karşın rüzgar türbininin akım ve gerilim değerleri Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da verilmiştir. Şekil 6.5 akım-zaman grafiği, Şekil 6.4 aktif güç- zaman grafiği ile paralellik göstermektedir. 3.5 m/s'nin altındaki rüzgar şiddetlerinde akım değeri de gözlemlenmezken, rüzgar şiddetinin artması ile akım değerleri de artış göstermiştir. 11.2 m/s için ölçülen akım değeri 16 A'dir.



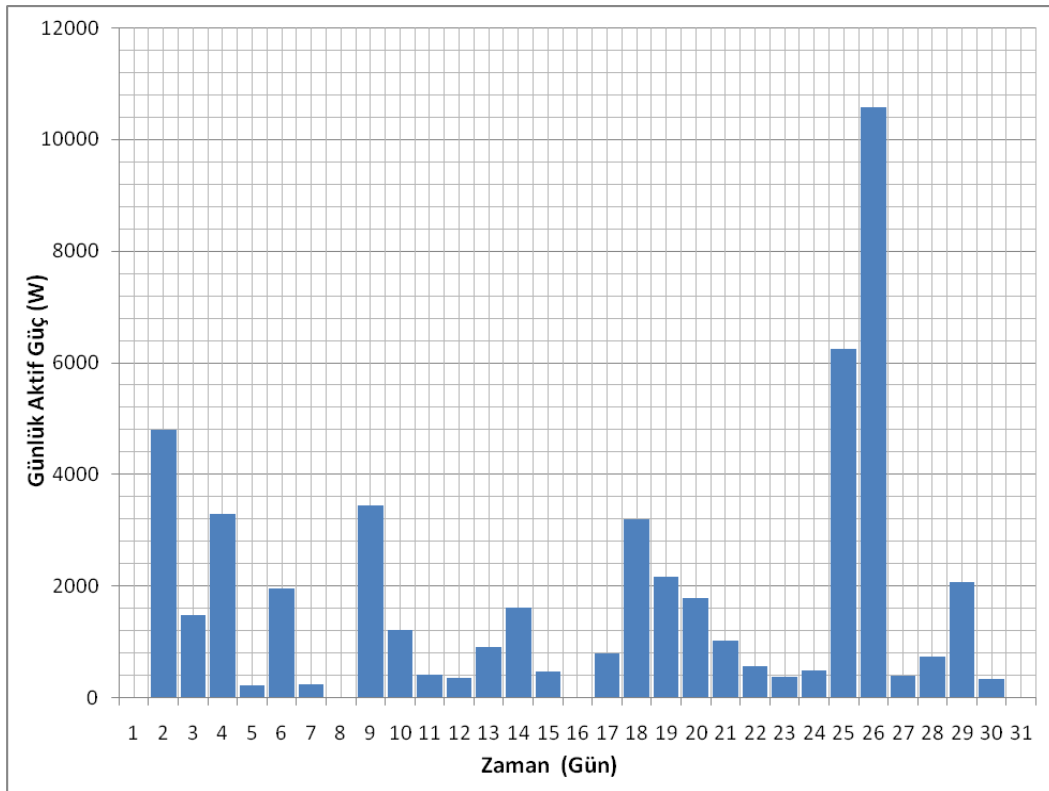
Şekil 6.5 : Akım-zaman

Gerilim-zaman grafiğinin, akım-zaman (Şekil 6.5) ve aktif güç – zaman grafiğinden farkı, gerilim ölçülürken türbinin şebekeye bağlandığı noktaki gerilimin ölçülmesidir. Bu sebeple şebekedeki gerilim değişimleri de ölçülmektedir. Şekil 6.6 gerilim – zaman grafiğinde 22 Mart 2010 ile 17 Nisan 2010 tarihleri arasında yaşanan şebeke gerilimindeki düşüşler de görünmektedir. Şekil 6.6'da 220 V'un üzerindeki gerilim değerleri türbinin şebekeyi beslediği gözlemlenen değerlerdir.



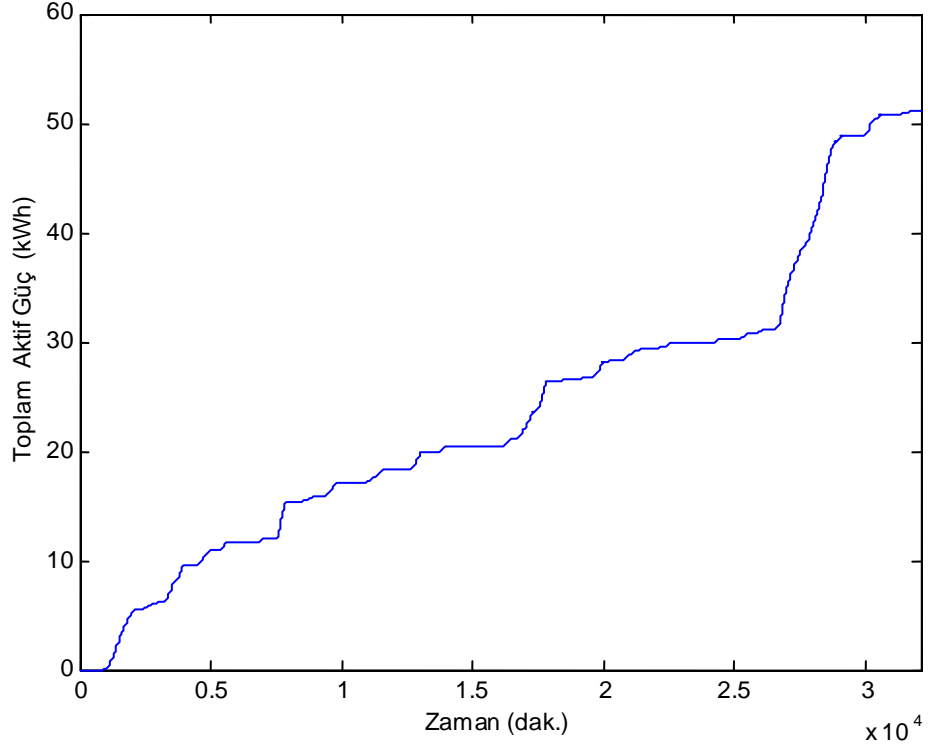
Şekil 6.6 : Gerilim- zaman

Şekil 6.7, 22 Mart 2010 ile 02 Mayıs 2010 tarihleri arasındaki günlük aktif gücün dağılımını göstermektedir.



Şekil 6.7 : Günlük aktif güç - zaman

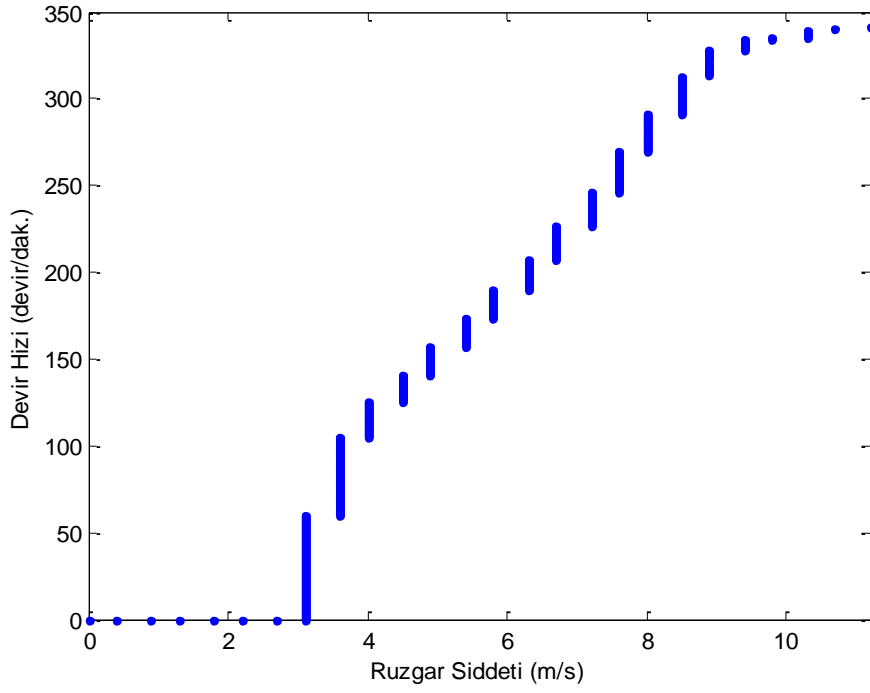
Sonuç olarak rüzgar türbininden 22 Mart 2010 tarihinden 02 Mayıs 2010 tarihine kadar üretilen toplam enerji (toplam enerji 51.21 kWh olmak üzere) Şekil 6.8’da verilmiştir.



Şekil 6.8 : Toplam aktif güç- zaman

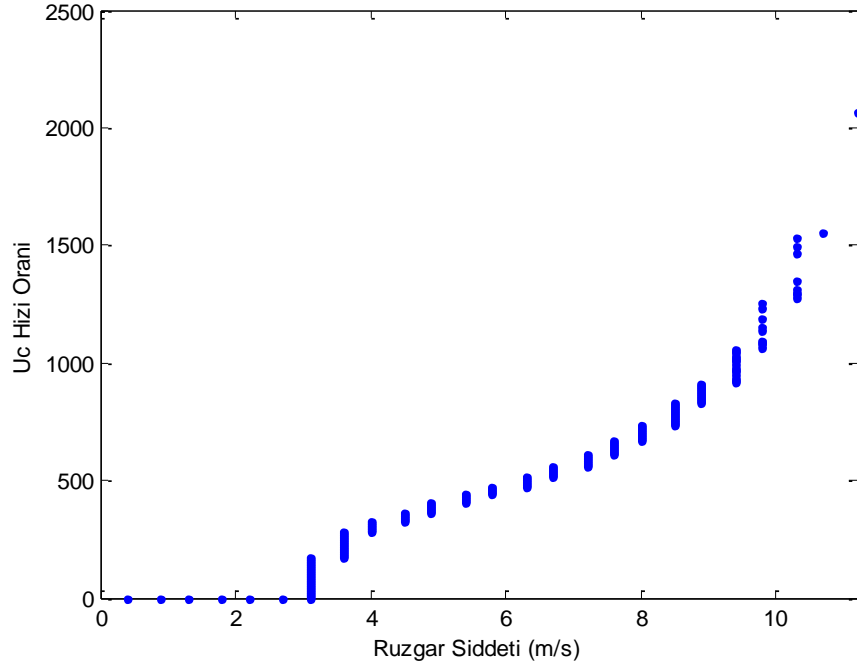
6.1.3 Rüzgar hızına karşılık performans grafikleri

Rüzgar şiddeti verilerine karşılık, rotor süpürme alanından akan havanın taşıdığı güç, türbinin ürettiği aktif güç, akım, gerilim, devir hızı, güç çarpanı, uç hızı oranı grafikleri çizdirilmiştir. Buna göre Şekil 6.9’de rüzgar şiddetine karşılık devir hızı grafiği görülmektedir. Bu grafikte 3.5 m/s rüzgar şiddetinin altında türbin aktif olarak çalışmaya başlamadığı için devir de gözlemlenmemiştir. Ancak 11.2 m/s rüzgar şiddetinde türbinin yaklaşık 340 devir/dakika’yla döndüğü gözlemlenmiştir.



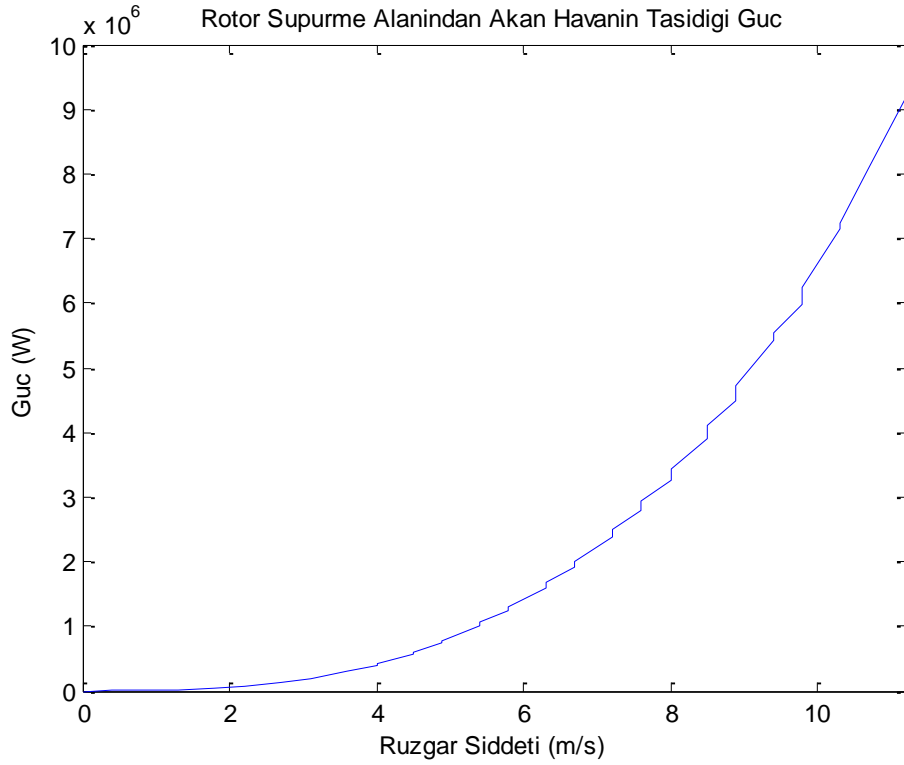
Şekil 6.9 : Rüzgar şiddeti-devir hızı

Bu verilere bağlı olarak hesaplanan uç hızı oranının rüzgar şiddetine göre değişimi Şekil 6.10'da görülmektedir. Uç hızı oranı, türbinin kanat ucunun yaptığı çizgisel hızın, rüzgar şiddetine oranı olarak tanımlanır. Şekil 6.10'da 3.5 m/s'nin altındaki değerlerde türbin kanadı devir yapmadığı için uç hızını oranı sıfır olarak gözlemlenmiştir. 11.2 m/s için uç hızı oranı anlık olarak 2000'e ulaşmıştır.



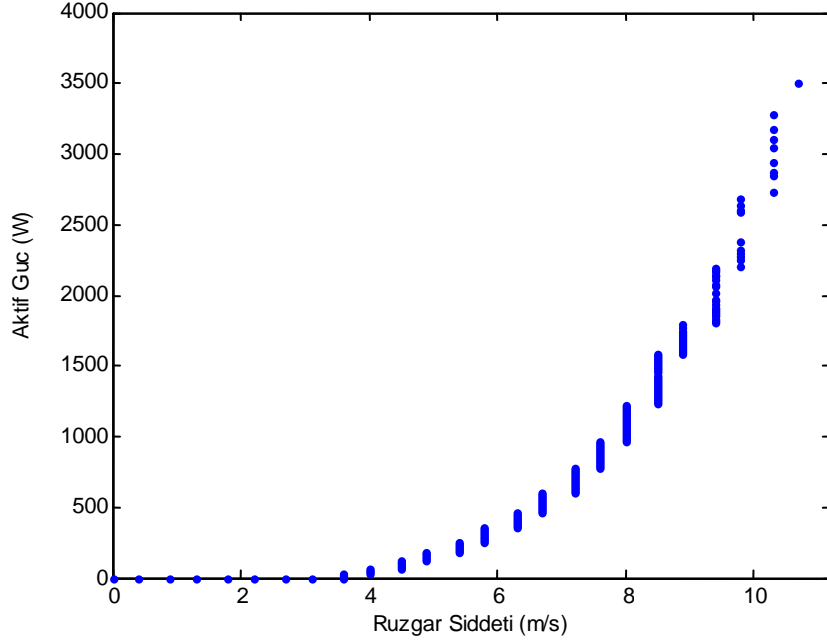
Şekil 6.10 : Rüzgar şiddeti-uç hızı oranı

Rotor süpürme alanından akan havanın taşıdığı gücün rüzgara göre değişimi Şekil 6.11’de görüldüğü gibi rüzgar şiddetinin küpü ile orantılı olarak artmaktadır.



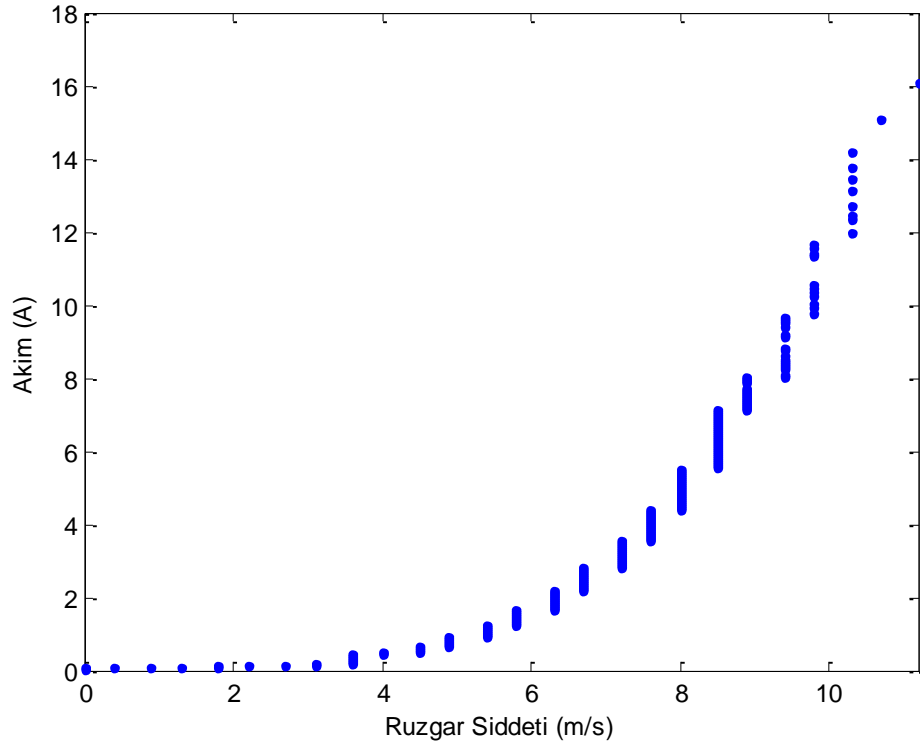
Şekil 6.11 : Rüzgar şiddeti-güç

Aktif gücün rüzgar şiddetine göre değişimi Şekil 6.12’de gözlenmektedir. Aktif güç değerleri 3.5 m/s’nin üzerindeki, değerlerde artış göstererek, 11.2 m/s için anlık olarak 3.7 kW ulaştığı gözlemlenmiştir.



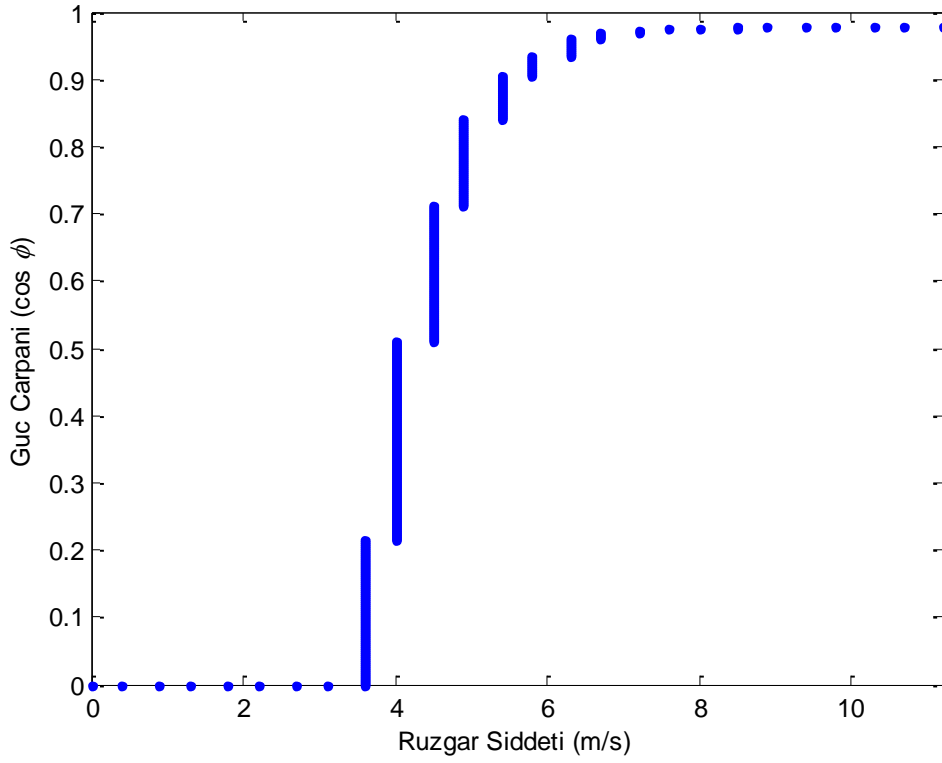
Şekil 6.12 : Aktif güç-rüzgar şiddeti

Rüzgar şiddetine karşılık, akım değerleri de Şekil 6.13’de verilmiştir. Şekil 6.13 , Şekil 6.12 ile paralellik göstermektedir.



Şekil 6.13 : Akım-rüzgar şiddeti

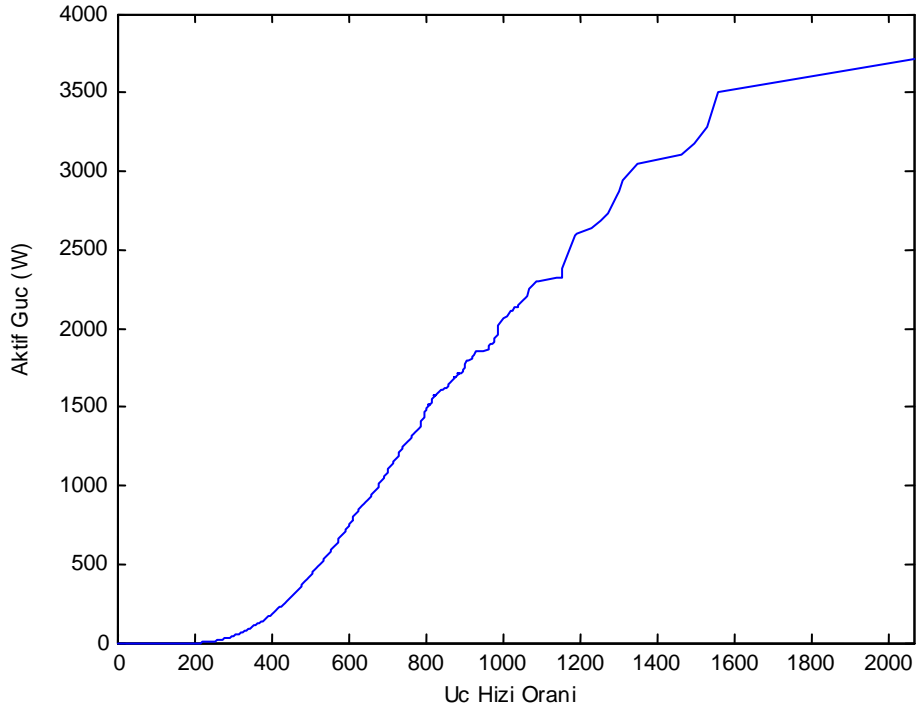
Akım ve gerilim değerlerinden elde edilen görünür güç ve aktif güç oranından hesaplanan güç çarpanının ($\cos\phi$) rüzgar şiddetine göre değişimi de Şekil 6.14'de gösterilmektedir. Güç çarpanı değerleri 3.5 m/s'nin altında sıfır iken, bu rüzgar şiddetinin üzerindeki değerlerde girederek arttığı ve 6 m/s rüzgar şiddetinde 0.9 değerine ulaştığı, 6 m/s'nin üstünde de 0.9'un üzerinde değerler aldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.14 : Güç çarpanı-rüzgar şiddeti

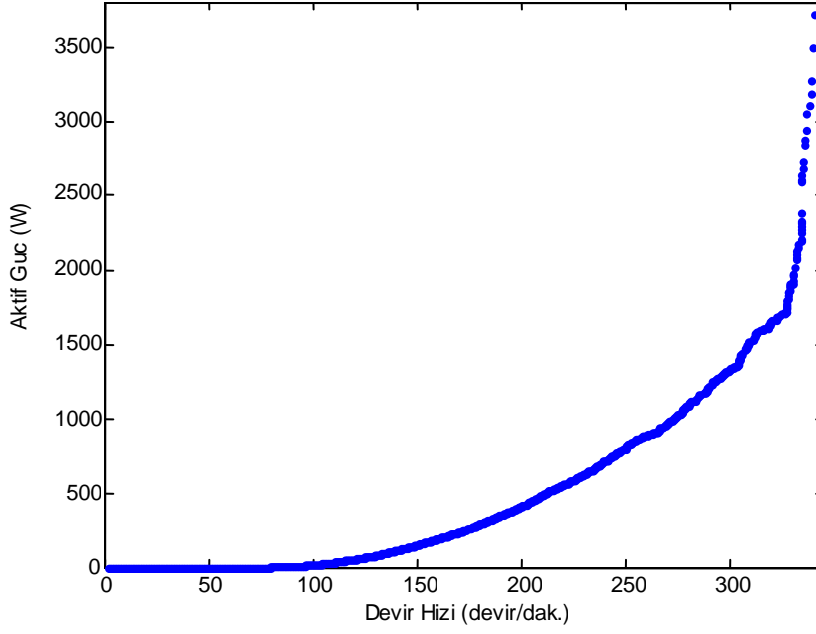
6.1.4 Diğer performans grafikleri

Rüzgar türbinini performansı konusunda daha spesifik bir analize ulaşmak için ayrıca uç hızı oranı- aktif güç, devir hızına göre güç ve güç çarpanı grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 6.15’de uç hızı oranına göre aktif güç grafiği verilmiştir.



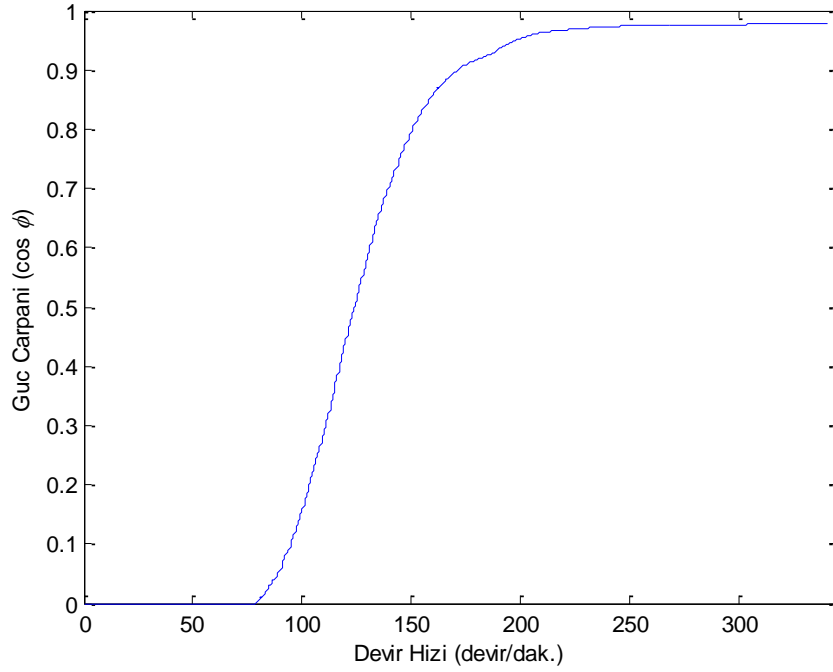
Şekil 6.15 : Uç hızı oranı - aktif güç grafiği

Aktif gücün devir hızına bağlı olarak değişimi Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Devir hızının 100 devir/dakika ve üzerindeki değerlere ulaşmasından itibaren aktif güç de giderek artış göstermiştir. 340 devir/dakika'ya denk gelen aktif güç değeri 3.7 kW'dir.



Şekil 6.16 : Devir hızı- aktif güç

Hesaplanan güç çarpanının devir hızına göre değişimi ise Şekil 6.17’de görülmektedir. Ortalama dakikada 75 devire ulaşması ile birlikte türbinin güç çarpanı ifadesi de sıfırdan farklı değerler almaya başlayarak, devir hızının artmasına paralel olarak artış göstermiş ve 200 devir/dakika’da 0.9’un üzerinde değerler almaya başlamıştır.



Şekil 6.17 : Devir hızı- güç çarpanı

6.2 Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışmasında 22 Mart – 2 Mayıs tarihleri arasında konumu ve özellikleri önceki bölümlerde verilmiş olan İTÜ RT-1 1.8 kW rüzgar türbininden ve Davis Vantage Pro 2 meteoroloji istasyonundan dakikalık ortalamalar olarak toplanan veriler kullanılmıştır. Bu süre zarfında gözlenen en yüksek rüzgar şiddeti 11.2 m/s dir. İ.T.Ü meteoroloji parkında 3 yıl süresince ölçülen en yüksek rüzgar şiddeti 12 m/s olarak tespit edilmiştir (Rüstemoğlu, 2010). Bu süre içinde alınan rüzgar işaretlerinin Weibull dağılım parametreleri, şekil parametresi için 1.58 ve boyut parametresi için 2.9 m/s bulunmuştur.

İTÜ RT-1 1.8 kW rüzgar türbini için sahada yapılan performans analizlerinin sonuçlarına göre kapasite faktörü (C_p) 0.04 olarak bulunmuştur. Kapasite faktörünün bu kadar küçük çıkmasının ana nedenleri:

- Türbinin bulunduğu konumda hakim rüzgar yönü, İstanbul'un genelinde olduğu gibi kuzey-kuzeydoğudur. Rüzgar türbininin kuzey-kuzeydoğu tarafında enstitü binası yer almaktadır
- Enstitünün orta bahçesinde bulunan çam ağaçları, rüzgar türbininin konumundaki rüzgarı olumsuz etkilemektedir.

Türbin konumu değiştirilirse veya kule yükseltilirse kapasite faktöründe artış görülecektir.

Türbin 9 m/s rüzgar şiddetlerinde 1.8 kW anma gücüne ulaşmaktadır. 11.2 m/s'de ise 3.720 kW güç üretimi görülmüştür.

10-11 m/s rüzgar hızlarında türbin 340 devir/dakika hızlara ulaşmaktadır.

Türbinin güç çarpanı 6 m/s gibi rüzgar şiddetlerinde 0.9 değerine ulaşmaktadır.

KAYNAKLAR

- Barutçu, B.**, 2008. *Wind Energy & Conversion Technology Lecture Notes*
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E.**, 2001: *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons Ltd, England, 0-471-48997-2 .
- Carlin, P. W., Laxson, A.S. and Muljadi E.B.**, 2001. The History and State of the Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology, *Technical Report*, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, NREL/TP-500-28607
- Divone, L. V.**, 1994: Evolution of Modern Wind Turbines, in *Wind Turbine Technology*, p.109-110, Ed. Spera, D., A., ASME Press, New York
- DNV-GEC**, 2005. *Wind Turbine Technology Overview*, New York State Energy Research and Development Authority, Albany, New York, USA
- Dom, W.L.**, 1975: *Meteorology*, 4th edition, Mc. Graw-Hill Book Company. p. 518.
- Durak, M.**, 2000. *Rüzgâr Enerjisi Teknolojisi ve Türkiye Uygulaması, Akhisar Rüzgâr Elektrik Santrali*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü
- Durak, M. ve Özer, S.**, 2007: *Rüzgar Enerjisi: Teori ve Uygulama*
- Eggleston, D. M. and Stoddard, F. S.**, 1987: *Wind Turbine Engineering Design*, Van Nostrand Reinhold
- ETKB**, 2009. *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Stratejik Planı 2010-2014*, p16-17, Ankara
- Gape, P.**, 2009: *Wind Energy Basics A Guide to Home- and Community –Scale Energy Systems*, Chelsea Green Publishing Company White River Junction, Vermont, 978-1 -60358-030-4
- Hau, E.**, 2006: *Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd ed, Springer, Berlin, Germany, 10 3- 540- 24240- 6
- Johnson, G. L.**, 2001: *Wind Energy Systems*, Electronic Edition, Manhattan, USA
- Lynette, R., and Gipe, P.**, 1994: Commercial Wind Turbine Systems and Applications, in *Wind Turbine Technology*, p.149-150, Ed. Spera, D., A., ASME Press, New York
- Manwell, J. F., McGowan, J. G. and Rogers A.L.**, 2002: *Wind Energy Explained, Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons, Ltd, University of Massachusetts, Amherst, USA, 0-470-84612-7
- Patel, M.R.**, 1999: *Wind And Solar Power Systems*, CRC Press, USA, 0-8493-1605-7

- Rüstemoğlu, S.**, 2010. *Akış Alan Modellemesi ve İstatiksel Enerji Öngörüsü: Maslak Örneği*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü
- Savino, J. M.**, 1974. A Brief Summary Of The Attempts To Develop Large Wind-Electric Generating Systems In The U. S., *NASA Technical Memorandum*, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, NASA TM X-71605
- Spera, A., D.**, 1994: Wind Turbine Technology, Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, ASME Press, New York, 0-7918-1205-7
- Shepherd, D., G.**, 1994: Historical Development of The Windmill, in Wind Turbine Technology, p.2, Ed. Spera, D., A., ASME Press, New York
- Şaylan, L.**, 2009. Meteorolojik Aletler ve Gözlem Usulleri Dersi Notları
- T.C. Resmi Gazete S.25639**, 2004. Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenliliği ve Kalitesii Yönetmeliği
- T.C Resmi Gazete S.25819**, 2005. Kanun No:5346, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun
- T.C Resmi Gazete S.26510**, 2007. Kanun No: 5627, Enerji Verimliliği Kanunu
- T.C Resmi Gazete S.27007**, 2008. Elektrik İletimi Sistemi: Arz Güvenliliği ve Kalitesi Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik
- T.C Resmi Gazete S.27227**, 2009. Kyoto Protokolü, Milletler Arası Sözleşme
- Url-1** < <http://www.windpower.org/>>, alındığı tarih 27.11.2009.
- Url-2** < <http://www.eere.energy.gov/>>, alındığı tarih 05.12.2009.
- Url-3** < http://en.wikipedia.org/wiki/Yaw_system >, alındığı tarih 18.11.2009.
- Url- 4** < http://tr.wikipedia.org/wiki/Kyoto_Protokolü >, alındığı tarih 11.01.2010.
- Url-5** < <http://www.free-online-private-pilot-ground-school.com/Aviation-Weather-Principles.html> >, alındığı tarih 30.11.2009.
- Url-6** < <http://www.southwestclimatechange.org/files/cc/figures/hadley.jpg>>, alındığı tarih 15.11.2009.
- Url-7** < <http://www.free-online-private-pilot-ground-school.com/images/sea-land-breeze.gif> >, alındığı tarih 27.10.2009.
- Url-8** < http://www.colorado.edu/geography/class_homepages/geog_3251_sum08/08_mtn_val_breeze.jpg >, alındığı tarih 27.10.2009.
- Url-9** < http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine >, alındığı tarih 03.12.2009.
- Url-10** < <http://odonphoneman.com/weather/DavisVantagePro2.jpg>>, alındığı tarih 06.02.2010.
- Url-11** < http://www.skylinetechnology.co.uk/images/Wireless_VantagePro2_large.jpg>, alındığı tarih, 06.02.2010.
- Ültanır, M. Ö.**, 1996. Yel Değirmenlerinden Günümüze Rüzgâr Enerjisi, Bilim Teknik Dergisi, Nisan 1996

- Wang, F., Bai, L., Fletcher, J., Whiteford, J. and Cullen, D., 2008:** The Methodology For Aerodynamic Study On A Small Domestic Wind Turbine With Scoop, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96, 1–24
- WMO, 2006.** Instruments and observing methods, Report No: 87, WMO TD No:1307.
- WWEA, 2010.** World Wind Energy Assossication Report 2009, WWEA Head Office, Bonn, Germany

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Derya Alyamaç

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul 1984

Lisans Üniversite: İTÜ-Fizik Mühendisliği (2007)