

**T.C.  
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ**

**RÜZGAR KAYNAĞI BELİRLEME  
VE RÜZGAR TÜRBİNİ YERLEŞİM  
TASARIMI ÜZERİNE BİR  
UYGULAMA**

**Yüksek Lisans Tezi**

**MUSTAFA SÜEL**

**İSTANBUL, 2013**



**T.C.  
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENERJİ VE ÇEVRE YÖNETİMİ**

**RÜZGAR KAYNAĞI BELİRLEME  
VE RÜZGAR TÜRBİNİ YERLEŞİM  
TASARIMI ÜZERİNE BİR  
UYGULAMA**

**Yüksek Lisans Tezi**

**MUSTAFA SÜEL**

**Tez Danışmanı: PROF. DR. M. BARIŞ ÖZERDEM**

**İSTANBUL, 2013**

T.C.

**BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENERJİ VE ÇEVRE YÖNETİMİ**

Tezin Adı: Rüzgar Kaynağı Belirleme Ve Rüzgar Türbini Yerleşim Tasarımı Üzerine Bir Uygulama

Öğrencinin Adı Soyadı: Mustafa SÜEL

Tez Savunma Tarihi: 07/06/2013

Hazırlanan bu çalışma Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu' nun .././.... tarih ve ...../..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Tunç BOZBURA

.....

Hazırlanan bu çalışmada; tez gerekli şartlarının yerine getirildiği kabul edilmiştir.

Program Koordinatörü

Doç. Dr. Göksel DEMİR

.....

Mustafa SÜEL tarafından Prof. Dr. M. Barış ÖZERDEM danışmalığında hazırlanan “Rüzgar Kaynağı Belirleme ve Rüzgar Türbini Yerleşim Tasarımı Üzerine Bir Uygulama” başlıklı bu çalışma Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

İmza

Prof. Dr. M. Barış Özerdem

.....

Prof.Dr. Oktay Özcan

.....

Doç.Dr.Yıldız Arıkan

.....

## TEŐEKKÜR

Yapmış olduğum tez çalıőmam sũresince rũzgar enerjisi sektũrũndeki tecrũbeleriyle bana katkıda bulunan, ilgi ve desteğini esirgemeyen, tez danıőmanım Prof. Dr. M. Barış ÖZERDEM' e, Őėrenimim boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen dayım Hasan RAHVALI' ya, çalışmada yer alan verileri kullanmama olanak sağlayan değerli Ağaoğlu Enerji Grubu Yũnetimi' ne, son olarak bugũnlere gelmemde her zaman yanımda hissettiğim anneme ve babama teőekkũr ederim.

## ÖZET

### RÜZGAR KAYNAĞI BELİRLEME VE RÜZGAR TÜRBİN YERLEŞİM TASARIMI ÜZERİNE BİR UYGULAMA

Mustafa Süel

Enerji ve Çevre Yönetimi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Barış Özerdem

Mayıs 2013, Sayfa: 101

Bu çalışmada öncelikle; rüzgar enerjisinin tarihçesi, rüzgar enerjisi ile ilgili tanımlar, dünyada ve Türkiye’ de rüzgar enerjisinin son durumları ve rüzgar için güç ve enerji denklemleri verilmiştir.

İkinci olarak; rüzgar potansiyelinin belirlenmesinde gerekli olan ölçüm parametreleri ve ölçüm ekipmanları tanıtarak, Seferihisar-İzmir’ de bulunan bir sahaya ait rüzgar ölçüm istasyonundan(İz\_Sef RÖİ) elde edilen veriler WindPRO ve WAsP yazılımları aracılığıyla analiz edilmiş ve 5 farklı rüzgar türbini için uygun yerleşimler tasarlanmıştır.

Sonuç olarak, yapılan uygulama çalışmasıyla, söz konusu sahanın herbir türbin için sahanın kapasite faktörleri ve elde edilebilecek enerji değerleri hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgar enerjisi, rüzgar ölçümleri, rüzgar kaynak değerlendirmesi, türbin yerleşimi.

## ABSTRACT

### A CASE STUDY APPLICATION ON WIND RESOURCE ASSESSMENT AND MICROSITING

Mustafa Süel

Energy and Environment Management

Supervisor: Prof. Dr. M. Barış Özerdem

May 2013, Page: 101

In this study firstly; wind energy history, definitions and general knowledge about wind energy, the latest status of wind energy in the world and in Turkey and power and energy equations for wind are given.

Secondly, the measurement parameters and equipment that required for determining of wind potential are introduced and data which were collected on a site, located in Seferisihsar-İzmir(İz\_Sef) design were analyzed by WindPRO and WAsP softwares for 5 different wind turbines in order to the best micrositing.

As a result, capacity factor and energy production of this case site were calculated for each turbine.

**Key Words:** Wind energy, wind measurement, wind resource assessment, micrositing

## İÇİNDEKİLER

TABLolar DİZİNİ .....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
KISALTMALAR .....	xiv
SEMBOLLER .....	xv
1.GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER .....	4
2.1 RÜZGARIN TANIMI .....	4
2.2 RÜZGAR ÇEŞİTLERİ .....	5
2.2.1 Sürekli Rüzgarlar .....	5
2.2.2 Muson Rüzgarları .....	5
2.2.3 Yerel Rüzgarlar .....	5
2.3 RÜZGAR ENERJİSİ TARİHÇESİ .....	7
2.4 RÜZGAR HIZINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER .....	8
2.4.1 Türbülans Etkisi .....	8
2.4.2 Tünel Etkisi .....	8
2.4.3 Tepe Etkisi .....	9
2.4.4 Yüzey Pürüzlülük Etkisi .....	9
2.4.4.1 Yüksekliğe bağlı rüzgar hızındaki değişim .....	10
2.5 DÜNYA' DA RÜZGAR ENERJİSİ GÖRÜNÜMÜ .....	10
2.6 TÜRKİYE' DE RÜZGAR ENERJİSİ GÖRÜNÜMÜ .....	14



2.7 RÜZGAR İÇİN GÜÇ VE ENERJİ DENKLEMLERİ .....	19
2.7.1 Kapasite Faktörü Hesabı .....	25
2.8 WEIBULL DAĞILIMI .....	26
3. LİTERATÜR TARAMASI .....	28
4. VERİ VE YÖNTEM .....	34
4.1 RÜZGAR ÖLÇÜM SİSTEMLERİ .....	34
4.1.1 Ölçüm Parametreleri ve Ekipmanlar .....	34
4.1.1.1 Rüzgar hızı .....	34
4.1.1.1.1 <i>Anemometre kalibrasyonu</i> .....	36
4.1.1.2 Rüzgar yönü .....	37
4.1.1.3 Sıcaklık ve bağıl nem .....	38
4.1.1.4 Basınç .....	38
4.1.2 Veri Kaydediciler .....	38
4.1.3 Solar Güç Desteği .....	40
4.1.4 Rüzgar Ölçüm Direkleri .....	40
4.2 İZ_SEF RÜZGAR ÖLÇÜM İSTASYONU .....	42
4.3 YÖNTEM .....	45
4.3.1 Witerm 3.0 Yazılımı .....	46
4.3.2 WindPRO 2.8 Yazılımı .....	46
4.3.2.1 BASİS modülü .....	48
4.3.2.2 METEO modülü .....	49
4.3.2.3 MODEL modülü .....	50

4.3.2.4 OPTIMIZE modülü .....	51
4.3.2.5 PARK modülü .....	51
4.3.2.5.1 <i>N.O.Jensen park etkisi modeli</i> ...	52
4.3.3 WAsP Yazılımı .....	53
4.3.3.1 Engel perdeleme modeli .....	54
4.3.3.2 Orografik model .....	54
4.3.3.3 Pürüzlülük değişim modeli .....	55
4.3.4 WindPRO ve WAsP Yazılımları İçin Model ve Girdi Parametreleri .....	56
4.3.4.1 Topografik harita ve rüzgar verisi .....	56
4.3.4.2 Eşyüksekti çizgileri verisi .....	57
4.3.4.3 Pürüzlülük haritası .....	58
4.3.4.4 Rüzgar istatistikleri .....	59
4.3.4.5 Rüzgar türbinleri ve güç eğrisi .....	59
<b>5.BULGULAR .....</b>	<b>60</b>
<b>5.1. ÖLÇÜM PARAMETRELERİNE AİT İSTATİSTİKİ     BULGULAR .....</b>	<b>60</b>
5.1.1 Ortalama Rüzgar Hızı .....	60
5.1.2 Rüzgar Gülü .....	62
5.1.3 Sıcaklık, Nem ve Basınç Analizi .....	63
5.1.4 78.5 m için Weibull Dağılımı .....	64
5.1.5 Türbülans Analizi .....	65
<b>5.2. KULLANILACAK RÜZGAR TÜRBİNLERİ .....</b>	<b>65</b>

<b>5.3 ÇALIŞMA ALANINDAKİ RÜZGAR KAYNAK HARİTALARI .....</b>	<b>66</b>
<b>5.4 TÜRİN YERLEŞİM OPTİMİZASYONU .....</b>	<b>67</b>
<b>5.5 RÜZGAR ÇİFTLİĞİ ENERJİ HESAPLAMALARI .....</b>	<b>68</b>
<b>6.TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>72</b>
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>75</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>83</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>101</b>

## TABLULAR

Tablo 2.1: Yüzey pürüzlülük sınıfları ve buna bağlı pürüzlülük uzunlukları .....	9
Tablo 4.1: Ölçüm sensörleri tablosu .....	43
Tablo 5.1: Farklı yüksekliklerde aylık ortalama hız değerleri tablosu.....	61
Tablo 5.2: Aylık sıcaklık, nem ve basınç ortalamaları .....	63
Tablo 5.3: 78.5 m için Weibull veri tablosu .....	64

## ŞEKİLLER

Şekil 2.1: Dünyadaki rüzgar türleri .....	6
Şekil 2.2: Küresel kümülatif rüzgar kurulu gücü gelişimi .....	11
Şekil 2.3: Ülkelerin toplam kurulu güçteki kapasiteleri ve payları .....	11
Şekil 2.4: 2004-2012 yılları arası bölgelerde yıllık kurulmuş rüzgar kapasiteleri.....	13
Şekil 2.5: Dünya rüzgar enerji potansiyel atlası .....	13
Şekil 2.6: Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli atlası .....	15
Şekil 2.7: REPA'ya göre Türkiye rüzgar potansiyeli .....	15
Şekil 2.8: Türkiye rüzgar enerjisi kurulu gücü gelişimi .....	16
Şekil 2.9: Türkiye'de işletmedeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı .....	17
Şekil 2.10 Türkiye'de işletmedeki RES'lerin illere göre dağılımı .....	17
Şekil 2.11 Türbin üreticilerinin Türkiye' deki rüzgar kurulu gücündeki payları.....	18
Şekil 2.12: İdeal bir türbin modelinde rüzgar akış varyasyonu .....	21
Şekil 2.13: Güç katsayısı (Cp)-etkileşim faktörü(b) grafiği .....	24
Şekil 2.14 Rüzgar hızı için örnek bir Weibull diyagramı .....	27
Şekil 4.1: Anemometre türleri; (a) kepçeli anemometre, (b) ultrasonik anemometre (c) kanatlı anemometre .....	35
Şekil 4.2: Anemometre kalibrasyon sistemi .....	36
Şekil 4.3: NRG #200P rüzgar gülü .....	37
Şekil 4.4: a) Sıcaklık-nem sensörü, b) Basınç sensörü .....	38
Şekil 4.5: Veri Kaydedici Modelleri a) Ammonit Meteo 32x, b)	

Campbell CR 800, c) NRG System .....	39
Şekil 4.6: Solar panel .....	40
Şekil 4.7: a) Boru tipi ölçüm direği, b) Kafes tipi ölçüm direği .....	41
Şekil 4.8: Rüzgar ölçüm sisteminin temel bileşenleri .....	42
Şekil 4.9: İz_Sef RÖİ konumu .....	43
Şekil 4.10: İz_Sef RÖİ görünümü .....	44
Şekil 4.11: Witerm 3.0 yazılımı menüsü .....	46
Şekil 4.12: WindPRO “maps and objects” penceresi .....	47
Şekil 4.13: WindPRO ana menü .....	47
Şekil 4.14: “N.O. Jensen wake” modeli .....	52
Şekil 4.15: “N.O.Jensen wake” modeline göre rüzgar formu .....	53
Şekil 4.16: Rüzgar alan yamaç ve zirve akışının rüzgar profilleri .....	55
Şekil 4.17: “WindPRO” ve “WAsP” kullanarak rüzgar modelleme prosedürü .....	56
Şekil 4.18: 1:25000 ölçekli Topoğrafik harita .....	57
Şekil 4.19: SRTM-Eşyüksekti çizgileri verisi .....	58
Şekil 4.20: WinPRO yazılımında oluşturulmuş pürüzlülük haritası .....	58
Şekil 4.21: Çalışmada kullanılacak türbinlere ait güç eğrisi .....	59
Şekil 5.1: Rüzgar hız ve yön zaman serisi .....	60
Şekil 5.2: Aylık rüzgar hızı ortalama değerleri grafiği .....	61
Şekil 5.3: 78 m ve 65 m yüksekliklere ait rüzgar gülü .....	62
Şekil 5.4: Sektörlere göre rüzgar hızları ortalamaları .....	62

Şekil 5.5: 78.5 m için Weibull dağılımı .....	64
Şekil 5.6: Türbülans yoğunluğu grafiği .....	65
Şekil 5.7: 80 m yükseklikteki rüzgar hızına bağlı kaynak haritası .....	66
Şekil 5.8: 80 m yükseklikte güç yoğunluğuna bağlı kaynak haritası .....	67
Şekil 5.9: A-2,000 türbini için tahmini yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü .....	68
Şekil 5.10: B-1,600 türbini için tahmini yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü .....	69
Şekil 5.11: C-2,400 türbini için tahmini yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü. ....	70
Şekil 5.12:D-2,300 türbini için tahmini yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü .....	70
Şekil 5.13: E-1,800 türbini için tahmini yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü .....	71
Şekil 6.1:İzmir rüzgar enerjisi potansiyeli atlası .....	72

## KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
DMİGM	: Devlet meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
EİE	: Elektrik İşleri Etüd İdaresi
EWEA	: European Wind Energy Council (Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği)
GWEC	: Global Wind Energy Council (Global Rüzgar Enerjisi Konseyi)
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
MCP	: Measure-Correlate-Predict ( Ölç-Bağ Kur- Tahmin Et)
REPA	: Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası
RES	: Rüzgar Elektrik Santrali
RMSE	: Ortalama hata kareleri toplamının karekökü
RÖİ	: Rüzgar ölçüm İstasyonu
RT	: Rüzgar Türbini
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
TMMOB	: Türkiye Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
TÜREB	: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
US	: United States (Birleşik Devletler)
WAsP	: Wind Atlas Analysis and Application Program (Rüzgar Atlası Analiz ve Uygulama Programı)
YİD	: Yap İşlet Devret



## SEMBOLLER

Akış hızı	: $V$ , (m/s)
Düzeltilmiş ortalama rüzgar hızı	: $u'$ , (m/s)
Engelin yüksekliği	: $h$ , (m)
Engelin geçirgenliği	: $p$ ,
Engelin uzunluğu	: $L$ , (m)
Gama fonksiyonu	: $\Gamma$
$h_1$ yüksekliğindeki rüzgar hızı	: $V_1$ , (m/s)
$h_2$ yüksekliğindeki rüzgar hızı	: $V_2$ , (m/s)
Hesaplama noktasının engelden olan uzaklığı	: $x$ , (m)
Hesaplama noktasının yüksekliği	: $H$ , (m)
Havanın kesit alanı	: $S$ , (m <sup>2</sup> )
Havanın yoğunluğu	: $\rho$ , (kg/m <sup>3</sup> )
İvme	: $a$ , (m/s <sup>2</sup> )
Kinetik enerji	: $E$ , (Wh)
Kuvvet	: $F$ , (N)
Kütle akış hızı	: $\dot{m}$ , (kg/s)
Ortalama rüzgar hızı	: $V_{ort}$ , (m/s)
Oransal rüzgar hızı azalımı	: $R_1$
Ortalama rüzgar hızındaki azalma	: $R_2$
Performans katsayısı	: $C_p$
Pürüzlülük faktörünü	: $\alpha$
Pürüzlülük uzunluğu	: $Z_0$ , (m)
Referans rüzgar hızı	: $V_{ref}$ , (m/s)
Referans yüksekliğini	: $Z_{ref}$ , (m)
Rüzgar gücü	: $P$ , (W)
Rüzgar hızınının hesaplanacağı yükseklik	: $Z$ , (m)
$V_1$ hızının ölçüldüğü yükseklik	: $h_1$ , (m)
Rüzgar hızınının hesaplanacağı yükseklik	: $h_2$ , (m)
Standart Sapma	: $\sigma$ , (m/s)
Türbin maksimum çıkış gücü	: $P_t$ , (W)

Türbinin yıllık ürettiği gerçek enerji	: $E_{out, (Wh)}$
Türbinin yıllık üretebileceği maksimum enerji	: $E_{r, (Wh)}$
Weibull dağılımının birikimliolasılık yoğunluk fonksiyonu:	$F(v)$
Weibull dağılımı boyutsuz şekil parametresi	: $k$
Weibull dağılımı ölçek parametresi	: $c, (m/s)$
Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu	: $f(v)$

## 1. GİRİŞ

Sanayi ve endüstrinin vazgeçilmez temel unsuru olan enerji, günümüzde gelişmişliğin en önemli sembolü haline gelmiştir. Teknolojinin sürekli gelişmesi ve giderek artan insan nüfusu enerjiye olan talebi giderek arttırmaktadır. Bu sebeple ülkeler, artan talebi dengelemek adına enerjiyi daha verimli kullanmanın yanında temiz ve alternatif enerji kaynakları arayışına girmişlerdir.

Günümüzde tüketilen enerjinin büyük bir çoğunluğu fosil yakıt kaynaklı enerji türlerinden karşılanmaktadır. Fosil yakıtların hem tükenebilir olması hem de sera gazı oluşumuna neden olarak iklim değişikliğine yol açması nedeniyle fosil yakıt kaynaklı enerji türlerinin üretimdeki payını azaltmaya yönelik çalışmalar başlatılmıştır. Bu yüzden hidro, jeotermal, güneş gibi enerji kaynaklarının yanında atmosferde serbest olarak bulunabilen yenilenebilir ve temiz enerji kaynağı olan rüzgar enerjisine gereksinim gün geçtikçe artmıştır. Gelişmiş ülkeler önümüzdeki yıllar içerisinde yenilenebilir enerjinin toplam üretim içerisindeki payını arttırmak adına stratejiler geliştirmektedirler. Avrupa Birliği (AB) 2020 yılına kadar yenilenebilir enerjinin toplam enerjideki payını yüzde 20, 2030 yılında ise yüzde 30 olarak hedeflemiştir. Bu payın artmasında şüphesiz ki rüzgar enerjisinin rolü büyük olacaktır. Ülkemiz de bu manada ciddi çalışmalar yapılmaktadır. Hükümet tarafından hazırlanan arz güvenliği strateji belgesine göre 2023 yılında rüzgar enerjisi kurulu gücünün 20.000 MW olması hedeflenmektedir. Verilen hedefe ulaşabilmesi adına yatırımcılar için çeşitli teşvik mekanizmaları geliştirilmiştir. Bunun yanında ülkemizin büyük bir rüzgar potansiyeline sahip olması ve rüzgar teknolojisi maliyetlerinin gün geçtikçe azalması birçok yatırımcıyı da bu sektöre yönlendirmektedir.

Rüzgar enerji santrali kurulması için planlanan bölgede potansiyel belirleme çalışmaları iyi bir yatırım için olmazsa olmaz niteliğindedir. Planlanan bölgenin rüzgar potansiyelinin belirlenebilmesi için öncelikle bazı teknik parametrelerin bilinmesi gerekir. Temel parametreler rüzgar hızı ve yönü, sıcaklık, nem ve basınçtır. Bu parametrelerin değerlerini ölçen sensörlerin birada bulunduğu ve kayıt edildiği yapıya ölçüm istasyonu adı verilir. Bu sensörler amaçlarına göre farklı yüksekliklere yerleştirilirler. Ölçülen parametre değerleri bölgenin rüzgar istatistiklerinin oluşturulması için uygun yazılımlarda analiz edilir ve bu sayede bölgenin rüzgar

potansiyeli durumu, konuşlandırılacak türbinlerin yerleri ve sahaya uygun türbin modelleri belirlenir. Ardından yapılacak yıllık enerji üretimi belirlenerek finansal fizibilite hazırlanır. Buna göre de projenin uygulanabilirliği incelenir.

Günümüzde rüzgar potansiyelini belirlemek için birçok yazılım geliştirilmiştir. Bu programların en bilindik olanı Rüzgar Atlası Analiz ve Uygulama Programı(WAsP)' dır. WAsP sayesinde sahanın rüzgar kaynak atlası oluşturularak rüzgar potansiyeli yüksek alanlar belirlenir. Günümüzde en sık kullanılan analiz programlarından biri de WindPRO' dur. Bu yazılım ise ölçülen parametre değerlerinin istatistiksel analizini yaparak WAsP aracılığı ile elde edilen rüzgar atlası üzerinde rüzgar çiftliği oluşturmak amacıyla uygun türbin yerlerinin belirlenmesini sağlamaktadır. WindPRO' da ayrıca oluşturulan rüzgar çiftliği için oluşabilecek kayıp ve belirsizlikleri de dahil ederek tesisin tahmini yıllık enerji üretimini hesaplamaktadır.

Bu çalışmada; Seferihisar-İzmir' de kurulu bulunan "İz\_Sef" rüzgar ölçüm istasyonundan alınan Eylül 2008-Haziran 2010 tarihleri arasına ait 21 aylık veriler kullanılarak WindPRO ve WAsP yazılımları yardımıyla bölgenin rüzgar potansiyeli belirlenmiştir. Daha sonra sahaya göre en uygun 5 farklı türbin modeli için yerleşim yerleri belirlenip yıllık enerji üretimlerinin hesaplanmıştır. Bu amaçla yaptığımız çalışma ile Türkiye Rüzgar Atlası çalışmalarına katkı sağlanması hedeflenmiş ve bölgenin rüzgar yatırımına uygunluğu irdelenmiştir.

Çalışmanın ana bölümlerini özetlenmiştir:

- Bölüm 2' de 'Genel Bilgiler' ana başlığı altında rüzgar oluşumu, çeşitleri, tarihçesi, dünyada ve Türkiye' de rüzgar durumu konularına değinilmiştir.
- Bölüm 3' de ' Literatür Taraması' ana başlığı altında konu ile ilgili daha önceden yapılan çalışmalar verilmiştir.
- Bölüm 4' de 'Veri ve Yöntem' başlığı altında rüzgar potansiyeli belirlemede gerekli olan parametreler ile İz\_Sef rüzgar ölçüm istasyonu hakkında bilgiler verilerek, çalışmada kullanılan yazılımlar tanıtılmıştır ve çalışmada izlenecek yöntem belirtilmiştir.
- Bölüm 5' de 'Bulgular' başlığı altında yapılan analizler sonucu ortaya çıkan istatistiksel bulgular, türbin yerleşim optimizasyonları ve enerji üretim hesaplamaları yapılmıştır.

- Bölüm 6' da ' Tartışma ve Sonuç' başlığı altında çalışmada elde edilen istatistiki bulgular ile bölgedeki iklim verileri karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar kısaca tartışılmıştır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 RÜZGAR TANIMI

Güneşin, yer yüzeyini ve atmosferi homojen ısıtmamasının bir sonucu olarak ortaya çıkan sıcaklık ve basınç farkından dolayı hava akımı oluşur. Bir hava kütlesi mevcut durumundan daha fazla ısınırsa atmosferin yukarısına doğru yükselir ve bu hava kütesinin yükselmesiyle boşalan yere, aynı hacimdeki soğuk hava kütlesi yerleşir. Bu hava kütlelerinin yer değiştirmelerine rüzgar adı verilmektedir. Diğer bir ifadeyle rüzgar; birbirine komşu bulunan iki basınç bölgesi arasındaki basınç farklarından dolayı meydana gelen ve yüksek basınç merkezinden alçak basınç merkezine doğru hareket eden hava akımıdır. Rüzgarlar yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına akarken; dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi, yüzey sürtünmeleri, yerel ısı yayılımı, rüzgar önündeki farklı atmosferik olaylar ve arazinin topografik yapısı gibi nedenlerden dolayı şekillenir. Rüzgarın özellikleri, yerel coğrafi farklılıklar ve yeryüzünün homojen olmayan ısınmasına bağlı olarak, zamansal ve yöresel değişiklik gösterir. Rüzgar hız ve yön olmak üzere iki parametre ile ifade edilir.

Metereolojik ve topografik açıdan rüzgarın olabileceği yerler şu şekildedir;

- Basınç gradyanının yüksek olduğu yöreler,
- Sürekli esen rüzgarlara paralel vadiler,
- Yüksek, engebesiz tepe ve platolar,
- Yüksek basınç gradyanlı düzlükler ve sürekli rüzgar alan az eğimli vadiler,
- Güçlü jeostrofik rüzgar alanlarının etkisinde kalan tepe ve zirveler,
- Jeostrofik rüzgar ve termal gradyan alanına sahip kıyı şeritleri.

Gerçekte rüzgarın hızı ve yönü en iyi şekilde hassas aletlerle ölçülmektedir. Aletlerle ölçmenin olanaksız olduğu durumlarda rüzgar, tahminsel de ölçülür. Tahminsel rüzgar ölçümünde Beaufort ölçeği kullanılır.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Rüzgar enerjisi. 2012. <http://www.eie.gov.tr>. [erişim tarihi 02.12.2012].

## 2.2 RÜZGAR ÇEŞİTLERİ

### 2.2.1 Sürekli Rüzgarlar

Alize rüzgarları; 30° kuzey ve 30° güney enlemlerindeki dinamik yüksek basınç alanlarından, Ekvator' daki termik alçak basınç alanına doğru esen rüzgârlardır. Sürekli olmaları ve yönlerinin belli olması nedeniyle, yelkenli gemiler döneminde bu rüzgârlardan faydalanılmıştır. Bu nedenle bu rüzgârlara ticaret rüzgârları (trade winds) da denilmiştir.

Batı rüzgarları; 30° kuzey enlemlerindeki dinamik yüksek basınç alanlarından, 60° enlemlerindeki dinamik alçak basınç alanlarına doğru esen rüzgârlardır.

Kutup rüzgârları; kutuplardaki termik yüksek basınçlardan, 60° kuzey enlemlerindeki dinamik alçak basınç alanlarına doğru esen rüzgârlardır.<sup>2</sup>

### 2.2.2 Muson Rüzgarları

Asya kıtası ile Hint okyanusu arasındaki sıcaklık farklılıkları ile oluşan mevsimsel kararlı rüzgarlardır. Yaz aylarında Asya Kıtası güçlü bir şekilde ısınmaktadır ve alçak basınç merkezi meydana gelmektedir. Deniz yüzeyi sıcaklıkları biraz daha düşüktür. Haziran ayı başında soğuk nemli rüzgar, Hint Okyanusu' ndan Hindistan içlerine doğru eser. Bu, güney batı muson rüzgarlarının başlangıcıdır. Haziran ayından Eylül ayına kadar sürekli eserek Hindistan' a büyük miktarda yağış getirmektedir. Kışın, kıta soğumaktadır ve bunun akabinde yüksek basınç alanı meydana gelmektedir. Muson rüzgarları, Afrika ve Güney Amerika' da da meydana gelmektedir, fakat Hindistan' daki kadar güçlü değildir.

### 2.2.3 Yerel Rüzgarlar

Yeryüzündeki rüzgar atmosferik genel sirkülasyonu ile yakından ilgilidir. Bununla birlikte Şekil 2.1' de gösterilen yerel etkiler de son derece önemlidir.

Meltem rüzgârları; gün boyunca oluşan sıcaklık ve basınç farkları sonucu meydana gelirler. Türlerine göre kara ve deniz rüzgarları olarak isimlendirilirler.

---

<sup>2</sup> *Dünya üzerinde rüzgar çeşitleri*. 2006. <http://www.gozlemci.net>. [erişim tarihi: 02.12.2012].

Fön; hava akışının dağları tırmandıktan sonra dağın arka kısmında hareketine devam ederek inerken bıraktığı sıcak havadır. Ülkemizde İç Anadolu Bölgesinin kurak olması bu rüzgarlar ile açıklanabilir. Kuzey Anadolu' nun kuzey eteklerinde de görülür.

Sirokko; sıcak, kuru ve tozlu bir rüzgardır. Fas ve Sahara' da görülür. Akdeniz' i geçerken nem alarak Yunanistan ve İtalya' ya sıcak ve nemli bir esinti getirir.

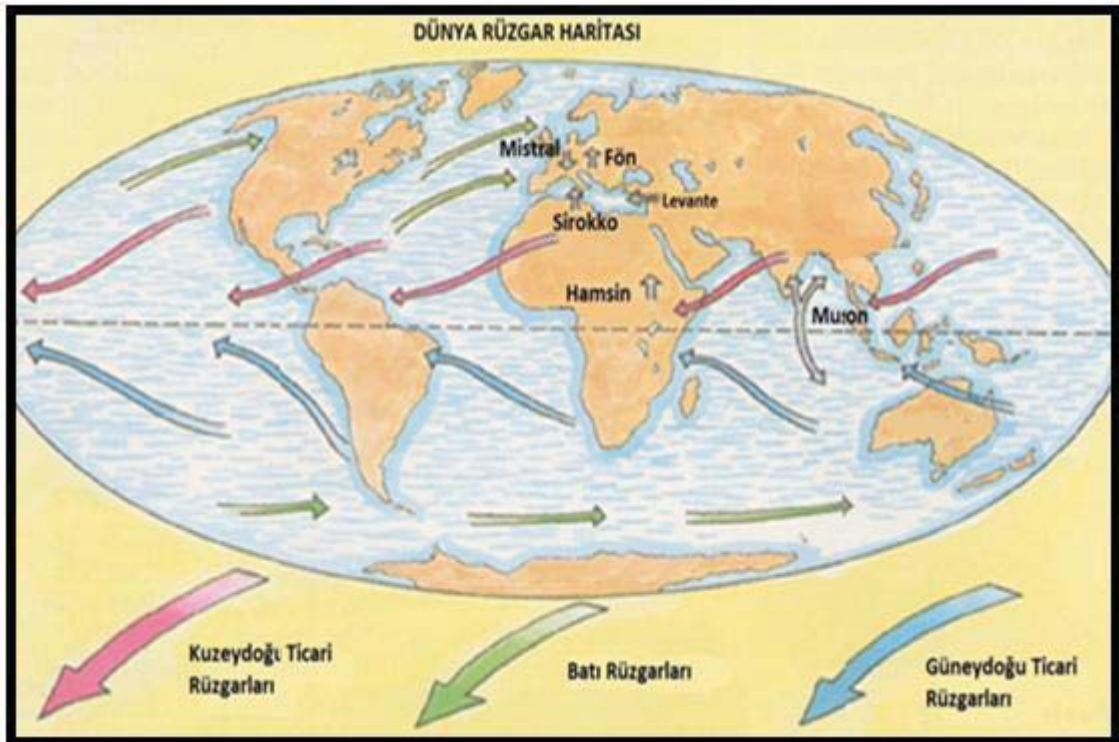
Hamsin; Sudan' dan gelen ve Mısır' dan Akdeniz'e doğru esen rüzgârdır. Sıcak, kuru ve boğucu bir rüzgârlardır.

Mistral; Fransa' da Provence sahilinde ve Rhone Deltası' nda esen güçlü bir rüzgardır. Kuzeybatılı olup soğuk ve kurudur.

Levante; İspanya' nın Akdeniz tarafındaki sahillerinde görülen doğulu bir rüzgardır.

Tropikal Rüzgârlar; sıcak kuşakta, ani basınç farklarından kaynaklanan ve hızları saatte 300 - 400 km' ye kadar çıkabilen rüzgârlardır. Daha çok okyanuslar üzerinde oluşurlar. (Durak ve Özer 2008, ss. 33-47).

### Şekil 2.1: Dünyadaki rüzgar türleri



Kaynak: Winds. 2001. <http://library.thinkquest.org>. [erişim tarihi: 02.12.2012].



### 2.3 RÜZGAR ENERJİSİ TARİHÇESİ

İnsanoğlunun rüzgarın gücünü keşfedip onun gücünden yararlanmaya başlaması çok eski dönemlere dayanır. Rüzgar gücünden ilk yararlanma şekli olarak yelkenli gemilerin hareket ettirilmesi ve yel değirmenlerinin çalıştırılması gösterilebilir. İlk kez M.Ö.2800 yıllarında Mısırlıların kürek mahkûmlarının gücüne ek olarak rüzgar enerjisini kullandıkları bilinmektedir. M.Ö.2000 yıllarında eski Mısır, Çin ve Japonya’ da tahıl öğütme işleminde kullanmak için yel değirmenleri icat edilmiştir (Şimşek 2007, s. 4). İlk rüzgar elektriği de, Danimarkalı Profesör Paul La Cour tarafından 1891 yılında üretildi. Doğru akım elde eden Paul La Cour, elektroliz yoluyla hidrojen gazı elde etti ve bu şekilde rüzgar enerjisini depolamış oldu. 1918 yılı sonrasında büyük şehirler elektriğe kavuşmuş ve dizel yakıtların ucuzluğu nedeniyle rüzgar enerjisini değerlendirme çabaları, uzun süre bir kenara bırakılmıştır (Özgener 2002, s.159). 1941 yılında Amerika Birleşik Devletleri(ABD)’ nde Vermont yakınlarında Granpa’s Knop’da kurulan Putnam rüzgar türbini 1250 kW gücü ile dönemin en büyük rüzgar türbini olmuştur. İki kanatlı rotorun çapı 53 m idi. Putnam türbini, modern rüzgar türbinlerinin ilkidir. 1947 yılında Danimarka’da başlatılan ve modern yaklaşımlar içeren elektrik üretim amaçlı bir başka çalışmanın son ürünü ise 1959 yılında işletmeye sokulan 200 kW’ lık Gedser türbini olmuştur. Bu türbininin 24 metre çaplı rotoru ve üç kanadı vardı(Türkçü 2005, ss.11-12). Her ne kadar 2. Dünya Savaşından itibaren rüzgar türbini tasarımı çalışmaları artsa da fosil yakıtların ucuzluğu nedeniyle uzun yıllar benimsenmemiştir.

1970’ li yıllardaki petrol krizi nedeniyle alternatif enerji kaynağı olarak rüzgar enerjisi yeniden hatırlanmış ve bundan sonra, rüzgar türbinlerinin seri üretime geçilmesi ile, bu alandaki yatırımlar gittikçe artan oranlarda gelişmiş ve rüzgar santralleri oluşturulmaya başlanmıştır (Özerdem 2003, s.2). Özellikle 1990’lı yıllarda ortaya çıkan çevre bilinci; fosil kaynaklara dayalı enerji üretim ve tüketiminin yerel, bölgesel ve küresel seviyede çevreye ve doğal kaynaklara doğrudan ve dolaylı olumsuz etkilere neden olduğunun anlaşılmasını sağlamış ve hızla gelişen teknolojiyle rüzgar enerjisi, alışılmış enerji kaynaklarına alternatif olmaya başlamıştır (Sevim ve Varlıklı 2009, s.2).

## **2.4 RÜZGAR HIZINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER**

Rüzgâr şiddetinin kısa dönem değişkenliği; rüzgârın en önemli özelliklerinden birisidir. Rüzgâr şiddeti çok küçük dönemlerle daima değişen dalga özelliği göstermektedir. Değişmenin büyüklüğünün nasıl olduğu havaya, yüzey koşullarına ve engellere bağlıdır. Havaya bağlı rüzgar hızındaki değişimler genellikle sıcaklık değişimine bağlıdır. Deniz yüzeyi ve kara yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının gündüz geceden daha fazla olmasından dolayı birçok yerde gündüzleri gecelerden daha rüzgarlıdır

### **2.4.1 Türbülans Etkisi**

Çok engebeli ve pürüzlü arazilerde binalar, ağaçlar gibi engeller çok fazla türbülans yaratır. Türbülans, düzenli olmayan rüzgâr akışıdır. Bu akış çevrede dönme ve vorteks yaratır. Türbülans, rüzgâr türbininde, rüzgârdan enerji üretim verimliliğini azaltır. Türbülans, türbinde yıpranma, hasarlara ve bozulmalara neden olur. Kulelerin genellikle yüksek yapılmasının bir nedeni, hem türbülansdan kaçınmak hem de şiddetli rüzgârdan daha çok yararlanıp daha çok elektrik üretmektir. Düşük türbülans yoğunluğu, rüzgâr türbinleri için ömürlerinin daha uzun olmasını sağlar. Denizlerde türbülans karadan daha azdır bu nedenle denize kurulan türbinler karaya kurulanlardan daha uzun ömürlüdür.

### **2.4.2 Tünel Etkisi**

Daha çok binalar arasında veya dar dağ geçitlerinde bu etkiye rastlanır. Hava, bina veya dağların rüzgârlı kısımlarında sıkışır; rüzgâr şiddeti belirgin bir oranda artar. Buna tünel etkisi denir. Rüzgâr şiddeti açık arazide 6 m/s ise doğal tünel etkisi nedeniyle 9 m/s ye ulaşabilir. Bu tür yerlerde rüzgâr türbini yerleşimi çok iyi bir yöntemdir. Bununla birlikte dikkatli olunması gerekir. Eğer siteyi çevreleyen arazi üniform değilse, bununla beraber tepeler çok kaba ve pürüzlü ise, çok türbülanslı bir yapı teşekkül eder. Buna bağlı olarak her yönde çok hızlı değişiklikler olur. Bu durumda türbülans hasebiyle rüzgârında fazla olma avantajı tümüyle ortadan kalkar. Türbülans, türbinde bozulma ve yıpranmalara sebebiyet verir.

### 2.4.3 Tepe Etkisi

Arazide türbinleri en iyi yerleştirilecek yer, hâkim tepe ve sırtlarıdır. Bu durumu arazide baskın rüzgâr yönü açısından olabildiğince üstünlük sağlar. Ayrıca, tepelerde rüzgâr şiddeti, çevre arazilerden genellikle daha fazladır. Düzgün ve pürüzsüz olmayan tepelerde yüksek rüzgâr şiddetinin fazla olmasına karşın türbülans önemli bir olumsuzluk oluşturur(Karadeli 2001, ss. 1-30).

### 2.4.4 Yüzey Pürüzlülük Etkisi

Rüzgar hızı 1 km' lik yüksekliğe kadar yeryüzü engebeliğinden etkilenebilir. Engebelik ne kadar fazla ise rüzgar hızında da azalmalar o kadar fazla olur. Tablo 1.1' de farklı pürüzlülük uzunlukları ve sınıflarına değerlerine göre rüzgar enerjisine etki durumları verilmiştir. Su yüzeyi rüzgarı en az etkileyen, orman ve yüksek binalara sahip şehirler ise rüzgar hızına en çok etki eden pürüzlülüktedir. Rüzgar türbinlerinin enerji verimliliği ve uygun rüzgar koşullarını değerlendirmek için uygun arazi pürüzlülük değerleri önem taşımaktadır.

**Tablo 2.1: Yüzey pürüzlülük sınıfları ve buna bağlı pürüzlülük uzunlukları**

Pürüzlülük Sınıfı	Pürüzlülük Uzunluğu (m)	Enerji İndeksi(%)	Arazi Tanımı
0	0.0002	10	Su Yüzeyi
0,5	0.0024	73	Tamamıyla açık alan, düzgün bir yüzey, hava alanlarındaki beton yollar, çayır ekili alanlar
1	0.03	52	Açık tarım alanı, dağınık binalar. Sadece yumuşak düzgün tepeler
1,5	0.055	45	Birkaç binanın bulunduğu tarım alanı. Yaklaşık 1250 m.lik aralıklarla 8m lik barınakların bulunduğu alan
2	0.1	39	Birkaç binanın bulunduğu tarım alanı. Yaklaşık 500 m.lik aralıklarla 8m lik barınakların bulunduğu alan
2,5	0.2	31	Çok sayıda ev, çalılık alanı. Yaklaşık 250 m.lik aralıklarla 8m lik barınakların bulunduğu alan
3	0.4	24	Köyler, küçük kasabalar, çok sayıda uzun çitlerin bulunduğu tarım alanı, orman, çok pürüzlü ve düz olmayan alan
3,5	0.8	18	Büyük şehirler, yüksek binalar
4	1.6	13	Metropoller,gökdelener

Kaynak: M.Ragheb, 2012 *wind shear, roughness classes and turbine energy production*. Haziran 2012.

#### 2.4.4.1 Yüksekliğe bağlı rüzgar hızındaki değişim

Rüzgar hızı, yerden yüksekliğe bağlı olarak belirgin bir değişkenlik gösterir. Bilinen belirli bir yükseklikteki rüzgar hızı kullanılarak, herhangi bir yükseklikteki rüzgar hızı bulunabilir. Yüksekliğe bağlı olarak rüzgar hızı iki şekilde bulunabilmektedir; Birincisi;

$$V(z) = V_{ref} \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_{ref}}{z_0}} \quad (2.1)$$

Burada; ( $V_{ref}$ ) referans rüzgar hızı, ( $Z$ ) rüzgar hızının hesaplanacağı yüksekliği, ( $Z_0$ ) pürüzlülük uzunluğu, ( $Z_{ref}$ ) referans yüksekliğini belirtir (Ragheb M. 2012).

“Denklem 2.2” ise; rüzgar hızının yükseklikle değişimini veren “Hellman Bağıntısıdır”.

$$\frac{V_1}{V_2} = \left[ \frac{h_1}{h_2} \right]^\alpha \quad (2.2)$$

Burada; ( $h_1$ )  $V_1$  hızının ölçüldüğü yükseklik, ( $h_2$ ) rüzgar hızının hesaplanacağı yükseklik, ( $V_1$ )  $h_1$  yüksekliğindeki rüzgar hızı, ( $V_2$ )  $h_2$  yüksekliğindeki rüzgar hızı, ( $\alpha$ ) pürüzlülük faktörünü göstermektedir (Kesme faktörü 0.1-0.4 değerleri arasındadır).

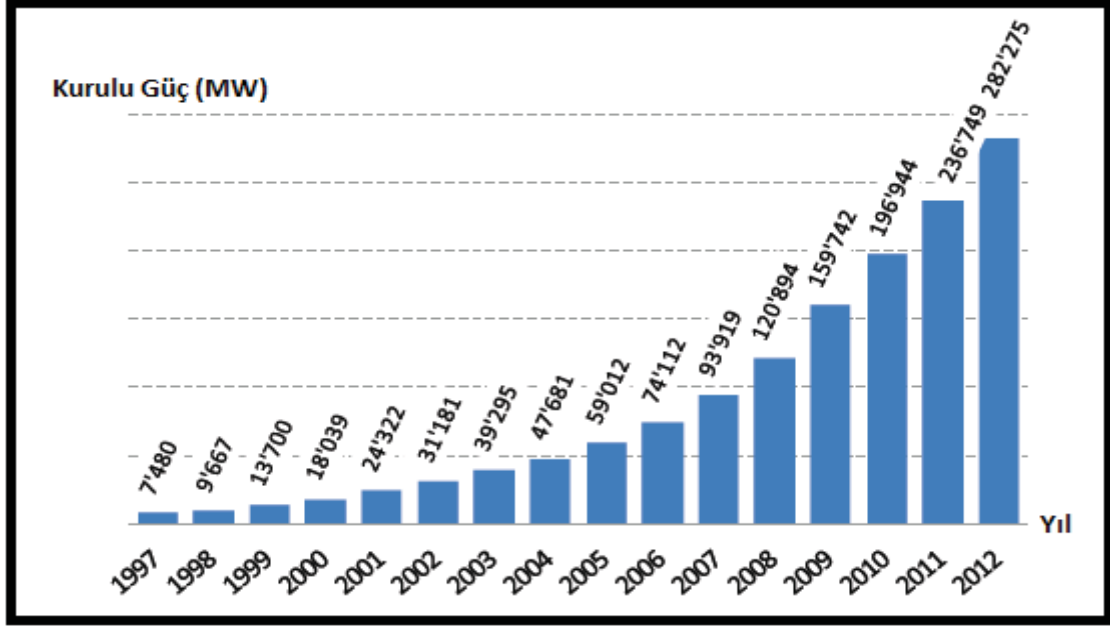
$\alpha$ : 0,1 ise su ve buz yüzeyini,  $\alpha$ : 0.14 ise küçük ot ve bozkırları,  $\alpha$ : 0.2 ise engebeli kırsal alanları,  $\alpha$ : 0.25 ise ormanlık alan ve küçük yerleşimleri tanımlamaktadır. (Çubukçu M. ve Özdamar A. 2003)

## 2.5 DÜNYADA RÜZGAR ENERJİSİ GÖRÜNÜMÜ

1996 yılından itibaren kümülatif rüzgar kurulu gücü logaritmik olarak artış göstermiştir. Şekil 2.2’ de görüldüğü üzere 1997 yılında kümülatif rüzgar kurulu gücü 7,480 MW iken 2012 yılı sonu itibariyle kurulu güç 282,275 MW olmuştur. 2012 yılı içerisinde 44,609 MW gücünde rüzgar enerji santralini devreye alınmıştır. Böylelikle 2012 yılı sonu itibariyle küresel rüzgar enerji pazarı yüzde 19.2 büyümüştür. 2012 yılı sonunda tüm dünyadaki rüzgar enerji santralleri potansiyel olarak 580 TWh’lık elektrik

enerjisine katkıda bulunmuştur. Bu değer 2012 yılı sonunda dünyadaki toplam elektrik talebinin yüzde 3'den fazlasına karşılık gelmektedir. Dünyadaki rüzgar enerji santrali (RES) yatırımları Kuzey Amerika, Avrupa ve Asya' da yoğunlaşmış bulunmaktadır.

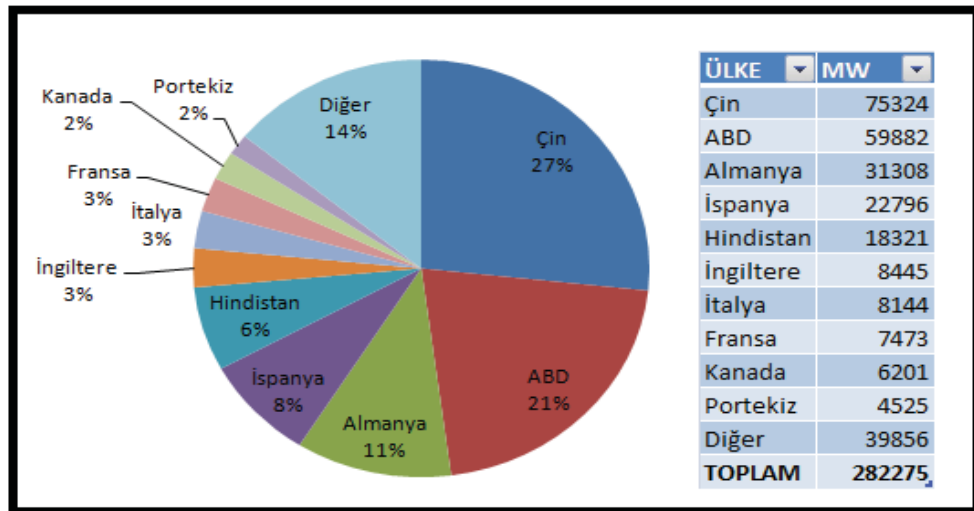
**Şekil 2.2: Küresel kümülatif rüzgar kurulu gücü gelişimi**



Kaynak: WWEA, 2012 Report, 2013. [www.windea.org](http://www.windea.org) [Erişim Tarihi: 17.05.2013], s.5.

2012 yılı sonu itibariyle dünyada rüzgar kurulu gücü bakımından en büyük paya yüzde 37.9 ile Avrupa sahiptir. Ülke bazında ise Şekil 2.3' de görüldüğü gibi Çin rüzgar kurulu gücü bakımından yüzde 26.8'lik pay ile lider konumdadır.

**Şekil 2.3: Ülkelerin toplam kurulu güçteki kapasiteleri ve payları**



Kaynak: WWEA, 2012 Report, 2013 [www.windea.org](http://www.windea.org) [Erişim Tarihi: 17.05.2013], s.18.

Avrupa 2007 yılında rüzgar enerjisi payının yüzde 60' lık kısmına sahipken son yıllarda Çin ve Hindistan'ın rüzgar enerjisine yapmış oldukları ciddi yatırımlar, Avrupa' nın rüzgar kurulu gücü bakımından dünyadaki baskın durumunu ciddi ölçüde azaltmıştır. 2012 yılı sonu itibari ile Avrupa rüzgar enerjisi kurulu gücü 106,915 MW seviyesine ulaşmıştır. Almanya(31,308 MW) ve İspanya(22,796 MW) sahip oldukları kurulu güç kapasiteleri ile Avrupa' da rüzgar enerjisinin lokomotif ülkeleri durumundadır.<sup>3</sup>

AB enerji kompozisyonunda 2000 yılında yüzde 2 olan rüzgar enerjisinin payını 2010'da yaklaşık 5 kat arttırarak yüzde 9.6' ya ulaşmıştır.2010 yılı sonu itibariyle AB'deki kurulu rüzgar gücü ile 181 TWh' lik enerji üretimi gerçekleştirilmiş ve enerji talebinin % 5.3 rüzgar enerjisiyle karşılanmıştır.<sup>4</sup> Diğer taraftan da toplam 126 milyon ton karbondioksit(CO<sub>2</sub>)' in salınması önlenmiştir. EWEA' nın taban senaryosu; 2020 yılına kadar Avrupa' daki kurulu kapasitenin 230 GW seviyesine ulaştırılarak 581 TWh' lik elektrik üretimi gerçekleştirmek ve bunun yanında yüzde 30 daha az emisyon elde ederek 342 milyon ton CO<sub>2</sub> salınımının önlenmesini sağlamaktır(Gruet 2011, s.7).

Asya'nın 2007 yılında 16.068 MW olan kurulu güç seviyesi, 2012 yılı sonunda 97.810MW seviyesine ulaşarak Şekil 2.4' te görüldüğü gibi son 4 yılda en fazla gelişim gösteren bölge olmuştur. Özellikle Çin son yıllarda kendi içinde oluşturduğu yatırımlar sayesinde küresel rüzgar enerji pazarında önemli bir oyuncu haline gelmiştir. Çin'deki rüzgar türbin üreticilerinin yakın gelecekte Çin dışı pazarlarda şirket satın almaları veya doğrudan teknoloji yatırımlarıyla etkin bir oyuncu olarak yer alacakları öngörülmektedir(Sevim 2012, s.5).

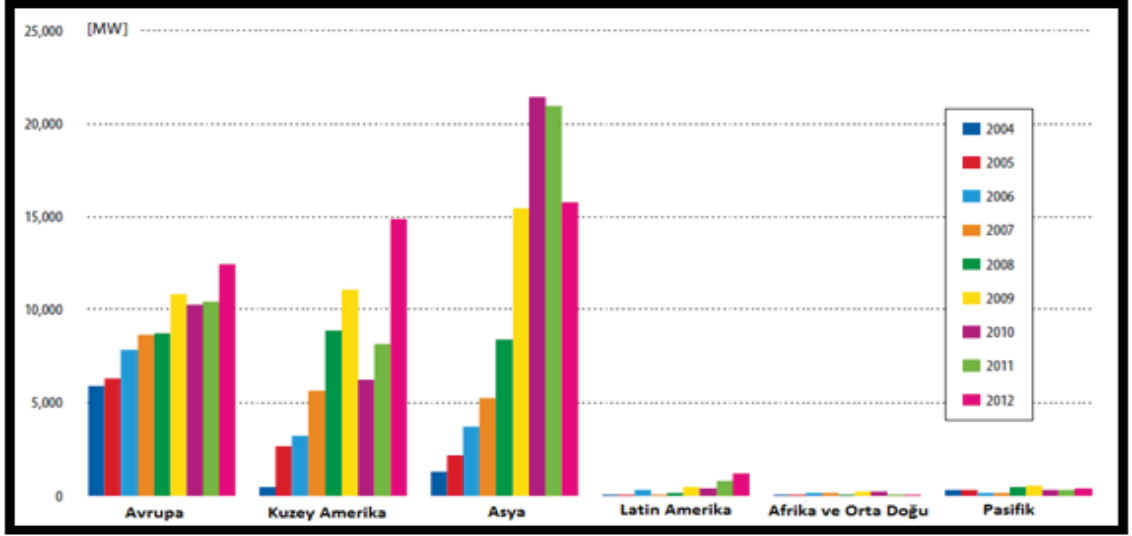
Kuzey Amerika'da ise 2012 yılında kurulan 13,124 MW kapasite ile birlikte toplam rüzgar kurulu gücü 60,007 MW seviyesine ulaşmıştır. Bu sayede 2012 yılında 95.9 milyon ton CO<sub>2</sub> salınımının önüne geçilmiştir. 2009 yılında %39' luk büyüme göstermiş olan ABD'de rüzgar enerjisi pazarındaki büyüme oranı 2010' da yüzde 16' ya düşmüştür. Bunun sonucu olarak ABD global rüzgar kurulu gücü alanındaki yerini Çin' e devretmiştir. 2012 yılında ise yüzde 27.9'luk büyüme ile bölgeler arasında yılın en fazla büyüme oranına sahiptir.<sup>5</sup>

<sup>3</sup> WWEA, 2012 Report, 2013 [www.windea.org](http://www.windea.org) [Erişim Tarihi: 17.05.2013], ss.1-14

<sup>4</sup> Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. 2011. *Enerji Raporu 2011*. Aralık. Ankara. s.118

<sup>5</sup> AWEA, Fourth Quarter 2012 Market Report, 2012, [www.awea.org](http://www.awea.org). [Erişim tarihi: 15.02.2013], ss. 3-4

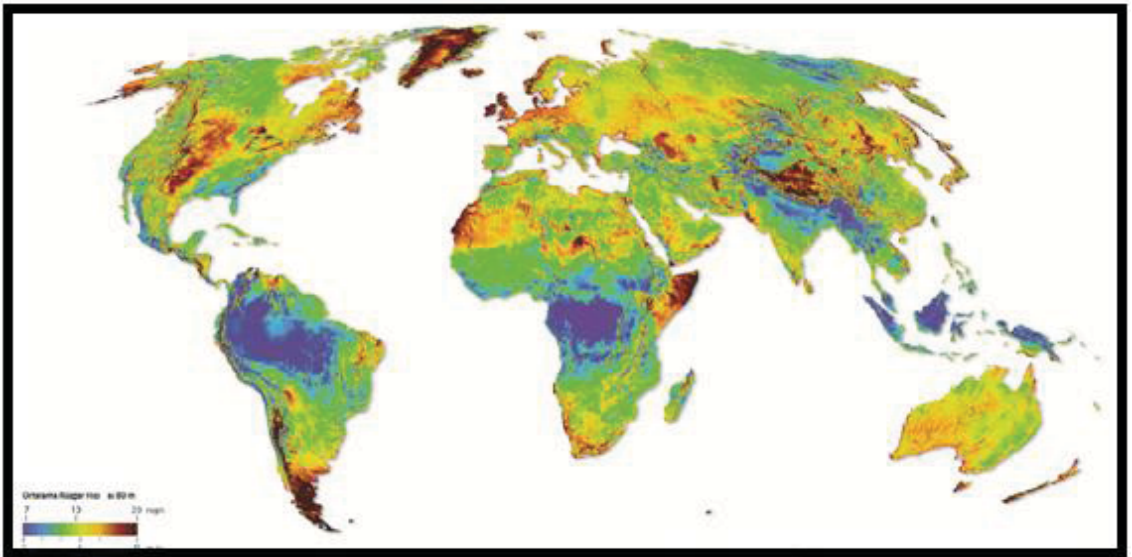
**Şekil 2.4: 2004-2012 yılları arası bölgelerde yıllık kurulmuş rüzgar kapasiteleri**



Kaynak: GWEC, Global Wind Statistics 2012, 2013, [www.gwec.net](http://www.gwec.net). [Erişim Tarihi: 15.02.2013]

Şekil 2.5’ de verilen dünya rüzgar enerji potansiyeli atlası incelendiğinde Afrika ve Avustralya’da da rüzgar enerjisi yatırımları için ekonomik açıdan uygun bölgelerin olduğu gözükmemektedir. Dünyamızda elektrik enerjisine erişimi olmayan 1.3 milyar insan olduğu ve bu gruptaki insanların büyük bölümünün Afrika’da yaşadığı dikkate alındığında Afrika’ da gerçekleştirilecek RES yatırımlarının ekonomik boyutu kadar insanlık boyutunu da öne çıkarmaktadır(Sevim 2012, s.4).

**Şekil 2.5: Dünya rüzgar enerji potansiyeli atlası**



Kaynak: Global wind speed map.2013. [www.3tier.com](http://www.3tier.com). [erişim tarihi:15.02.2013]

Rüzgar enerjisinde gün geçtikçe artan türbin talebi imalatçı firmaların artmasının beraberinde rekabeti de getirmiştir. 2008-2007 yılları arasında MW başına rüzgar türbin yatırım maliyeti 1.21 milyon €, 2009 yılında yatırım maliyeti 1.06 milyon €/MW civarındaydı. 2010 sonu itibariyle arz fazlası nedeniyle küresel rüzgâr enerjisi pazarında 2005' den beri ilk kez MW başına yatırım maliyeti 1milyon €' nun altına düşmüştür. 2010 yılı sonu itibariyle MW başına ortalama yatırım maliyeti 980.000 € olmuştur. 2009 yılında küresel rüzgar enerjisi pazarının cirosu 50 milyar € iken, 2010 yılında pazar cirosu 40 milyar €' ya düşmüştür. Bu düşüşün temel sebepleri küresel rüzgar enerji pazar büyüme hızının yavaşlaması, rüzgar birim fiyatlarının düşmesi ve rüzgar türbin üretiminin bir bölümünün Çin' e kaymasıdır.<sup>6</sup>

Günümüzde RES yatırımlarında en çok tercih edilen rüzgar türbinleri 2-3 MW aralığında yer almakta olan rüzgar türbinleri olmaktadır, bununla birlikte kullanım alanı ve kurulu güç oranını optimize edebilmek için başka bir ifadeyle minimum alanda maksimum gücü elde edebilmek için daha büyük nominal güce sahip rüzgar türbinlerinin üretimi için araştırma çalışmaları sürmektedir(Sevim 2012, s.7).

## **2.6 TÜRKİYE'DE RÜZGAR ENERJİSİ GÖRÜNÜMÜ**

Türkiye, Avrupa' da rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından zengin ülkelerden birisidir. Üç tarafı denizlerle çevrili olan ve yaklaşık 3500 km kıyı şeridi olan Türkiye' de özellikle Marmara kıyı şeridi ve Ege kıyı şeridiyle sürekli ve düzenli rüzgâr almaktadır. Türkiye'de rüzgâr enerjisiyle ilgili ilk bilimsel çalışmalar; 1960'larda Ankara Üniversitesi, 1970' lerde ise Ege Üniversitesi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi ve TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, 1981 yılından sonra ise Elektrik İşleri Etüd İdaresi (EİE) tarafından yürütülmüş ve 1989 yılında bu kuruluş bünyesinde Rüzgâr Enerjisi Şube Müdürlüğü kurulmuştur. 1992 yılında, Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi olan Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB) kurulmuştur. 1993 yılından itibaren ise, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİGM) tarafından, 43 meteoroloji istasyonunun rüzgâr değerleri, topoğrafik veriler ile genişletilerek, Türkiye Rüzgâr Atlası çalışmalarına başlanmıştır(Hayli 2001, s.20).

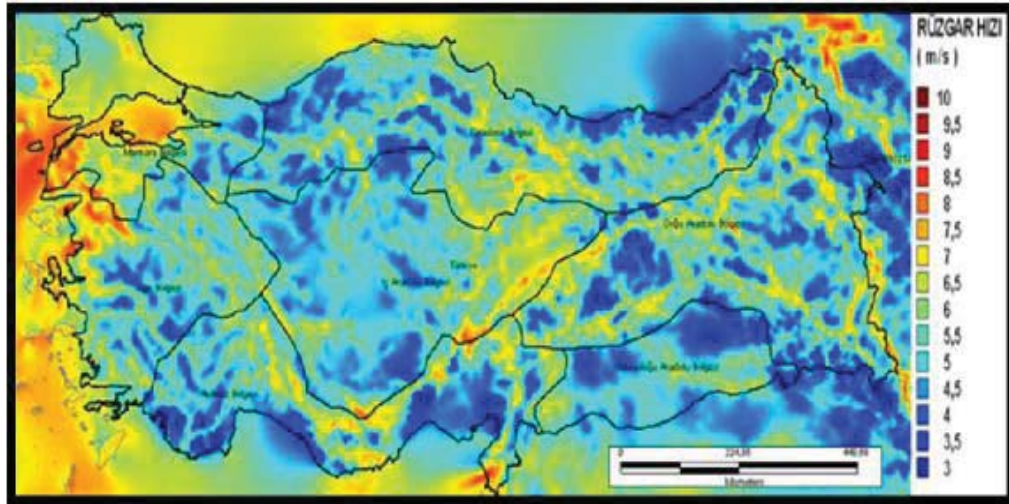
---

<sup>6</sup> Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. 2011. *Enerji Raporu 2011*. Aralık. Ankara. s.110



Şekil 2.6’ da gösterilen Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), Türkiye rüzgâr kaynaklarının karakteristiklerini ve dağılımını belirlemek amacıyla EİE tarafından 2006 yılında üretilmiştir. REPA’ ya göre Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli, belirlenmiş kriterlerin ışığında rüzgar sınıfı iyi ile sıra dışı arasında 47489.44 MW olarak belirlenmiştir. Şekil 2.7’ de görüldüğü gibi bu araziler Türkiye toplamının yüzde 1.3’ne karşılık gelmektedir.<sup>7</sup>

**Şekil 2.6: Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli atlası**



Kaynak: TMMOB Türkiye Makine Mühendisleri Odası. 2012. *Türkiye’ nin Enerji Görünümü*. Nisan 2012. Ankara.s.159.

**Şekil 2.7: REPA’ya göre Türkiye rüzgar potansiyeli**

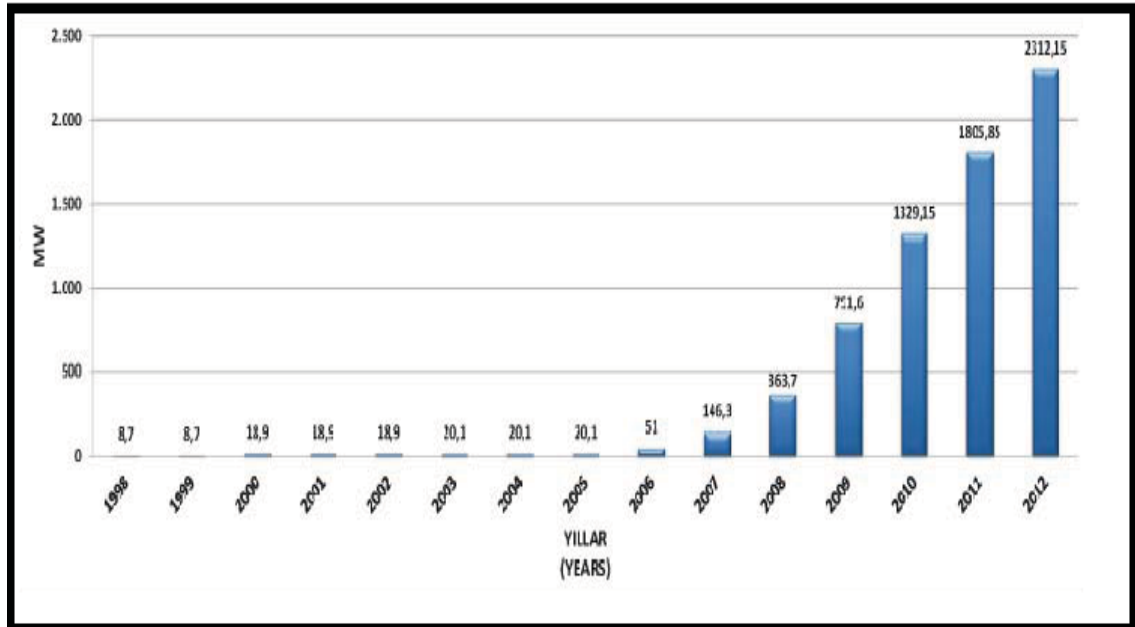
RÜZGAR HIZI (m/s)	RÜZGAR GÜÇ YOĞUNLUĞU (W/m <sup>2</sup> )	TOPLAM ALAN (km <sup>2</sup> )	RÜZGARLI ARAZİ YÜZDESİ	TOPLAM KURULABİLECEK GÜÇ MİKTARI (MW)
6,5 – 7,0	300 – 400	16.781,39	2,27	83.906,96
7.0 – 7,5	400 – 500	5.851,87	0,79	29.259,36
7.5 – 8,0	500 – 600	2.598,86	0,35	12.994,32
8.0 - 9,0	600 – 800	1.079,98	0,15	5.399,92
> 9.0	> 800	39,17	0,01	195,84
<b>TOPLAM</b>		<b>26.351,28</b>	<b>3,57</b>	<b>131.756,40</b>

Kaynak: TMMOB Türkiye Makine Mühendisleri Odası. 2012. *Türkiye’ nin Enerji Görünümü*. Nisan 2012. Ankara.s.160.

<sup>7</sup> TMMOB Türkiye Makine Mühendisleri Odası. 2012. *Türkiye’ nin Enerji Görünümü*. Nisan 2012. Ankara.s.160.

Türkiye’de genel kullanıma dönük ilk rüzgar elektriği, 1986 yılında Çeşme Altinyunus Tesisleri’nde kurulan Vestas marka 55 kW nominal güçlü rüzgar türbininden elde edilmiştir. Uluslararası boyutta ilk rüzgar elektriği, 21 Şubat 1998 tarihinde Çeşme Germiyan Köyü’nde üretilmiştir. Bir Alman Firması’ndan satın alınarak kurulan ve herbiri 500 kW nominal güce sahip olan 3 adet Enercon-40 rüzgar türbininden oluşan bu ilk rüzgar çiftliğinden, yılda yaklaşık 4.5 milyon kWh elektrik enerjisi üreteceği varsayılmıştır. Türkiye’deki Yap-İşlet-Devret (YİD) Modeli ile işletmeye açılan ilk rüzgar enerjisi tesisi ise, 28 Kasım 1998 tarihinde işletmeye alınan Alaçatı’daki ARES adlı 12 rüzgar türbininden oluşan rüzgar çiftliğidir. Burada kullanılan rüzgar türbinleri 600 kW nominal güçlü Danimarka üretimi Vestas V44’tür(Özdamar 2000, ss135-136). Türkiye’de rüzgar enerjisi kurulu gücü 1998 yılında ilk şebekeye bağlı rüzgar çiftliklerinin kurulmasının ardından 2005 yılına kadar yok sayılabilecek düzeyde artış göstermiştir. 2005 yılından itibaren 5346 sayılı ‘Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun’ un çıkmasından sonra kurulu güç ve enerji üretiminde Şekil 2.8’de görüldüğü gibi her yıl büyük oranlarda artış göstererek 2012 sonu itibariyle kurulu güç 2,312 MW seviyesine ulaşmıştır.

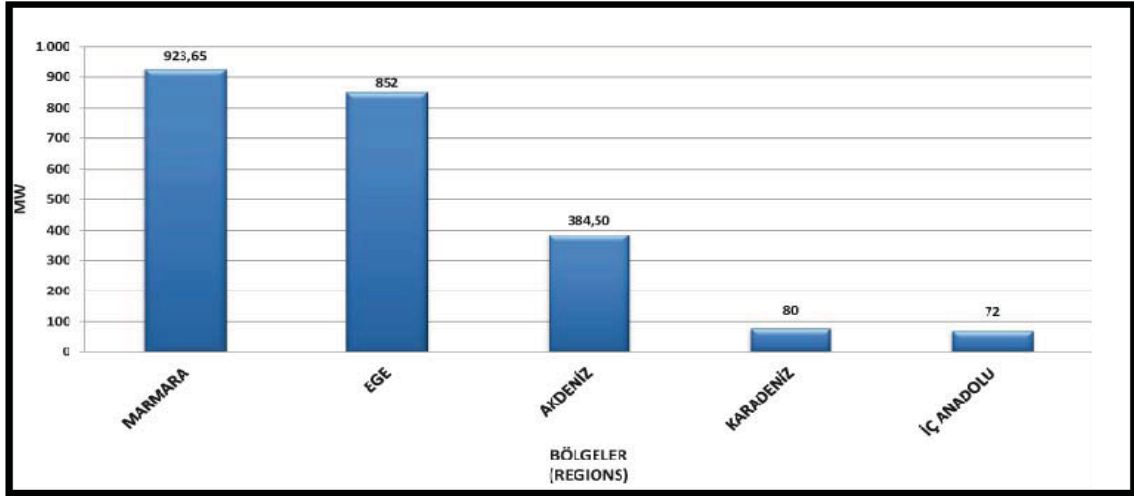
**Şekil 2.8: Türkiye rüzgar enerjisi kurulu gücü gelişimi**



*Kaynak:* TÜREB, Ocak 2013 Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, 2013, [www.tureb.com.tr](http://www.tureb.com.tr). [erişim tarihi: 26.04.2013]. s.5.

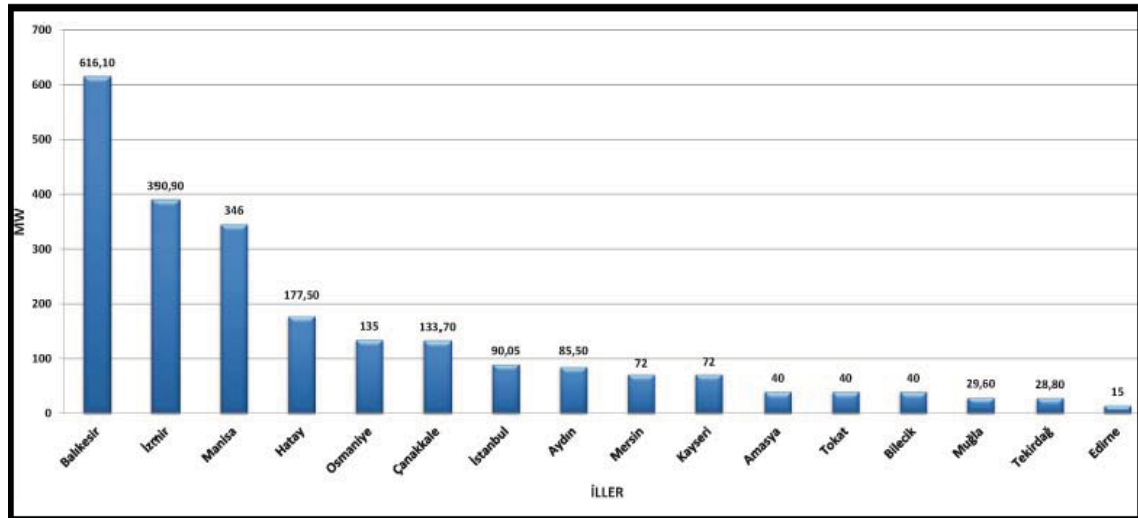
2013 yılı başı itibariyle Türkiye’ de rüzgar kurulu gücü, toplam kurulu gücün (57,058 MW) yüzde 4’lük kısmını oluşturmaktadır. 2012 yılında rüzgar santrallerinden üretilen elektrik 523.8 GWh olarak gerçekleşmiş olup, bu değer toplam elektrik enerjisi tüketiminin yüzde 2.6’lık kısmını oluşturmaktadır.<sup>8</sup> Şekil 2.9’ da görüleceği üzere Marmara bölgesi(923.65 MW) rüzgar kurulu gücü bakımından en yüksek kapasiteye sahiptir. İller bazında ise kurulu güç bakımından en yüksek kapasite şekil 2.10’ da görüldüğü üzere Balıkesir’ dir.

**Şekil 2.9: Türkiye’de işletmedeki RES’lerin bölgelere göre dağılımı**



Kaynak: TÜREB, Ocak 2013 Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, 2013, [www.tureb.com.tr](http://www.tureb.com.tr). [erişim tarihi: 26.04.2013]. s.13.

**Şekil 2.10 Türkiye’de işletmedeki RES’lerin illere göre dağılımı**

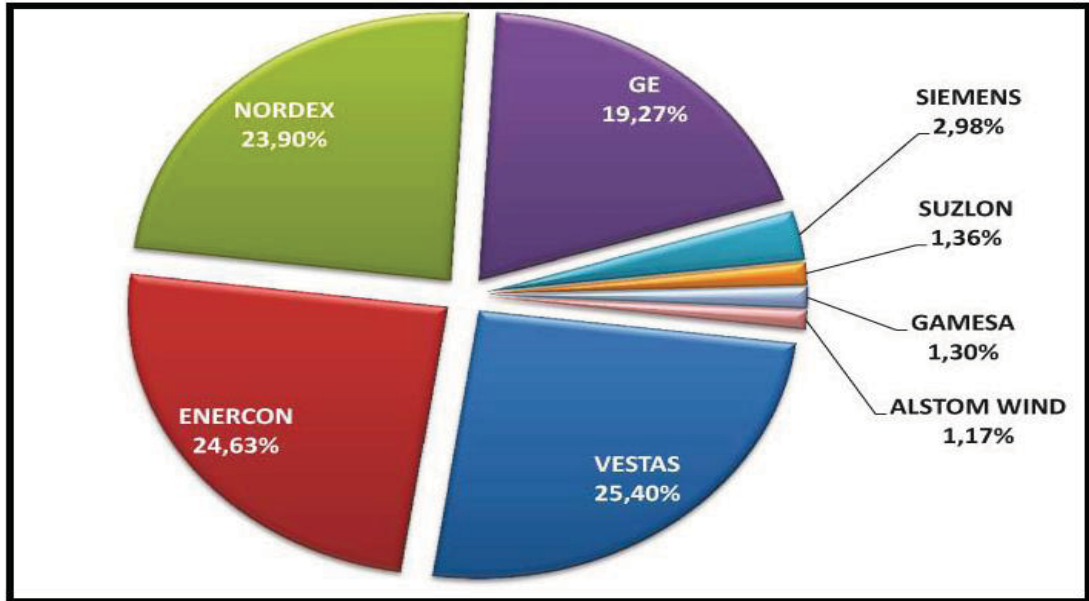


Kaynak: TÜREB, Ocak 2013 Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, 2013, [www.tureb.com.tr](http://www.tureb.com.tr). [erişim tarihi: 26.04.2013]. s.15.

<sup>8</sup> TEİAŞ, İşletme Faaliyetleri Raporları, [www.teias.gov.tr](http://www.teias.gov.tr). [erişim tarihi: 17.02.2013]

Türkiye’deki rüzgar santrallerini oluşturan türbinler dünya piyasasına hâkim olan türbin markalarıdır ve rüzgâr türbin ve bileşenlerinin büyük bir kısmı (türbin, jeneratör, göbek, gövde vb.) ithal edilmektedir. Şekil 2.11’ de görüldüğü gibi tesis halindeki santrallerde çoğunlukla Vestas, Nordex, Enercon ve GE marka türbinler kullanılmıştır ve en fazla 2-3 MW arasındaki türbinler tercih edilmiştir; ancak 900 kW’ lık türbinlerden oluşan santraller de genel toplam içinde ikinci sırayı oluşturmaktadır.<sup>9</sup>

**Şekil 2.11 Türbin üreticilerinin Türkiye’deki rüzgar kurulu gücündeki payları**



*Kaynak:* TÜREB, Ocak 2013 Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, 2013, [www.tureb.com.tr](http://www.tureb.com.tr). [erişim tarihi: 26.04.2013]. s.20.

İklim değişimi, fosil ve nükleer enerji kaynaklarının tükenmesi ve buna bağlı olarak artan enerji maliyetleri, artan enerji talebi tüm dünyada ve ülkemizde ortak sorun olarak görülmektedir. Bunun yanında ülkemiz fosil enerji kaynaklar bakımından dışa bağlı durumdadır. Bu sorunları azaltmak adına yapılan çalışmalar neticesinde yenilenebilir enerjinin toplam üretim içerisindeki payının artırılması da bulunmaktadır. Arz Güvenliği Strateji Belgesi’nde rüzgar için 2023 yılında ulaşılabilecek hedef 20,000 MW kurulu güç olarak konulmuştur.<sup>10</sup>

<sup>9</sup> TMMOB Türkiye Makine Mühendisleri Odası. 2012. *Türkiye’ nin Enerji Görünümü*. Nisan 2012. Ankara.s.161.

<sup>10</sup> Yüksek Planlama Kurulu. 18.05.2009.2009/11, *Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi*, Mayıs 2009, s.9.

## 2.7 RÜZGAR İÇİN GÜÇ VE ENERJİ DENKLEMLERİ

Bilindiği gibi hareket halindeki her cisim bir kinetik enerjiye sahiptir. Rüzgar da hareket halindeki bir hava akımı olduğundan bir kinetik enerjiye sahiptir. Serbest halde akış gösteren rüzgarın güç eşitliği şu şekilde verilmektedir:

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (2.3)$$

Sabit V hızına sahip bir akışın kinetik enerji eşitliği de;

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \quad (2.4)$$

olmaktadır. “Denklem 2.4” , “Denklem 2.3” içerisinde kullanıldığında oluşacak eşitlik;

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} mV^2 \right) \quad (2.5)$$

$$\frac{d}{dt} (u \cdot v) = u \frac{dv}{dt} + v \frac{du}{dt} \quad (2.6)$$

“Denklem 2.5” eşitliğine, “Denklem 2.6” eşitliğinde verilen çarpıma göre diferansiyel alma metodu uygulandığında;

$$P = \frac{1}{2} \left( 2mV \frac{dV}{dt} + V^2 \frac{dm}{dt} \right) \quad (2.7)$$

Sabit V hızlı bir rüzgar için  $\frac{dV}{dt}=0$  olduğu için “Denklem 2.7” deki parantez içindeki eşitliğin sol tarafı 0 olmaktadır. O zaman;

$$P = \frac{1}{2} \left( \frac{d}{dt} (mV^2) \right)$$

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

Havanın kesit alanı S, ve yoğunluğu  $\rho$  ise kütle akış hızı;

$$\dot{m} = \rho S V \quad (2.9)$$

“Denklem 2.9”, “Denklem 2.8” içerisine yerleştirildiğinde son olarak serbest halde akış gösteren rüzgar güç ifadesi;

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (2.10)$$

olmaktadır. Birim alan başına meydana gelen güç akısına güç yoğunluğu denir ve “Denklem 2.11” ile tanımlanır;

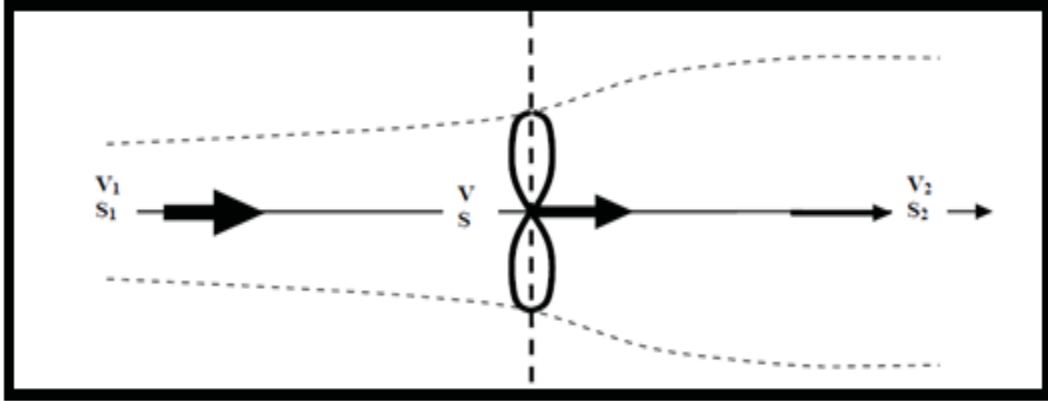
$$P' = \frac{P}{S}$$

$$P' = \frac{\frac{1}{2} \rho S V^3}{S}$$

$$P' = \frac{1}{2} \rho V^3, \left[ \frac{\text{joule}}{\text{m}^2 \text{s}}, \left[ \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2} \right] \right] \quad (2.11)$$

Rüzgar türbinlerinin, rüzgar enerjisinden faydalanabileceği max. güç ise, Albert Betz tarafından 1919 yılında hesaplanmıştır. Şekil 2.12’ de verilen rüzgar akış varyasyonundan görüleceği üzere  $V_1$  hızı ve  $S_1$  kesit alanına sahip rüzgar enerjisinin bir kısmı türbin tarafından soğurularak mekanik enerjiye dönüşmektedir. Türbin tarafından mekanik enerjiye dönüşmeyen enerji ise  $V_2$  hızında ve  $S_2$  kesit alanında türbülanslı bir yapıda türbinin arkasında görülmektedir. Türbinin soğurduğu enerjide ise kesit alanı S, hız V ile gösterilir.

Şekil 2.12: İdeal bir türbin modelinde rüzgar akış varyasyonu



Kaynak: Ragheb M., & Ragheb A.M., 2011., *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, s.21

Euler teoremine göre rüzgar türbininin rotorunda meydana gelen kuvvet eşitliği;

$$F = ma$$

$$F = m \frac{dV}{dt}$$

$$F = \dot{m}\Delta V = \rho SV \cdot (V_1 - V_2) \quad (2.12)$$

olarak ifade edilir. Enerji eşitliği ise;

$$dE = Fdx \quad \text{dir.} \quad (2.13)$$

Buradan “Denklem 2.3” eşitliğinden yola çıkarak “Denklemler 2.12 ve 2.13” de türetilen ifadeleri “Denklem 2.3” içerisinde kullandığımızda;

$$P = \frac{dE}{dt} = F \frac{dx}{dt} = FV$$

$$P = \rho SV^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (2.14)$$

olarak türbin rotorunda meydana gelen güç ifadesi bulunur.

“Denklem 2.3” ifadesinden tekrar yola çıkarak kinetik enerji eşitliğinden ortaya çıkacak güç ifadesi,

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

$$P = \frac{\frac{1}{2}mV_1^2 - \frac{1}{2}mV_2^2}{\Delta t}$$

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (V_1^2 - V_2^2)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.15)$$

olarak bulunur. Buradan “Denklem 2.14” ile “Denklem 2.15” ile elde edilen güç ifadeleri birbirine eşitlenirse,

$$P = \rho S V^2 \cdot (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad \rho, S, V \neq 0$$

$$V \cdot (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} (V_1 - V_2) (V_1 + V_2)$$

$$V = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad (V_1 - V_2) \neq 0 \text{ veya } (V_1 \neq V_2) \quad (2.16)$$

olarak bulunur. Bulmuş olduğumuz V hız eşitliğini “Denklem 2.14” içine uygularsak;

$$P = \rho S V^2 \cdot (V_1 - V_2)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2)^2 (V_1 - V_2)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho S (V_1^2 - V_2^2) (V_1 - V_2) \quad (2.17)$$



olarak mekanik güç ifademiz ortaya çıkar. Burada  $V_2$  ile  $V_1$  hızlarının oranını “b” etkileşim faktörü ile tanımlayabiliriz. O halde yeni güç denkleminiz;

$$P = \frac{1}{4} \rho S (V_1^2 - V_2^2) (V_1 - V_2) \quad \left( \frac{V_2}{V_1} = b \right)$$

$$= \frac{1}{4} \rho S V_1^3 (1 - b^2) (1 + b) \quad (2.18)$$

olacaktır. S kesit alanı ve  $V=V_1$  rüzgar akışının sağladığı kinetik enerjiden elde edilen güç bağıntısı;

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \rho S V_1^3, \text{ [ Joule/s],[Watt]} \quad (2.19)$$

olarak gösterilir. Türbinlerin verimini belirten  $C_p$  ‘performans katsayısı’, bozulmamış rüzgar akışında gücün kinetik enerjiden elde edilebilecek güce oranı olarak tanımlanır. Yani;  $C_p = P/\dot{E}$  ’ dir. Buradan “Denklem 2.18” ve “Denklem 2.19” formül içerisinde uygularsak;

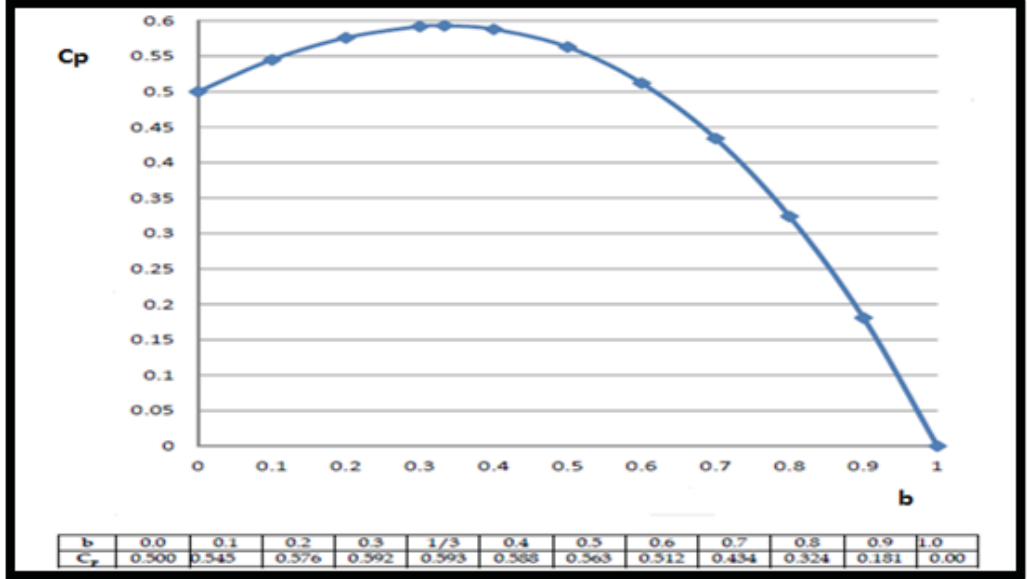
$$C_p = \frac{P}{\dot{E}}$$

$$C_p = \frac{\frac{1}{4} \rho S V_1^3 (1 - b^2) (1 + b)}{\frac{1}{2} \rho S V_1^3}$$

$$C_p = \frac{1}{2} (1 - b^2) (1 + b) \quad (2.20)$$

sonucu ortaya çıkar. Şekil 2.13’ den görüldüğü üzere “Denklem 2.20” den  $C_p - b$  grafiği elde edilmiştir. Buna göre  $b=1$  iken  $V_1 = V_2$  olacak, yani türbin hiçbir şekilde rüzgar enerjisinden faydalanmayacağından güç katsayısı da 0 olacaktır.

Şekil 2.13: Performans katsayısı (Cp)-etkileşim faktörü(b) grafiği



Kaynak: Ragheb M., & Ragheb A.M., 2011., *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, s.24

Bir rüzgar türbininden elde edilebilecek max. performansı bulabilmek için öncelikle sabit güç katsayısının b' ye göre diferansiyelini alırız.

$$\frac{d}{dx}(uv) = u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx}$$

$$\frac{dC_p}{db} = \frac{1}{2} \frac{d}{db} [(1 - b^2)(1 + b)]$$

$$= \frac{1}{2} [(1 - b^2) - 2b(1 + b)]$$

$$= \frac{1}{2} (1 - b^2 - 2b - 2b^2)$$

$$= \frac{1}{2} (1 - 3b^2 - 2b)$$

$$= \frac{1}{2} (1 - 3b)(1 + b) = 0 \quad (2.21)$$

“Denklem 2.21” den iki farklı b değeri ortaya çıkmaktadır. İlkinde b= -1 bulunmaktadır. Buradan da  $V_2 = -V_1$  sonucu ortaya çıkar. Bu eşitlik mantıksızdır. Bu yüzden diğer b değerinden yola çıkarsak;

$$(1-3b)= 0$$

$$b = \frac{1}{3} \longrightarrow V_2 = \frac{1}{3} V_1 \quad (2.22)$$

olur. “Denklem 2.22” ile elde ettiğimiz eşitliği “Denklem 2.20” içerisine uygularsak;

$$\begin{aligned} C_{pmax} &= \frac{1}{2} (1 - b^2)(1 + b) \\ &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1^2}{3}\right) \left(1 + \frac{1}{3}\right) \\ &= 0.59259 = \% 59.26 \end{aligned}$$

Olmaktadır. Sonuçtan anlaşılacağı üzere bir türbinin ulaşabileceği en yüksek verimlilik yüzde 59.26 olarak bulunmuştur(Ragheb M. ve Ragheb A.M. 2011, ss.19-38).

### 2.7.1 Kapasite Faktörü Hesabı

Kapasite faktörü hem üreticiler hemde kullanıcılar arasında bilinmesi gereken önemli bir performans parametresidir. Kapasite faktörü belirli bir zaman diliminde üretilen enerjinin o zaman diliminde üretilebilecek maksimum enerjiye bölümüdür ve “Denklem 2.23” ile ifade edilir:

$$K.F. = \frac{E_{out}}{E_r} \quad (2.23)$$

$$E_r = 8760 * P_t$$

Burada; ( $P_t$ ) türbin maksimum çıkış gücü, ( $E_{out}$ ) türbinin yıllık ürettiği gerçek enerji ( $E_r$ ) türbinin yıllık üretebileceği maksimum enerjidir. 8760 ise bir yılın saat cinsinden karşılığıdır (Çetin ve diğerleri 2011, s.134).

## 2.8 WEIBULL DAĞILIMI

Weibull dağılımı dünyanın bir çok bölgesinin rüzgar dağılımını temsil etmek için kullanılmaktadır. Bu dağılımın kullanım nedeni, rüzgar dağılımına çok iyi uyması, dağılımın esnek bir yapıya sahip olması, parametrelerinin belirlenmesindeki kolaylık, parametre sayısının az olması, parametrelerin bir yükseklik için belirlenmesinin ardından farklı yükseklikler için tahmin edilebilmesi gibi faktörlerdir.

Weibull dağılımı, boyutsuz şekil (  $k$  ) ve rüzgar hızı ile aynı birime sahip ölçek (  $c$  ) parametrelerinden oluşan iki parametrelili bir dağılımdır. İki parametrelili Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu “Denklem 2.24” ile verilmiştir.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.24)$$

burada  $f(v)$  rüzgar hızının olasılık yoğunluğu,  $k$  ve  $c$  sırasıyla boyutsuz şekil ve rüzgar hızı ile aynı birime sahip ölçek parametreleridir. Weibull dağılımının birikimli (kümülatif) olasılık yoğunluk fonksiyonu ise aşağıdaki “Denklem 2.25” ile ifade edilebilir.

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.25)$$

Literatürde Weibull dağılımı parametrelerinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar grafiksel metot, maksimum olabilirlik metodu ve moment metodu kullanılarak bulunan yöntemlerdir.

Moment metodu Weibull dağılımı parametrelerini belirlemek için kullanılan en eski metotlardan birisidir. Moment metodu, veri dağılımının ortalaması ve standart sapması arasındaki ilişkiyi şekil parametresinin 1 ile 10 arasındaki değerleri için nümerik yöntemler kullanarak çözen ve şekil ile ölçek parametresinin belirlenmesini sağlayan bir metottur. Şekil ve ölçek parametreleri “Denklem 2.26” ve “Denklem 2.27” ile ifade edilebilir.

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_{ort}}\right)^{-1,086} \quad (1 \leq k \leq 10) \quad (2.26)$$

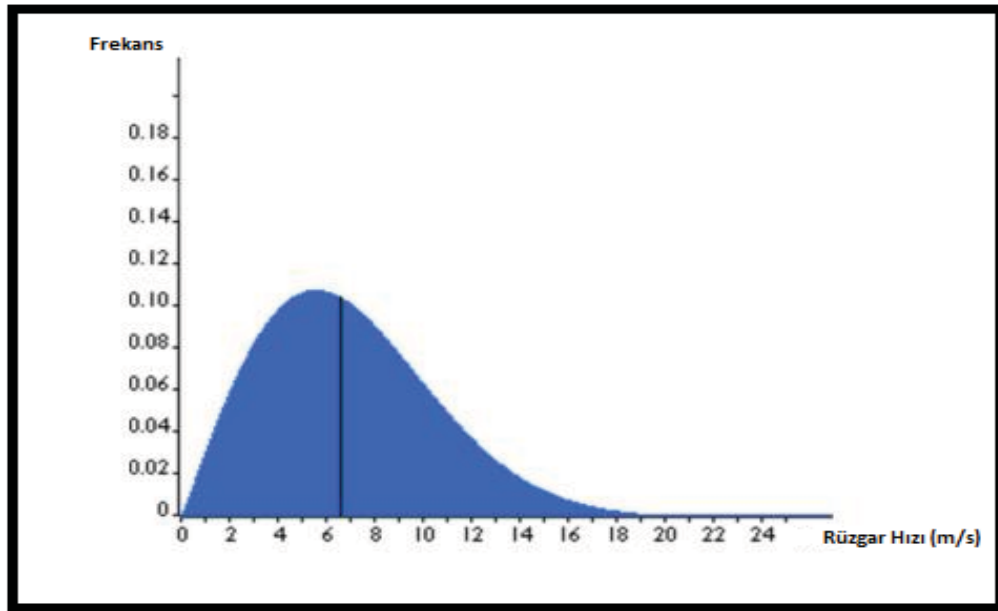
$$c = \frac{V_{ort}}{\Gamma(1+\frac{1}{k})} \quad (2.27)$$

Burada,  $v_{ort}$  ortalama rüzgar hızı,  $\sigma$  ise standart sapmadır.  $\Gamma$ , Gamma fonksiyonudur. Herhangi bir  $y$  değeri için Gamma fonksiyonu (2.28) eşitliği ile ifade edilir(Akdağ ve Güler 2008).

$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} \exp(-x) x^{y-1} dx \quad (2.28)$$

Yapılan rüzgar ölçümleri sonucunda çizilen Weibull grafiğinde  $k$  küçük ise, değişken rüzgar; büyük ise kararlı yapıda bir rüzgar rejimi olduğu anlaşılmalıdır.  $k$ 'nın 1,5 olduğu değerler aşırı değişken rüzgarı, 2 olduğu değerler iklimsel rüzgarları, 3 olduğu değerler ise ticaret rüzgarlarını ifade etmektedir. Şekil 2.14' de örnek olarak bir rüzgar serisinin Weibull dağılımı verilmiştir(Durak ve Özer 2008, ss 68).

**Şekil 2.14 Rüzgar hızı için örnek bir Weibull diyagramı**



Kaynak: The Weibull Distribution.[tarih yok]. <http://wiki.windpower.org>.[erişim tarihi: 04.04.2013]

### 3.LİTERATÜR TARAMASI

Türksoy (1995), yer hizasından 10 m yükseklikte ölçülmüş 13 yıllık meteoroloji verilerini kullanarak Bozcaada' nın rüzgar güç potansiyelini değerlendirmiştir. Rüzgar atlas istatistikleri ve Bozcaada' nın enerji yoğunluğu analizi için WAsP programı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda rüzgar hızı ortalamasının 6.4 m/s ve güç yoğunluğunun da 324 W/m<sup>2</sup> olduğu belirtilmiştir.

Durak ve Şen (2002), Akhisar' da bulunan bir sahanın rüzgar türbini saha incelemesi ile rüzgar güç potansiyel analizini yapmışlardır. Yerel rüzgar hızı varyasyonlarına göre farklı rüzgar türbin teknolojileri değerlendirilmiş ve buna uygun türbinler seçilmiştir. WAsP yazılımı kullanılarak sahada uygun türbin yerleri belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda sahanın yıllık ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu sırasıyla 5.8 m/s ve 308 W/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Sahaya konuşlandırılmış her biri 600 kW gücünde 20 adet türbin ile yıllık minimum 31416 MWh üretimin gerçekleştirilebileceği hesaplanmıştır.

Karlı ve Geçit (2003), Türkiye' nin güneyinde yer alan Gaziantep ili Nurdağı ilçesinin rüzgar güç potansiyeli belirleme çalışmalarını kısaca anlatmışlardır. Yer hizasından 10 m yükseklikten ölçülen veriler kullanılarak ortalama hızı ve güç yoğunluğu değerleri sırasıyla 7.3 m/s ve 222 W/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur.

Özerdem ve Türkeli (2003), Ege Denizi kıyı şeridinde sahip Çeşme Yarımadasında bulunan İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü yerleşkesinin rüzgar karakteristiklerini elde etmişlerdir. 10 m ve 30 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızı değerleri sırasıyla 7.03 m/s ve 8.14 m/s olarak belirlenmiştir. Ölçülen veri seti değerlendirmesinde İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü' nün önemli bir rüzgar potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir.

Bilgili ve arkadaşları (2004), Antakya ve İskenderun bölgelerinden 1997-2001 yılları arasına ait saatlik rüzgar verilerini toplayarak Doğu Akdeniz' in rüzgar enerji kaynakları için potansiyel ve fizibilite çalışması yapmışlardır. Bu amaçla bölgelerin hakim rüzgar yönleri, ortalama değerler, rüzgar hızları, rüzgar potansiyeli ve frekans dağılımları belirlenmiştir. Antakya ve İskenderun Meteoroloji İstasyonlarından alınan verilerle elde edilen hakim rüzgar yönleri sırasıyla 210° ve 300° olarak belirlenmiştir. Bununla

birlikte 10 m' de Antakya, İskenderun için doğrulanmış rüzgar hızı ve güç yoğunluğu değerleri sırasıyla 5.5 m/s, 3.2 m/s ve 220 W/m<sup>2</sup>, 198 W/ m<sup>2</sup> bulunmuştur.

Akpınar, E. ve Akpınar S. (2004), Elazığ iline bağlı Maden ilçesinin rüzgar potansiyelini belirlemek için beş yıllık (1998-2002) saatlik zaman serisi formatındaki verileri kullanmışlardır. Bu verilere bağlı olarak Weibull c ölçek ve k şekil parametreleri sırasıyla 5.83 m/s ile 1.60 olarak bulunmuştur. Bununla birlikte ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu değerleri de sırasıyla 5.63 m/s ve 244.65 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

Köse ve Özgören (2005), Selçuk Üniversitesi Alaaddin Keykubat kampüsü bölgesinde kurulan ölçüm istasyonundan 2003-2005 yılları arasında 21 aylık toplanan verileri kullanarak bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemişlerdir. Sahanın hakim rüzgar yönü kuzey (0°) olup, 20 m yükseklikteki ortalama rüzgar hızı değeri 5.52 m/s olarak belirlenmiştir. Ölçülen değerler ve yerli imalat faktörleri göz önüne alınarak kapasite, yatırım maliyeti ve basit geri ödeme süreleri hesaplanmıştır.

Özerdem ve Türkeli (2005), 10 ve 30 m yüksekliğinden ölçülmüş 16 aylık veri setini kullanarak İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Yerleşkesi' nin rüzgar enerjisi durumunu analiz etmişlerdir. 10 m ve 30 m yüksekliklerde ortalama rüzgar hızı sırasıyla 7,03 m/s ve 8,14 m/s olarak ölçülmüştür. Çalışmada 'WAsP ve WindPRO' yazılımları kullanılarak enerji hesaplamaları ve rüzgar istatistikleri analiz edilmiştir. Oluşturulan rüzgar güç ve enerji haritasına göre uygun saha seçilmiş, nominal güçleri 600 ile 1500 kW arasında olan rüzgar türbinlerinin yıllık enerji üretim hesapları yapılarak en uygun olan türbinler sahaya konuşlandırılmıştır.

Şahin ve arkadaşları (2005); 1992-2001 yılları arasına ait 7 farklı bölgeden alınan saatlik rüzgar verileri ile Doğu Akdeniz' in rüzgar enerji potansiyelini incelemişlerdir. Çalışmada bazı bölgelerin ortalama güç yoğunluğu 500 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla Doğu Akdeniz kıyılarının rüzgar elektriği üretimi için elverişli olduğu belirlenmiştir ve en uygun yerler tanımlanmıştır.

Gökçek ve arkadaşları (2007), zeminden 10 m yükseklikte ölçülen 2004 yılı saatlik zaman serisine sahip rüzgar verilerini kullanarak Kırklareli ilinin rüzgar enerji potansiyeli ve rüzgar karakteristik analizini yapmışlardır. Weibull k şekil ve c ölçek parametreleri sırasıyla 1.75 ve 5.5 m/s bulunmuştur. Bununla beraber saha için yapılan hesaplamalara göre ortalama hız 4.68 m/s ve Weibull fonksiyonuna bağlı güç yoğunluğu  $138.85 \text{ W/m}^2$  olarak belirlenmiştir.

Eskin ve arkadaşları (2008), 4 farklı bölgeden toplanan rüzgar verilerini kullanarak Gökçeada' nın rüzgar gücü potansiyeli tahmininde bulunmuşlardır. Farklı yer seviyelerine (10m,30m) ait hız verileri rüzgar türbini göbek yüksekliği olarak seçilen 50 m yüksekliğe Hellman denklemi kullanılarak ekstrapole edilmiştir. Çalışma sonucunda ayrıca Gökçeada' da hakim rüzgar yönünün Kuzey-Doğu olduğu belirlenmiştir.

Uçar ve Balo (2009), Türkiye' de 6 meteoroloji istasyonundan (Erzurum, Elazığ, Bingöl, Kars, Manisa, Niğde) 2000-2006 yılları arasında toplanan rüzgar hızı verilerini kullanarak bölgelerin rüzgar karakteristik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yer hizasından 10 m yükseklikte toplanan verilere göre ortalama hız değerlerinin illere göre sırasıyla 8.7 m/s, 8.5 m/s, 5.9 m/s, 6.9 m/s, 7.4 m/s ve 8.0 m/s olduğu gösterilmiştir. Ortalama yıllık k Weibull şekil parametresinin değerleri 1.71 ile 1.96 arasında değişirken c ölçek parametresinin yıllık değerlerinin 6.81 ile 9.71 arasında değiştiği belirtilmiştir. Bunun yanında 4 farklı türbin kullanılarak enerji üretim ve kapasite faktörü hesaplamaları yapılmıştır.

Fyrippis ve arkadaşları(2010), Yunanistan'a bağlı Naxos adasının kuzeydoğusunda bulunan Koronos Köyü' nün rüzgar gücü potansiyelini incelemişlerdir. Bu bölgedeki bir ölçüm direğinden alınan veriler kullanılarak Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları elde edilmiştir. Elde edilen bu dağılımlar ile rüzgar karakteristiğinin istatistiksel analizi yapılmıştır. Yıllık ortalama rüzgar hızı 7.4 m/s, tahmini güç yoğunluğu ise  $420 \text{ W/m}^2$  olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, hakim rüzgar yönleri Kuzey-Doğu ile Kuzey-Kuzeydoğu olarak bulunmuştur. İstatistiksel analizler sonucunda Weibull modelinin daha geçerli olduğu belirlenmiştir.

Arslan (2010), Kütahya' nın rüzgardan elektrik üretebilme potansiyelini incelemiştir. Bünelektepe' de gözlem istasyonundan alınan 3 yıllık verilerle farklı rüzgar türbinleri



için enerji hesaplamaları yapmıştır. Bu hesaplamalar ile Dumlupınar Üniversitesi Yerleşkesi' nin elektrik gereksinimi karşılaştırılacak uygun türbin modelini seçmek için yaşam döngüsü maliyet analizi yöntemiyle ekonomik değerlendirme çalışması yapılmıştır.

Bilgili ve arkadaşları (2010), Türkiye' nin güney, güneybatı ve batı kıyısında bulunan Akhisar, Bababurnu, Belen, Datça, Foça, Gelendost, Gelibolu, Gökçeada ve Söke ilçelerindeki rüzgar enerji potansiyelini istatistiksel olarak analiz etmişlerdir. Bu bölgelere ait ortalama rüzgar hızı değerleri sırasıyla 5.88 m/s, 5.96 m/s, 6.97 m/s, 5.63 m/s, 5.73 m/s, 5.05 m/s, 6.85 m/s, 7.23 m/s, 4.10 m/s olarak hesaplanmıştır.

Palaiologou ve arkadaşları(2011), Yunanistan' ın Lesvos adasının rüzgar enerji üretim kabiliyetini tanımlamak için gerekli verileri kullanarak adanın rüzgar karakteristiğini incelemişlerdir. Rüzgar karakteristik analizi için gerekli olan rüzgar gülü, Weibull eğrileri ve diğer grafikler belirlenmiştir. GIS ve WASP yazılımları kullanılarak yer seviyesinden 10 m yükseklikte rüzgar hızını betimleyen rüzgar hızı haritası hazırlanmıştır. Sonuç olarak 15 rüzgar türbini için 6 farklı güç üretimi senaryosu değerlendirilmiştir. Ancak yerleşim açısından en uygun senaryo toplam kapasitesi 3 MW olan bir rüzgar çiftliği içerisinde 5 adet rüzgar türbini konuşlandırılması olmuştur.

Çelik (2011), öncelikle Türkiye' nin sahip olduğu rüzgar enerjisi potansiyeli ve çevresel etkilerini değerlendirmiş, sonrasında Çanakkale bölgesi için rüzgar analizi yapmıştır. 2000-2005 yılları arasında şehir merkezinde ve Bozcaada' da yer seviyesinin 10 m üzerinde elde edilen verilerle yapılan hesaplamalar sonucunda, ortalama hız ve güç yoğunluğu değerleri sırasıyla Çanakkale için 4.6 m/s ve 139 W/m<sup>2</sup>, Bozcaada için 6.4 m/s ve 350 W/ m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur.

Çetin ve arkadaşları (2011), İzmir' in Menemen ilçesinde rüzgar karakteristiğine bağlı olarak 2.5 MW' lık 6 farklı türbinin performanslarını analiz etmişlerdir. Çalışma için 2008 yılına ait yer seviyesinden 10 m yükseklikte ölçülmüş ve saatlik zaman serisine sahip veriler kullanılmıştır. Ölçülen veri değerleri Hellman korelasyonu kullanılarak türbin hub yüksekliği olan 80-100 m sınırına taşınmıştır.

Ohunakin(2011), Nijerya' nın kuzey-doğu ve kuzey-batı bölgelerinde yüksek rakıma sahip seçilen 6 farklı yer için, rüzgar enerji potansiyel değerlendirmesi yapmıştır. (1971-

2007) yılları arası 36 yıllık veriler toplanarak 2 parametrelili Weibull dağılım fonksiyonları oluşturulmuştur. Sonuç olarak Gusau, Kaduna, Katsina, Kano, Bauchi, Potiskum bölgelerinde 10 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızları sırasıyla 6.09 m/s, 5.27 m/s, 7.44 m/s, 7.76 m/s, 4.83 m/s, 4.80 m/s olarak bulunmuştur. Rüzgar güç yoğunlukları ise sırasıyla 178.485 W/m<sup>2</sup>, 109.333 W/m<sup>2</sup>, 339.854 W/m<sup>2</sup>, 368.917 W/m<sup>2</sup>, 120.501 W/m<sup>2</sup>, 103.138 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

Yıldırım ve arkadaşları (2012), 2008-2009 yılları arasına ait saatlik ölçülen verileri kullanarak Niğde ili rüzgar enerji potansiyelini istatistiksel olarak incelemişlerdir. Rüzgar verilerinin değerlendirilmesinde istatistiksel yaklaşım olarak Weibull dağılımı fonksiyonu kullanılmıştır.

Durisić ve Mikulović(2012), Sırbistan'ın rüzgar enerji kaynaklarını analiz etmişlerdir. İstatistiksel analiz için Banaviste köyünde bulunan bir ölçüm istasyonundan 2009 ve 2010 yıllarına ait, yerden 10, 40, 50 ve 60 m yüksekliklerden toplanan ölçüm verileri kullanılmıştır. Analizler sonucunda ortalama rüzgar hızı, güç yoğunluğu, hakim rüzgar yönü ve Weibull dağılımları belirlenmiştir. 60, 50, 40 ve 10 m için ortalama rüzgar hızları ve güç yoğunlukları sırasıyla 5.80 m/s, 5.46 m/s, 5.33 m/s, 3.68 m/s ve 272 W/m<sup>2</sup>, 229 W/m<sup>2</sup>, 217 W/m<sup>2</sup>, 103 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Hakim rüzgar yönleri ise güneydoğu ve kuzeybatı olarak belirlenmiştir.

Lima ve Filho(2012), 2006-2009 yılları arasında Brezilya'nın kuzeydoğusundaki Paraíba eyaletindeki Sao Joao do Cariri (SJC)'nin rüzgar enerjisi kaynak değerlendirmesi analizi yapmışlardır. Yer seviyesinden 50 m ve 25 m yükseklikteki hız, sıcaklık değerleri sırasıyla 5.31 m/s, 24.25 °C ve 4.74 m/s, 24.46 °C olarak hesaplanmıştır. Hakim rüzgar yönü ise her iki yükseklik için güney-güneydoğu(GGD) olarak bulunmuştur. WAsP yazılımı kullanılarak Weibull parametreleri belirlenmiş ve güç yoğunluğu değerleri 50 m, 25 m için sırasıyla 145 W/m<sup>2</sup>, 103 W/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. 25 m hub yüksekliğine sahip 300 kW'lık rüzgar türbini kullanılarak elektrik birim maliyeti 0,046 €/kWh olarak hesaplanmıştır.

Abes ve Belhadj (2012), Tunus'un kuzey-batısında bulunan El-Kef'de rüzgar enerjisi geliştirme çalışması yapmışlardır. Diğer taraftan enerji ihtiyacının bir kısmını karşılamak amacıyla bölgede bulunan bir çimento fabrikası tarafından kurulan 15 MW'

lık bir rüzgar çiftliği projesi için değerlendirme yapılmıştır. Analizler için üç farklı rüzgar ölçüm istasyonundan alınan veriler kullanılmıştır. Veriler Weibull istatistiksel metod yöntemi ile analiz edilmiştir. Üç istasyon için yıllık ortalama rüzgar hızı değerleri sırasıyla 4.85 m/s, 5.14 m/s ve 5.54 m/s olarak hesaplanmıştır. Bölgenin hakim rüzgar yönü ise doğu olarak belirlenmiştir. Analizler sayesinde saha karakteristiğine en uygun yerlere seçilmiş rüzgar türbinleri yerleştirilmiş ve bölgenin rüzgar güç potansiyel tahmini yapılmıştır. Rüzgar çiftliği yerleşim tasarımı için Windstation ve 3DEM yazılımları kullanılmıştır. Sonuç olarak, rüzgar çiftliğinin yıllık enerji üretimi hesaplanmış ve proje ekonomik fizibilitesi yapılmıştır.

Janajreh ve arkadaşları(2013), Birleşik Arap Emirliklerine bağlı Masdar şehrinde 50 m' lik bir direktten alınan 2010 yılına ait farklı yüksekliklerde ölçülmüş verileri kullanarak bölgenin rüzgar karakteristiği analizini yapmışlardır. Yer seviyesinden 50 m, 40 m, 30 m ve 10 m yükseklikte ölçülen hız verileri sırasıyla 4.25 m/s, 3.95 m/s, 3.74 m/s ve 3.06 m/s' dir. Rüzgar güç yoğunluğu ise aynı yükseklikler için sırasıyla 81.08 W/m<sup>2</sup>, 66.59 W/m<sup>2</sup>, 59.56 W/m<sup>2</sup>, 37.36 W/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Sonuç olarak Masdar şehri rüzgar potansiyeli bakımından zayıf bir bölge olarak katagorize edilmiştir.

## 4. VERİ VE YÖNTEM

Bu bölümde, REPA üzerinden belirlenen bir sahada potansiyel belirleme çalışması yapılması için gerekli olan meteorolojik ölçüm verilerinin elde edilmesinde kullanılan cihazlar ile analiz için kullanılacak yardımcı yazılımlar teknik bilgilerle desteklenerek anlatılmıştır.

### 4.1 RÜZGAR ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

Rüzgâr ölçümleri, birçok alan için gereklidir. Bunlara örnek olarak meteoroloji, iklim, tarım, endüstriyel uygulamalar ve bilimsel araştırmalar verilebilir. Fakat saydığımız ölçümlerin hiç birisi rüzgar enerji üretim amacı için yapılan ölçümler kadar hassas ve dikkat gerektirmemektedir(Durak 2009, s.1). RES kurulmasının ilk aşaması olan rüzgar ölçümü, projenin başlangıç kısmıdır ve çok önemlidir. Uygun ölçüm sensörleri ile standartlarda yapılan ölçümler projenin geleceğini belirleyecek en önemli unsurdur. Rüzgar elektrik santralının projelendirilmesi ve proje ekonomisinin değerlendirilmesindeki tek parametre, ölçümler sayesinde elde edilmiş veriler ile yapılacak enerji hesabına bağlı olmaktadır(Durak ve Özer 2008, s.113). Ölçümlerin en az 12 ay boyunca ve sürekli olarak yapılması gerektiği dikkate alınır, çok küçük veri kaybı veya ölçüm yapacak sensörlerin doğru bir şekilde seçilmeden uygunsuz montajı büyük problemlere yol açabilmektedir. Bu gibi sebeplerden dolayı meydana gelebilecek hatalar, verilerin doğru bir şekilde değerlendirilememesine neden olmaktadır. Bu yüzden proje finansman aşamasında iken ölçümlerin bağımsız bir kurum tarafından istenmesi durumunda, uluslararası standartlara uygun ve doğru bir şekilde yapılmış rüzgâr ölçümleri sunulmalıdır(Durak 2009, s.1).

#### 4.1.1 Ölçüm Parametreleri ve Ekipmanlar

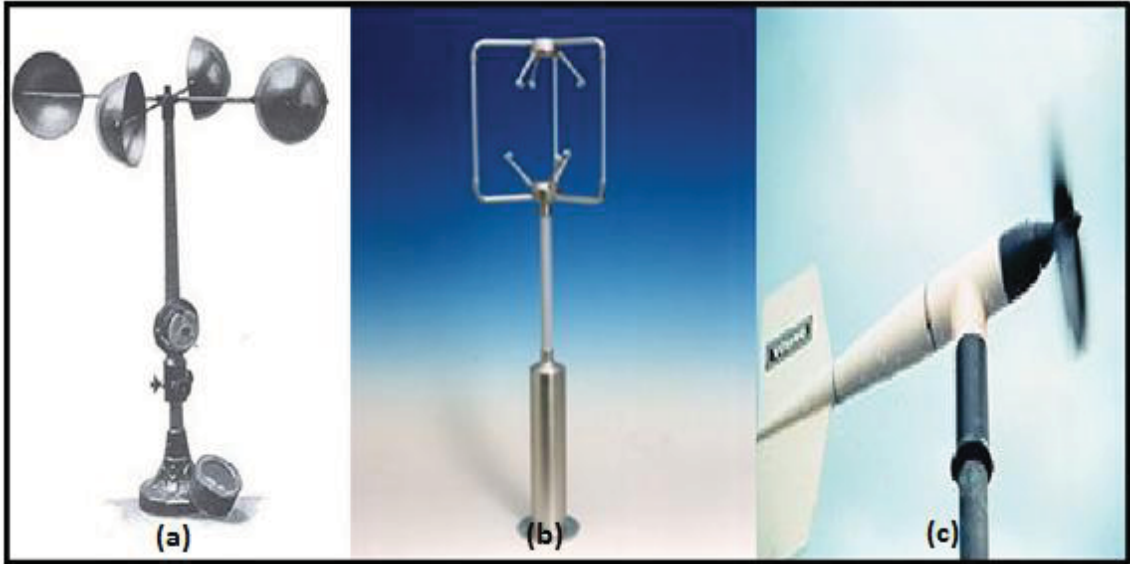
##### 4.1.1.1 Rüzgar hızı

Rüzgar hızı verisi, sahanın enerji potansiyeli belirlenmesinde kullanılan en önemli parametredir. Ayrıca sahanın yüksekliğe bağlı olarak hız değerlerinde değişim karakteristiklerinin tanımlanması ve türbülans yoğunluğunun bulunması için farklı yüksekliklerde rüzgar hızı ölçümlerine gerek duyulmaktadır. (Bailey ve diğerleri

1997,s.4-1). Sinoptik meteorolojide rüzgar hızı “knot”, klimatolojik meteorolojide de saniyede metre (m/s) veya saatte kilometre ( km/h) olarak kullanılır(Durak ve Özer 2008, s.113).

Anemometreler rüzgar hızını ölçen sensörlerdir. Şekil 4.1’ de görüldüğü gibi kepçe, ultrasonik ve kanatlı anemometre olmak üzere üç tip anemometre vardır. Kepçeli anemometre rüzgar enerji amaçlı çalışmalarında rüzgar hızını ölçmek için kullanılan ölçüm sistemidir. Ultrasonik anemometreler de kombine sensörlerdir ve diğer amaçlar için yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Rüzgar enerjisi çalışmalarında yeterince hassas değildir. kanatlı anemometreler, rüzgar enerji belirleme amaçlı ölçümlerde çok seyrek olarak kullanılırlar.

**Şekil 4.1: Anemometre türleri; (a) kepçeli anemometre, (b) ultrasonik anemometre (c) propeller anemometre**



Kaynak: Anemometer. 2012. <http://en.wikipedia.org>. [erişim tarihi:01.01.2013]

Rüzgar ölçümlerinde kullanılan en önemli sensör olan anemometre seçiminde dikkat edilmesi gereken bazı noktalar vardır. Bu noktalar aşağıda sıralanmıştır:

- Anemometrenin gövdesi keskin hatlara sahip olmamalı; küçük ve simetrik hatlara sahip olmalıdır.
- Rüzgarın değdiği kepçeler önemlidir. Kötü dizayn edilmiş kepçe yapısı, dinamik etkileri gerekli hassasiyette dikkate almayabilir.

- Ölçümlerde kullanılan anemometreler muhakkak kalibrasyon sertifikasına haiz olmalıdır.

#### 4.1.1.1.1 Anemometre kalibrasyonu

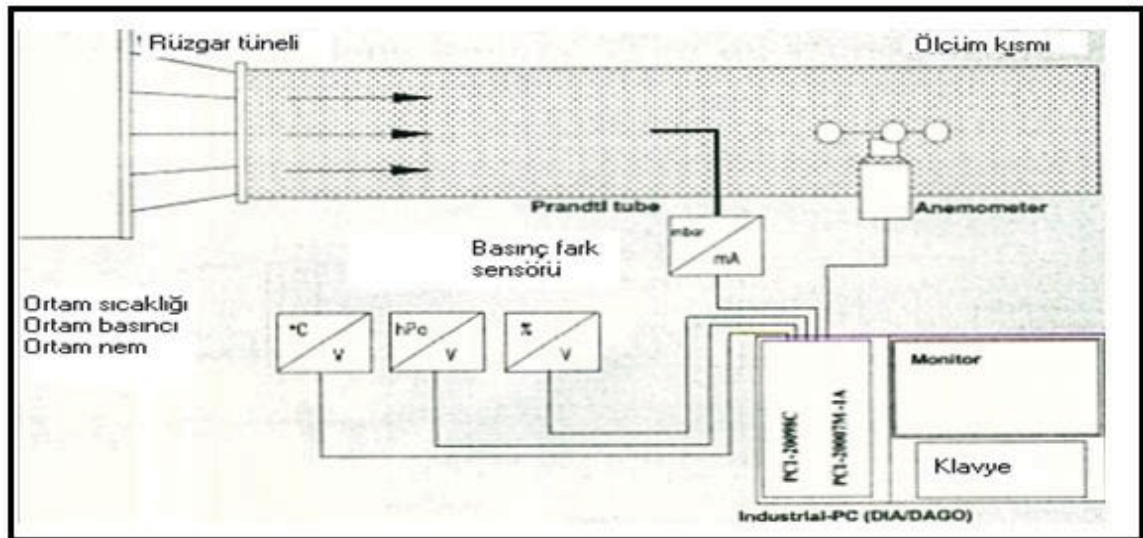
Kalibrasyon, referans şartlarına göre herhangi bir ölçüm cihaz veya sisteminin doğruluğunun test edilmesi, doğrulanması; eğer doğru çalışmıyor ise hata payının belirlenerek yüzde oranı olarak ifade edilmesi işlemidir.

Anemometre kalibrasyonu için aşağıdaki malzemelerin kullanılması ve uygulamaların yapılması zorunludur:

- Rüzgar tüneli,
- Kullanılan bütün ölçüm cihazlarının kalibrasyonlarının olması,
- ISO 3966 standartlarına uygun pitot tüpleri,
- Her kalibrasyon öncesi kullanılan bütün cihazların hazırlanarak bunun için ilgili enstitüde kullanılan referans anemometre ile test edilmesi,
- Akış kalite ölçümünün yapılması,
- Kalibrasyonun birkaç kez denemesi

Şekil 4.2' de bütün enstrümantasyonu tamamlanmış ve kalibre edilmeye hazır olan kalibrasyon sistemi görülmektedir.

**Şekil 4.2: Anemometre kalibrasyon sistemi**



Kaynak: Durak,2009, Measnet Stansartlarına Göre Yapılan Cup Anemometre Kalibrasyon Yöntemi, <http://tureb.com.tr>, Ocak 2013.

Veri toplama sistemi 10 m/s aralıklarla ve 50 bitlik bir sistemden oluşmalıdır. Kalibrasyon boyunca anemometre akış bozulmalarından etkilenmemesi için tüpün en üst kısmına monte edilir. Pitot tüpü, rüzgar tünelin test kesitine dik olarak yerleştirilir ve sapma 1° yi geçmemelidir. Anemometre test kesitine mümkün olabilecek en dik şekilde yerleştirilmelidir. Anemometre kalibrasyonuna başlamadan 5 dakika önce çalıştırılmaya başlanmalıdır. Kalibrasyon 4 - 16 m/s arasında 1 m/s aralıklarla kalibre edilmelidir. Örnekleme frekansı, en az 30 sn arasında ve 1 Hz frekansında olmalıdır. Zaman aralığı düşük çözünürlüklü anemometrelerde artırılabilir(Durak 2009).

#### 4.1.1.2 Rüzgar yönü

Sahanının hakim rüzgar yönünün bilinmesi için rüzgar yönü frekans bilgisi gerekmektedir. Genel olarak rüzgar yönü açı ile ifade edilmektedir. Rüzgar yönü frekans bilgisi, tercih edilen arazi şekillerini tanımlanmak ve sahanın içerisine konuşlandırılacak rüzgar türbinlerinin uygun optimizasyonu için oldukça önemlidir.

Rüzgar yön verilerinin ölçülmesinde kullanılan alet “rüzgar gülü” olarak adlandırılır. Şekil 4.3’ de gösterilen yüzgeçli model en tanınmış rüzgar gülü tipidir(Bailey ve diğerleri 1997,s.4-2). Rüzgar yönlerinin değişen frekanslarını ve rüzgar hızlarının dağılımını göstermek için, rüzgar hızı ve yönünün meteorolojik gözlemleri esas alınarak rüzgar gülü şeklinde çizim yapılmaktadır. Bir rüzgar gülü 8 veya 16 yöne göre olabilir(Durak ve Özer 2008, s.130).

#### Şekil 4.3: NRG #200P rüzgar gülü



Kaynak: NRG #200P Wind Direction Vane.2012, <http://www.nrgsystems.com>.  
[erişim tarihi: 02.02.2013]

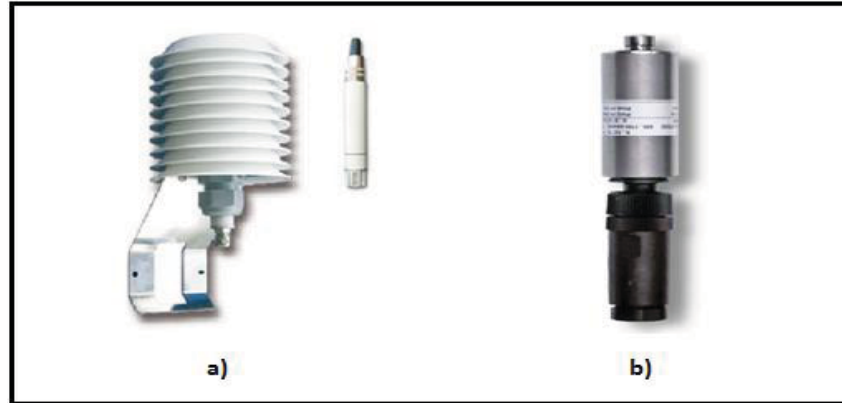
#### 4.1.1.3 Sıcaklık ve bağıl nem

Hava sıcaklığı, rüzgar çiftliği işletme ortamının önemli bir tanımlayıcısıdır. Sıcaklık verileri sahanın iklim durumunu göstermesinin yanında rüzgar enerji hesap parametrelerinden biri olan hava yoğunluğunun hesaplanmasında önemli rol oynar. Sıcaklık değerleri genel olarak °C veya °K cinsinden verilir. Toprakta gelen ısıdan etkilenmemesi için ölçümler yer seviyesinin 2-3 m üzerinde yapılır. Havanın nem oranının hesaplanması doğrudan rüzgar saha değerlendirmesini etkilemez fakat ölçüm bölgesinde buz oluşumu için potansiyel belirlemeye yardımcı olur. Nem değerleri yüzde olarak ifade edilir. Genellikle sıcaklık ve nem ölçümleri maliyetleri azaltmak adına kombine edilerek Şekil 4.4a’da gösterilen cihaz ile yapılmaktadır.

#### 4.1.1.4 Basınç

Basınç hava yoğunluğunu belirlemek için hava sıcaklığı ile birlikte kullanılır. Rüzgarlı ortamlarda doğru ölçüm yapmak zordur bu nedenle Şekil 4.4b ile gösterilen basınç sensörü kapalı bir ortam içerisinde muhafaza edilir. Basınç genel olarak milibar (mbar) veya hektopascal (hPa) cinsinden ölçülür(Bailey ve diğerleri 1997,s.4-2,3).

Şekil 4.4: a) Sıcaklık-nem sensörü, b) Basınç sensörü



Kaynak: Sensors.2012. [www.ammonit.com](http://www.ammonit.com). [erişim tarihi: 01.01.2013]

#### 4.1.2 Veri Kaydediciler

Veri kaydediciler sensörlerden gelen bilgileri belli zaman aralıkları ile kaydeden elektronik cihazlardır. Veriler isteğe göre saatlik veya 10’ ar dakikalık periyotlar halinde kaydedilir. Veri kaydediciler geniş uygulama alanı olan cihazlardır. Meteorolojik ölçümler doğrultusunda hız, yön, sıcaklık, basınç, nem, güç kaynağı parametreleri



kaydedilmektedir. Gelen veriler ortalama, standart sapma, maksimum ve minimum değerleri olarak depolanırlar. Ortalama değer hesaplamasını rüzgar hızı ( $V_{ort}$ ) için gösterecek olursak;

$$V_{ort} = \frac{\sum_{i=1}^k V_i}{k} \quad (4.1)$$

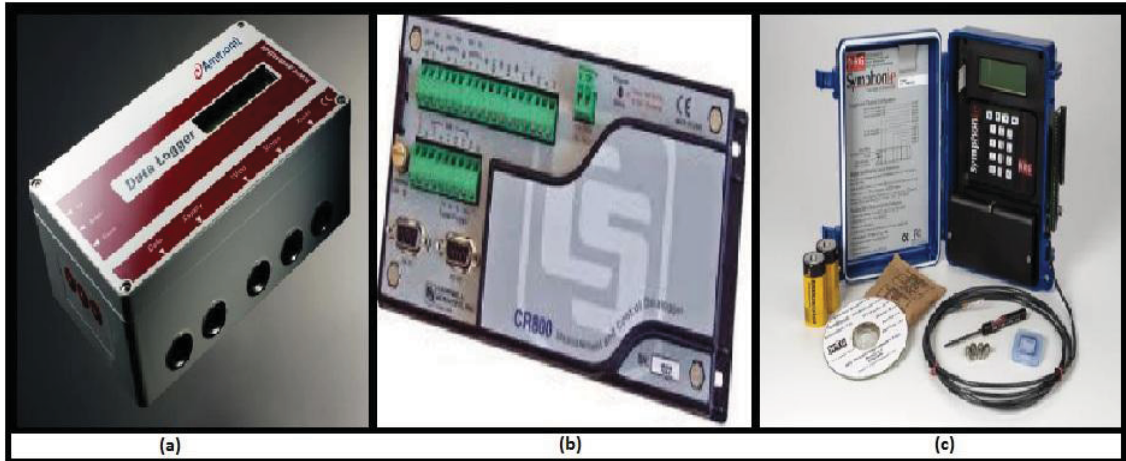
Standart sapma içinse;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (V_{ort} - V_i)^2}{(k-1)}} \quad (4.2)$$

denklemleri kullanmaktadır(Özgür 2006,ss.64-65).

Veri kaydediciler rüzgar ölçümleri için genellikle enerjinin kolayca götürülemediği uzak yerlerde kullanıldıklarından güç desteği piller ve akü yardımıyla sağlanmaktadır. Tipik olarak bilgisayarın seri portuna (USB ve RS232) arabirim kablosu ile bağlanılır. Bilgisayara kablo ile direkt olarak bağlanmanın yanında modem aracılığıyla uzaktan da bağlanılabilmektedir. Bu durumda tüm iletişim bir yazılım aracılığıyla yönetilebilmektedir. Şekil 4.5' de günümüzde en çok kullanılan veri kaydedici modelleri gösterilmiştir(Akyüz 2005).

**Şekil 4.5: Veri Kaydedici Modelleri a) Ammonit Meteo 32x, b) Campbell CR 800, c) NRG System**

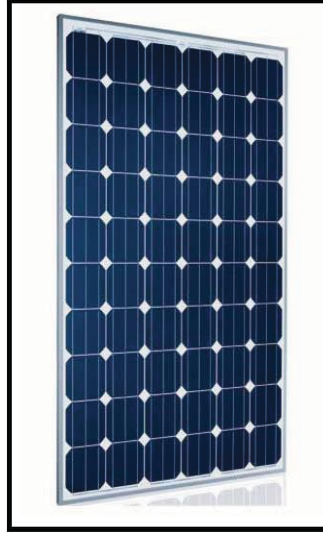


Kaynak: a) *Meteo-32*, 2012, [www.ammonit.com](http://www.ammonit.com). [erişim tarihi:01.01.2013], b) *Dataloggers*, 2013, [www.campbellsci.com](http://www.campbellsci.com). [erişim tarihi: 01.01.2013]. c) *Dataloggers*, 2013, [www.nrgsystems.com](http://www.nrgsystems.com). [erişim tarihi: 01.01.2013].

### 4.1.3 Solar Güç desteği

Rüzgar ölçümleri genellikle merkezi güç şebekesinden uzak olan bölgelere kurulduklarından enerji gereksinimleri güneş paneli ve akümülatör aracılığıyla sağlanmaktadır. Ölçüm sistemlerinde genel olarak Şekil 4.6' te gösterilen 20 W' lık güneş paneli aracılığıyla akümülatörde depolanan enerji ile veri kaydedici ve sensörler için gerekli güç sağlanmaktadır.

**Şekil 4.6: Solar panel**



Kaynak: Solar Power System. [tarih yok]. [www.earthenergyforhome.com](http://www.earthenergyforhome.com). [erişim tarihi: 05.03.2013]

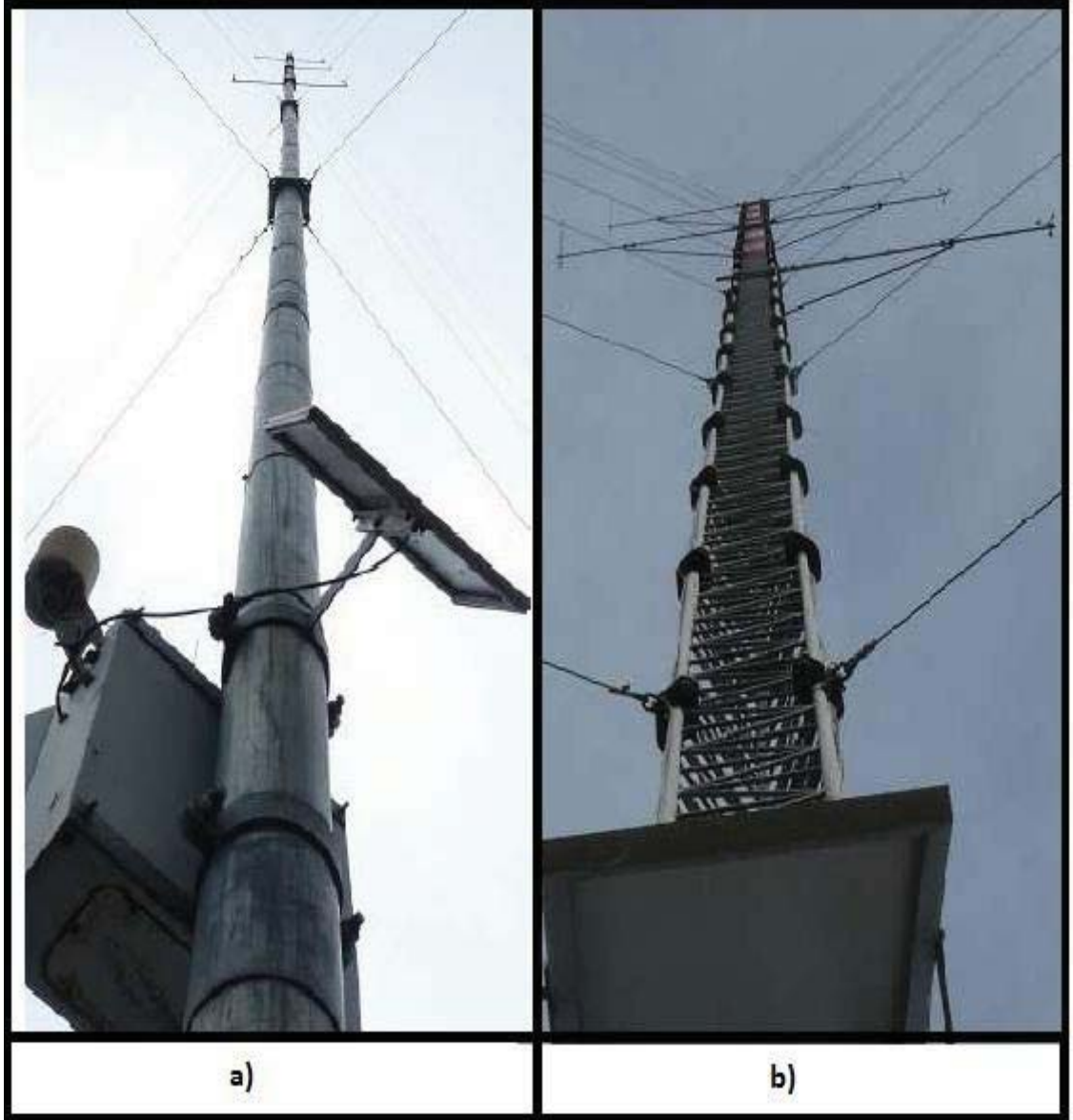
### 4.1.4 Rüzgar Ölçüm Direkleri

Santral sahasının karmaşıklığına göre santral sahasını en iyi temsil edecek bir ya da daha fazla ölçüm noktası belirlenir ve direkler bu noktalara konur. Ölçüm direkleri santral sahasındaki hakim rüzgar yönüne dik olacak şekilde yerleştirilir. Ölçüm direğinin yüksekliği en az rüzgar türbininin kule yüksekliğinin 2/3 katı kadar yapılır.

Ölçüm direklerinin boru ve kafes tipleri bulunmaktadır. Şekil 4.7 a)' da gösterilen boru tip direk bir bütün olarak yerde kurulur. Direk kurulduktan sonra ölçüm cihazları üzerine monte edilir ve "ginpole" adı verilen bir kaldırma mekanizması ile kaldırılarak yerine oturtulur. Bu tip direklerin dezavantajı, direktteki ölçüm cihazlarından herhangi birinde bir problem olduğunda direğin komple indirilip sorunu giderildikten sonra da yeniden kaldırılması gerektiğidir. Şekil 4.7 b)' de gösterilen kafes tipi direk topraktan başlayıp yukarıya doğru bir kedi basamağı gibi örülerek yapılmaktadır. En önemli

avantajı ölçüm cihazlarında bir problem olduğunda direğe tırmanarak sorunun giderilebilmesi ve 120 m' ye kadar varabilen yükseklerde ölçümlerin yapılabilmesidir(Ataseven 2009)

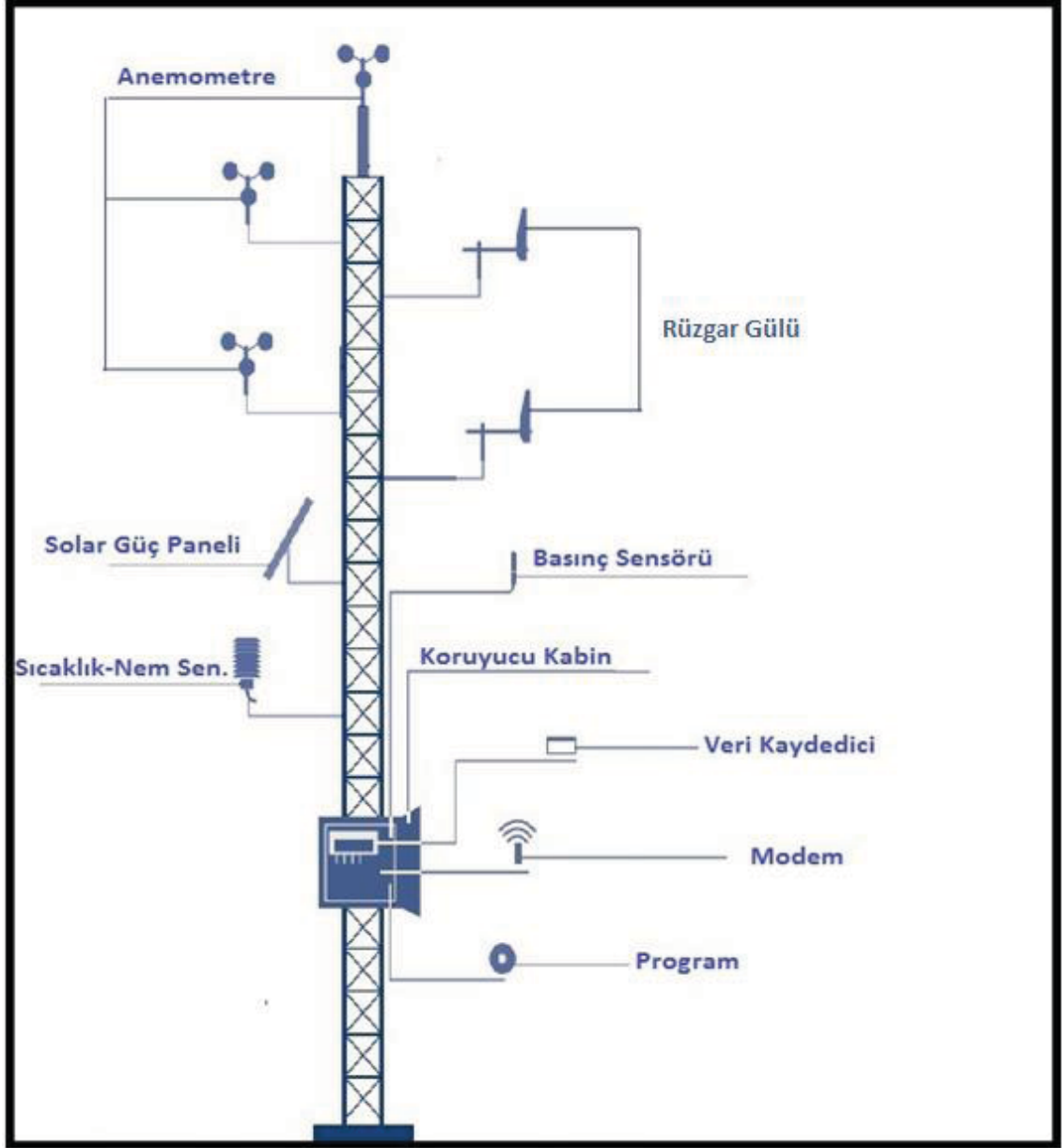
**Şekil 4.7: a) Boru tipi ölçüm direği, b) Kafes tipi ölçüm direği**



*Fotoğraf: ENİSOLAR Energy Solutions*

Şekil 4.8' de gösterimi verilen tipik bir rüzgar ölçüm sisteminde; anemometre, yön sensörü, sıcaklık sensörü, nem sensörü bulunmaktadır. Ölçüm sensörlerinden alınan veriler veri kayıt cihazına otomatik olarak aktarılmaktadır.

Şekil 4.8: Rüzgar ölçüm sisteminin temel bileşenleri



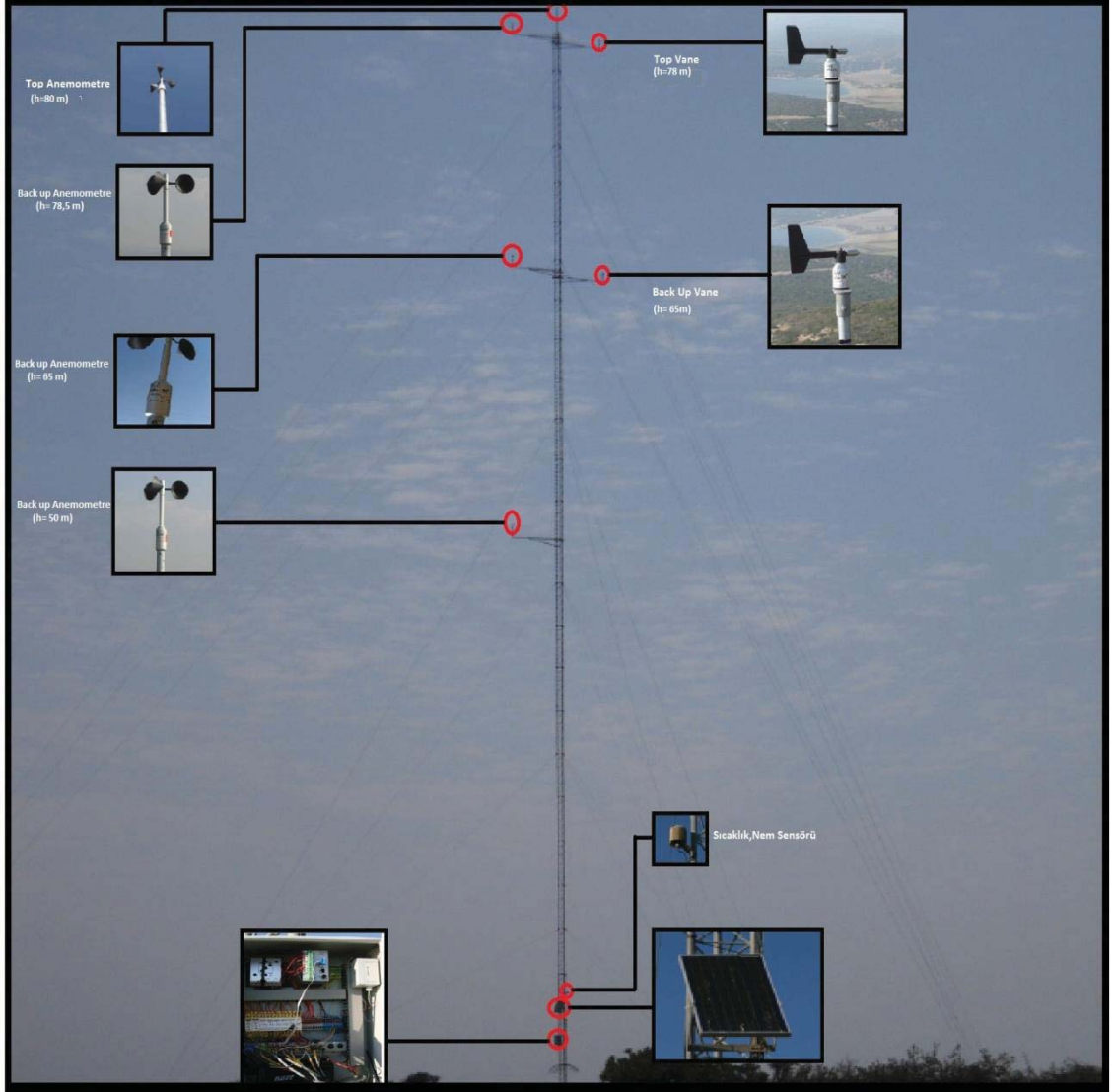
Kaynak: Product Overview. 2012. [www.ammnit.com](http://www.ammnit.com). [erişim tarihi: 01.01.2013]

## 4.2 İZ\_SEF RÜZGAR ÖLÇÜM İSTASYONU

İz\_Sef rüzgar ölçüm istasyonu ( İz\_Sef RÖİ), Şekil 4.9' da görüleceği üzere Türkiye'nin rüzgar potansiyeli yüksek illerinden birisi olan İzmir ili sınırlarında olup, şehir merkezinin yaklaşık 40 km güney-batısında yer alan ve 49 km' lik ege denizi sahil şeridinde sahip Seferihisar İlçesi' nde yer almaktadır.



Şekil 4.10: İz\_Sef RÖİ görünümü



Ölçüm sistemine ait ekipmanların temel özellikleri de şöyledir:

### **Thies Anemometre**

- Ölçüm aralığı; 0,3-75 m/s
- Ölçüm kararsızlığı; 0,3-50 m/s rüzgar hızı aralığı için < %1 veya <0,2 m/s
- Dayanıklılık hızı; 80 m/s (min. 30 dak.)
- Çalışma ortam sıcaklığı; -50..+80 °C
- Frekans; 1082 Hz (50 m/s)
- Genlik; max. 15V

### **Thies Compact Wind Wane**

- Ölçüm Aralığı; 0°-360°
- Kararsızlık;  $\pm 5^\circ$
- Çalışma ortam sıcaklığı; -40..+70°C
- Çalışma gerilimi; 5-14 V DC

### **Thies Compact Sıcaklık-nem**

- Çalışma gerilimi; 12... 30 V DC
- Ölçüm aralığı; -30°C..70°C (Sıcaklık için)
- Ölçüm aralığı; 0...100 % (nem için)
- Çalışma ortam sıcaklığı; -30...70°C( Sıcaklık-nem için)

### **Thales Basınç**

- Ölçüm aralığı; 800-1100 hpa
- Çalışma gerilimi; 9-15 V
- Çalışma ortam sıcaklığı; -25...85°C

### **Wilmers bluberry NDL 485 Datalogger (Veri Kaydedici)**

- Ölçüm aralığı; 0-2000 Hz
- Çalışma ortam sıcaklığı -40...70°C
- Çalışma Gerilimi; 5-24 V DC
- Veri Kaydetme Periyodu; 10 dk.
- Ort., Min., Max., Std. Sap. parametrelerini hesaplama

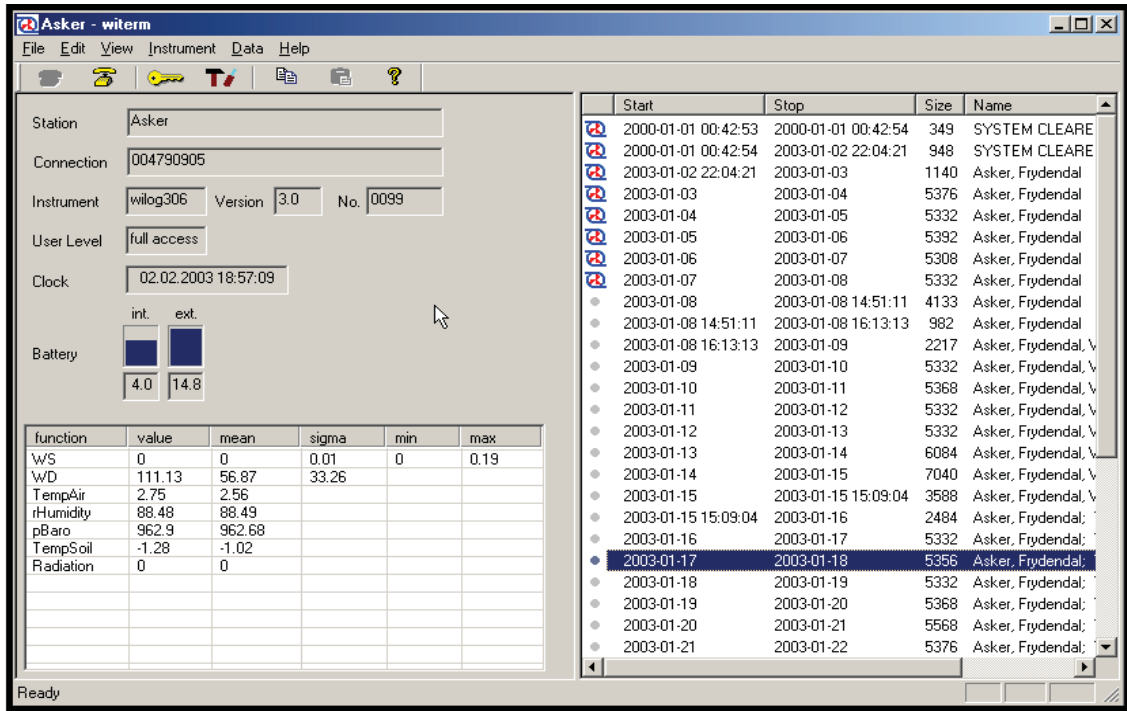
## **4.3 YÖNTEM**

Bu çalışmada verilerin depolanması ve değerlendirilmesi için bilgisayar yazılımları kullanılmıştır. İz\_Sef rüzgar ölçüm istasyonundan alınan günlük verilerin toplanması ve birleştirilmesi için “Witerm 3.0” yazılımı kullanılmıştır. Veriler GSM modem aracılığıyla uzaktan alınmıştır. Ölçüm verilerine dayalı olarak analizi yapılacak sahanın enerji hesaplamaları, rüzgar kaynak haritası ve rüzgar türbin yerleşim tasarımı WindPRO yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. WindPRO yazılımı içerisinde WAsP ara modül yazılımı kullanılarak rüzgar enerji hesaplamaları ve kaynak haritası oluşturmada katkıda bulunulmuştur. Aşağıda verilen bu programlar ana başlıklar halinde inceleyecek olursak:

### 4.3.1 Witerm 3.0 Yazılımı

Witerm 3.0; veri kaydedici ile bağlantı kurabilmek ve ölçülen verilerin kolay yönetilebilmesini sağlamak amacıyla geliştirilmiş bir yazılımdır. Şekil 4.11’ de gösterilen yazılım; veri kaydedicinin konfigürasyonunun sağlanması, ölçülen verilerin toplanması, dönüştürülmesi ve istatistiksel analizini gerçekleştirmektedir.<sup>11</sup>

Şekil 4.11: Witerm 3.0 yazılımı menüsü



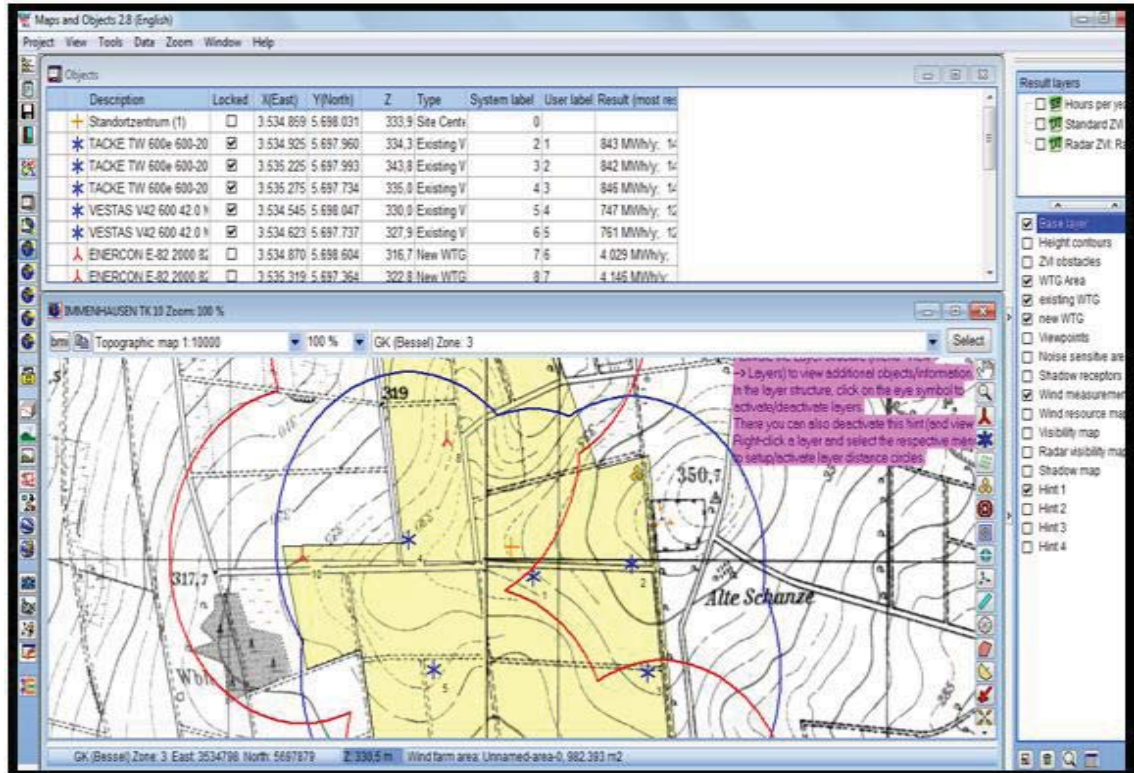
### 4.3.2 WindPRO 2.8 Yazılımı

WindPRO rüzgâr çiftliği veya tek bir rüzgâr türbini için tasarım ve planlama programıdır. Yazılım Danimarka, Aalborg’ da EMD Internatioanal A/S firması tarafından geliştirilmektedir. Yazılım, Windows XP/Vista/7/8 işletim sistemine sahip bilgisayarlarda çalıştırılabilmektedir. Yazılım üzerinde çalışma 2 farklı pencerede yapılmaktadır. Şekil 4.12’ de gösterilen pencerede haritaların ve diğer girdilerin hazırlanmasında yardımcı araç çubuklarının bulunduğu ‘maps and objects’ bölümü yer almaktadır.

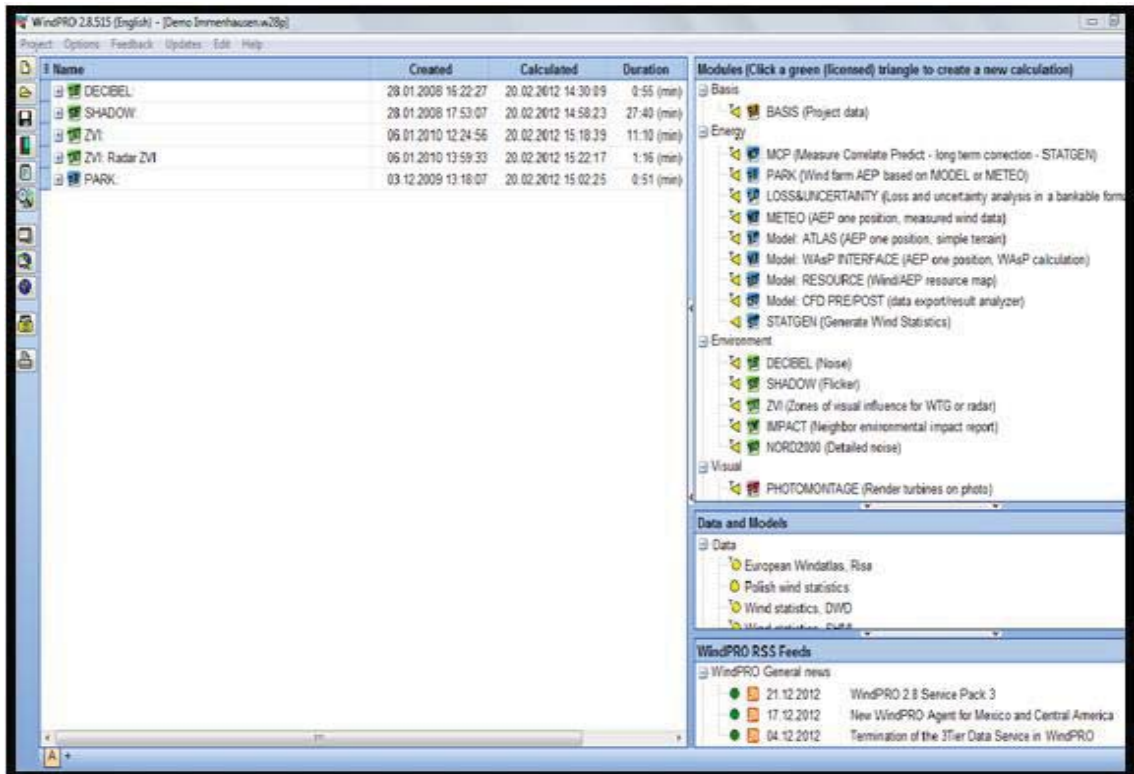
<sup>11</sup> Witerm 3.0 manual.2012. [www.wilmers.com](http://www.wilmers.com). [erişim tarihi: 28.04.2013]



Şekil 4.12: WindPRO ‘maps and objects’ penceresi



Şekil 4.13: WindPRO ana menü



Şekil 4.13' de gösterilen pencere ise hesap modüllerinin bulunduğu ana bölümdür. WindPRO amacına göre birden çok modülden oluşmaktadır. Modüller, kullanıcının ihtiyacı ve bütçesine göre ayrı ayrı fiyatlandırılmaktadır(Nielsen P. 2012 s.8). WindPRO yazılımının sahip olduğu modüller şöyledir;

- BASIS
- METEO
- MODEL
- MCP
- PARK
- LOSS&UNCERTAINTY
- OPTIMIZE
- NORD 2000
- SHADOW
- ZVI
- IMPACT
- PHOTOMONTAGE
- ANIMATION
- 3D-ANIMATOR
- eGRID
- WINDBANK

Bu çalışmada; WindPRO yazılımına ait BASIC, METEO, MODEL, OPTIMIZE ve PARK modülleri kullanılmıştır.

#### **4.3.2.1 BASIS modülü**

WindPRO' nun temel modülü olan BASIS, diğer tüm hesaplama modüllerinin kullanılabilmesi için gereklidir. BASIS aşağıdaki anahtar elemanları içermektedir:

- Proje Yönetimi: Proje Araştırmacıyla Dünya üzerinde projelerin tam bir gösterimi ile efektif olarak projelerin kontrol ve idaresinde kullanılan araçtır.

- Rüzgar Türbini Kataloğu: EMD tarafından yıllardan beri derlenmiş olan RT kataloğu ile 1000'den fazla türbine veriye sahiptir. Veriler sürekli olarak güncellenmekte ve elle eklenebilen türbin özellikleriyle geliştirilebilmektedir.
- Harita Yönetim Sistemi: taranmış, internet üzerindeki veya diğer sayısal ortamlardaki haritaların WindPRO ile bağlantısını kuran ve arka fonda gösterilen haritalar üzerinde doğrudan proje çalışmaları yapılmasına ve veri girişine imkan sağlayan bir araçtır.
- Projelendirme / Veri Girişi: Kullanıcı, BASIS modülünü kullanarak projede kullanılan tüm objelerle ve harita üzerinde bunların yerleşimiyle ilgili bir rapor hazırlanabilir.
- Özel Araçlar: katmanlar halinde veri girişi, eş yükseklik eğrilerinin fondaki resim harita üzerinden renk tanıma özelliği sayesinde gelişmiş yöntemlerle sayısallaştırılması, kırpma ve düzeltilmesi; Topografyanın rüzgar türbini (RT) ve ölçüm istasyonlarıyla birlikte profil kesitinin sunumu; hızlı profil kesit gösterim aracı; farklı çözünürlükte haritalı ve kişiselleştirilebilir etiketli raporlar hazırlamak için Harita Düzenleyici gibi çeşitli amaçlar için geliştirilmiş araçlara sahiptir.
- Çevrimiçi veri servisleri (ücretsiz): dünyanın neredeyse tamamını kapsayan eş yükseklik eğrisi verileri; çeşitli kaynaklardan pürüzlülük verileri, arka planda gösterilebilecek uydu görüntüleri ve çeşitli haritaları WindPRO' ya aktarmak mümkündür.

#### **4.3.2.2 METEO modülü**

METEO modülünün üç fonksiyonu vardır:

- Ölçülen rüzgar verisinin yüklenmesi, analizi ve sunumu
- Çevrimiçi veri tabanımızda bulunan referans verileri (hem meteoroloji ölçümleri hem de orta ölçekli modelleme verilerini) indirme. Verilere erişim Measure-Correlate-Predict (MCP) modülü lisansını gerektirir.
- Bir rüzgar türbininin üretimini saha içerisinde ölçülmüş rüzgar verisine dayalı olarak, WASP v.b. bir yazılım kullanmadan hesaplama yapılabilmektedir.

METEO modülü ile her tür veri okunabilir, zaman serileri düzenlenebilir veya frekans tabloları şeklinde özetlenerek, Weibull Dağılım değişkenleri elde edilebilir. Zaman serilerini görsel olarak kontrol etmek, noktalı, yönsel dağılım, günlük, aylık grafikler üretmek mümkündür. Farklı ölçüm yüksekliklerinde kaydedilen veriler tüm grafiklerde karşılaştırılabilir, seçilen veriler kolayca görsel olarak veya filtreler kullanılarak devre dışı bırakılmak suretiyle hatalı veriler elimine edilebilir. Gözden geçirilmiş veri MODEL modülü ve WAsP yazılımı kullanılarak, rüzgar istatistiklerinin hesabında kullanılabilir.

#### 4.3.2.3 MODEL Modülü

MODEL modülü, WAsP rüzgar modeli ile PARK üretim hesaplamaları için gerekli arayüzü sağlar. Gerekli veri dosyalarını hazırlayarak ve elde edilen rüzgar kaynak haritasını yüklemek suretiyle diğer çeşitli Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (H.A.D.) modelleri için de arayüz olarak kullanılır. Kullanılan modele göre farklı nesnelere ve bilgi gerekir.

- **WAsP rüzgar atlası istatistiği oluşturma:** Bu, arazi yapısının pürüzlülük, eş yükseklik (alan veya çizgi) ve perdeleyici engel nesnelere girilmesini gerektirir. Bunlar, bir Site Data nesnesinde birleştirilir ve Meteo nesnesinde yüklü rüzgar verisiyle birlikte WAsP' a gönderilir.
- **WAsP ile YEÜ (Yıllık Enerji Üretimi)' nin hesaplanması:** Yukarıda belirtilen arazi yapısı girdilerinin yanı sıra rüzgar atlası istatistikleri kullanılır. Hesaplar tek bir konumda istenen sayıda farklı türbin tipi için yapılabilir.
- **WAsP ile rüzgar kaynak haritası hesaplama:** Aynı arazi yapısı girdileri ile birden fazla rüzgar atlası istatistiği kullanılarak hesaplama yapılabilir. Harita için RT alanı nesnesiyle çizilen herhangi bir alan tanımlanabilir. Elde edilen kaynak haritası çalışılan harita üzerinde gösterilebilir.

Aynı zamanda PARK hesabında rüzgar modeli olarak veya OPTIMIZE modülüyle türbin yerleşiminin optimizasyonunda kullanılabilir.

#### 4.3.2.4 OPTIMIZE modülü

OPTIMIZE modülü birlikte veya ayrı ayrı kullanılabilen üç yöntemle çalışarak RT yerleşimini en uygun şekle getirme işlemi yapabilir.

**A:** Düzenli yapı: Geometrik bir yerleşim için kati şartlara uyan yerleşim tasarımı (düz paralel çizgiler üzerinde eşit mesafelerde konuşlandırılan türbinler, örn. Deniz içinde... Ark biçimli yerleşimler de düzenlenebilir) Yazılım, otomatik olarak çeşitli değişkenleri (açılar, mesafeler, sıra ofseti v.s.) test eder. Sınırlar sayısallaştırılarak, yerleşimin kısıtlı bir alan içerisinde tutulması sağlanabilir. Sonuç en yüksek enerji üretimini veren yerleşimdir. Ancak her hesaplama adımı bir tabloya ihraç edilerek en ekonomik türbin yerleşimini bulmak için işlenebilir. Sözgelimi deniz-içi türbin yerleşimi optimizasyonunda her hesaplama adımındaki su derinlikleri ihraç edilen tabloların bir parçasıdır.

**B:** Düzensiz yapı: Bir RES yerleşiminin sınırlandırılmış bir alan içerisinde en yüksek enerji üretimine göre otomatik optimizasyonu yapılır. Alan sınırlaması manuel olarak veya bir alan dosyası yükleyerek tanıtılabilir. Optimizasyon süreci otomatik olarak komşularla olması gereken mesafeleri ayarlar.

**C:** Gürültü optimizasyonu – RT konumları sabit kalmak kaydıyla, her bir türbinin gürültü kıstaslarına uyacak şekilde çalıştırma şartlarını optimize eder.

#### 4.3.2.5 PARK modülü

PARK modülü bir veya daha fazla RES' in yıllık üretiminin hesaplamasında kullanılan esnek bir araçtır. RT' ler "eski" (halihazırda mevcut) veya "yeni" olarak girilebilir, tümü dikkate alınarak hesaplanır ve ayrı ayrı raporlanır. Gerekliğinde, eski türbinlerde yenilerin eklenmesiyle oluşabilecek kayıplar da özdevimli olarak hesaplanabilir. WindPRO' nun tabakalı gösterim özelliği sayesinde farklı yerleşimler hızla birbirleriyle karşılaştırılıp denenebilir. PARK modülünde çeşitli iz bölgesi kaybı, gelişmiş türbülans ve çeşitli türbin etki modeli(wake model) araçları bulunur.

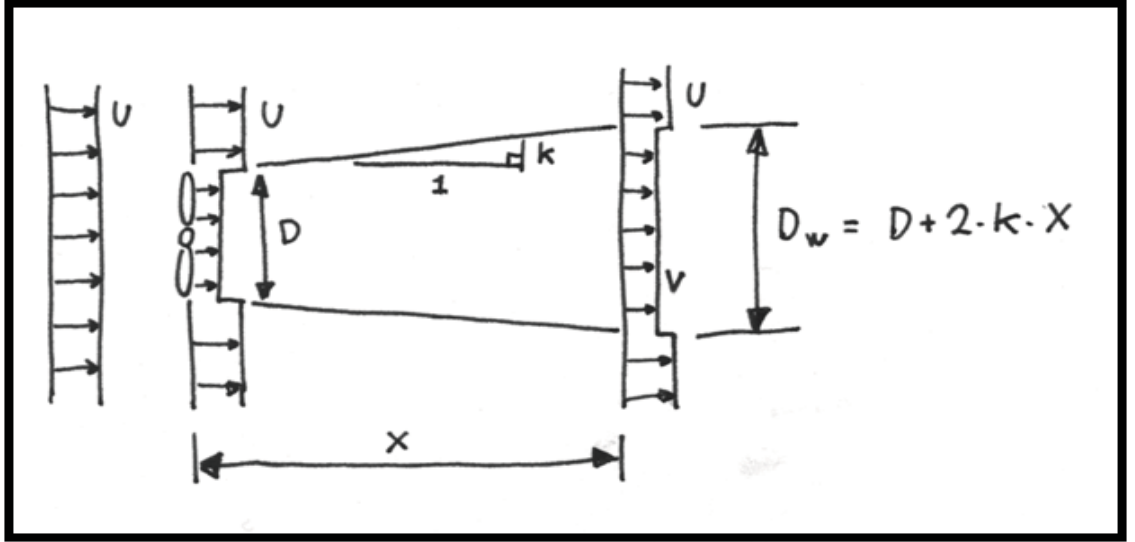
PARK modülü, rüzgâr verisinin zamanla değişimine dayalı süreç eğrilerini gösteren raporlar sunar. Hesaplanan üretimler, rüzgar ölçümlerinin her bir RT konumuna taşınmasını ve her bir zaman adımı için iz bölgesi kaybı hesaplamalarını içermekle,

gerçek ve hesaplanan üretim değerlerinin analizine yeni bir boyut getirmektedir. Son olarak, PARK modülü santral güç eğrisi doğrulama için veri hesaplayabilir.<sup>12</sup>

#### 4.3.2.5.1 N.O.Jensen park etkisi(wake) modeli

Şekil 4.14' de gösterilen N.O. Jensen wake modeli basit bir model türüdür. Bu modelde serbest şekilde esen rüzgarın bir kısmının türbinde soğurulması sonucunda türbinin arkasındaki hava akışı incelenmektedir. Çalışmamızda bu modele göre WindPRO' da PARK hesabı yapılmıştır.

Şekil 4.14: N.O. Jensen wake modeli



Kaynak: Thogersen M.L. 2005, Wake and turbulence models in WindPRO [online], Aalborg, <http://help.emd.dk>. [erişim tarihi: 01.05.2013]

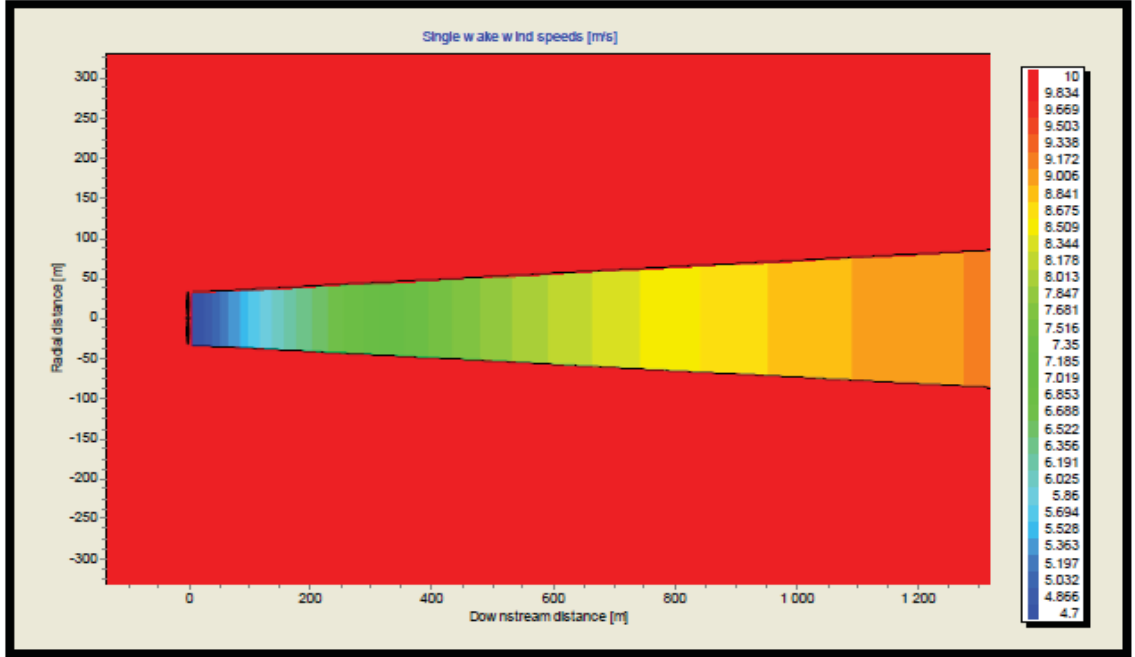
Tek bir türbin için hız değişimi hesaplanırken; türbin etkisi ile azalan hız V, “Denklem 4.3” ile hesaplanmaktadır.

$$1 - \frac{V}{U} = (1 - \sqrt{1 - C_T}) / (1 + 2kX/D)^2 \quad (4.3)$$

Burada  $C_T$  (thrust coefficient) itme katsayısı olarak adlandırılır. Bu katsayı serbest rüzgar ile türbin etkisi sonrası oluşan rüzgar akışı arasındaki ilişkiyi belirlemede kullanılır. Türbin etkisi sonrası oluşan rüzgar formundaki değişiklik Şekil 4.15' de gösterilmiştir(Thogersen M.L. 2005).

<sup>12</sup> Windpro yazılımı modül açıklaması. [ tarih yok]. <http://www.emd.dk/WindPRO/Modules/>. [erişim tarihi: 20.04.2013].

Şekil 4.15: N.O.Jensen türbin etkisi(wake) modeline göre rüzgar formu



Kaynak: Thogersen M.L. 2005, Wake and turbulence models in WindPRO [online], Aalborg, <http://help.emd.dk>. [erişim tarihi: 01.05.2013]

### 4.3.3 WAsP Yazılımı

WAsP yazılımı şimdiye kadar geliştirilen rüzgar analiz programlarının en eskisi olup Danimarka Risoe Ulusal Laboratuvarı Meteoroloji Bölümü tarafından hazırlanmıştır. Rüzgar Atlas Analiz ve Uygulama Programı' nın baş harflerinden oluşan WAsP, modeli 4 ana işlemde oluşmaktadır:

- Ham veri analizi: İlk adım olan bu kısımda, rüzgar verisinin zaman serisi analizi yapılmaktadır.
- Rüzgar atlası verisinin oluşturulması: Analiz edilen zaman serileri, rüzgar atlas verilerine çevrilir. Bu kısımda, rüzgar ölçümleri özel arazi koşullarına (engel, pürüzlülük) arındırılır.
- Rüzgar ikliminin belirlenmesi: Rüzgar atlası verileri kullanılarak bölgenin rüzgar iklimi belirlenir.
- Rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi: Son olarak da, ortalama rüzgar hızı alınarak bölgenin enerji potansiyeli belirlenir.

WAsP yazılımı, tıpkı WindPRO yazılımı gibi alt modelleri ile ana program arasında veri akışı sürekli bir etkileşim halindedir. Bu modelleri alt başlıklar halinde sıralayacak olursak;

#### 4.3.3.1 Engel perdeleme modeli

Rüzgar elektrik santral kurulacak proje sahasında bulunan engellerin rüzgar akışına çok önemli etkileri vardır. Özellikle bina, orman, ağaç, kayalık, tepe vb. engeller rüzgar şiddet ve yönüne önemli etkilerde bulunurlar. Herhangi bir engelin perdeleme etkisi aşağıdaki parametrelere bağlıdır:

- Hesaplama noktasının engelden olan uzaklığı (x),
- Engelin yüksekliği (h),
- Hesaplama noktasının yüksekliği (H),
- Engelin uzunluğu (L),
- Engelin geçirgenliği (p),

Engel, rüzgarın geçirgenliğine de etki etmektedir. Geçirgenliği (porozite) artış ve engel uzunluğunun azalması perdeleme etkisini zayıflatmaktadır. Perdeleme etkisi sonucu rüzgar hızında ortaya çıkan azalma, denklem (4.4) ile hesaplanmaktadır;

$$R_2 = \left(1 + 0,2 \frac{x}{L}\right)^{-1}, \frac{L}{x} \geq 0,3 \quad (4.4)$$

$$u' = u \cdot [1 - R_2 \cdot R_1(1 - p)] \quad (4.5)$$

Burada  $R_2$ , ortalama rüzgar hızındaki azalmayı,  $u$  ve  $u'$  ise, sırasıyla ortalama rüzgar hızı ve düzeltilmiş ortalama rüzgar hızını göstermektedir.  $R_1$  ise, oransal rüzgar hızı azalmasını belirtmektedir.

#### 4.3.3.2 Orografik model

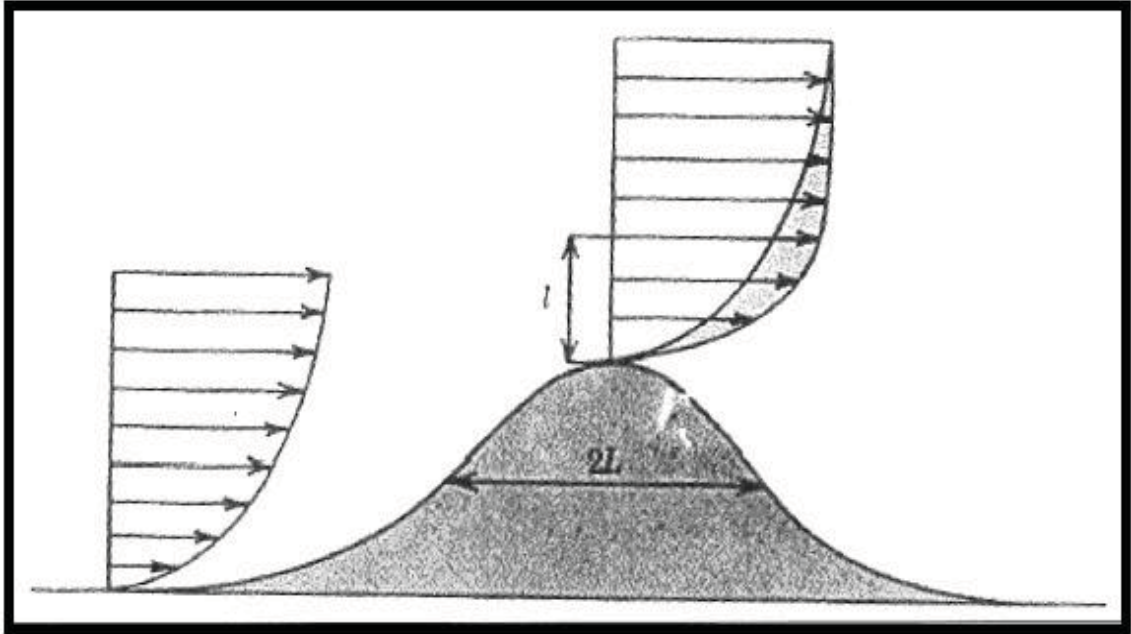
Bu modelin amacı, yüzey şekillerinin rüzgar profillerine etkisini azaltmaktır. Yatay olarak çok geniş bir alanın etkilerini hesaplayabilmektedir.

Topografik modelde, pürüzlülük değişim modeli ve perdeleme modellerinde olduğu gibi, ölçülmüş rüzgar verileri üzerinde yüzey yapılarının etkisi düzeltilmektedir. Bu model, yatay olarak onlarca kilometreye kadar olan etkileri dikkate almaktadır. Tepeler



üzerindeki akış analiz modeli temel alınarak yapılan model, bazı farklılıkları içermektedir. Modelin yapısını arazideki yükseklik değişimleri oluşturmaktadır. Şekil 4.16' da görüleceği üzere % 5' lik bir yükseklik artışının ortalama rüzgar hızı üzerinde % 5' lik bir etkisi görülürken, muhtemelen türbin göbek yüksekliğinde mevcut rüzgar güç artışı % 15 kadar etkilenmektedir. Akışı karakterize eden iki farklı uzunluk (L,I) gösterilmiştir. L tepenin karakteristik bir uzunluğudur, burada tepenin ortasındaki yarı genişliğidir, I, hız artışının maksimum olduğu yüksekliktir. Kompleks arazilerde ise hesaplamalar çok güç olduğu için çoğu durumlarda sayısal model kullanmak gereklidir.

**Şekil 4.16: Rüzgar alan yamaç ve zirve akışının rüzgar profilleri**



*Kaynak: Durak M. ve Özer S., 2008., Rüzgar Enerjisi: Teori ve Uygulama, s.87*

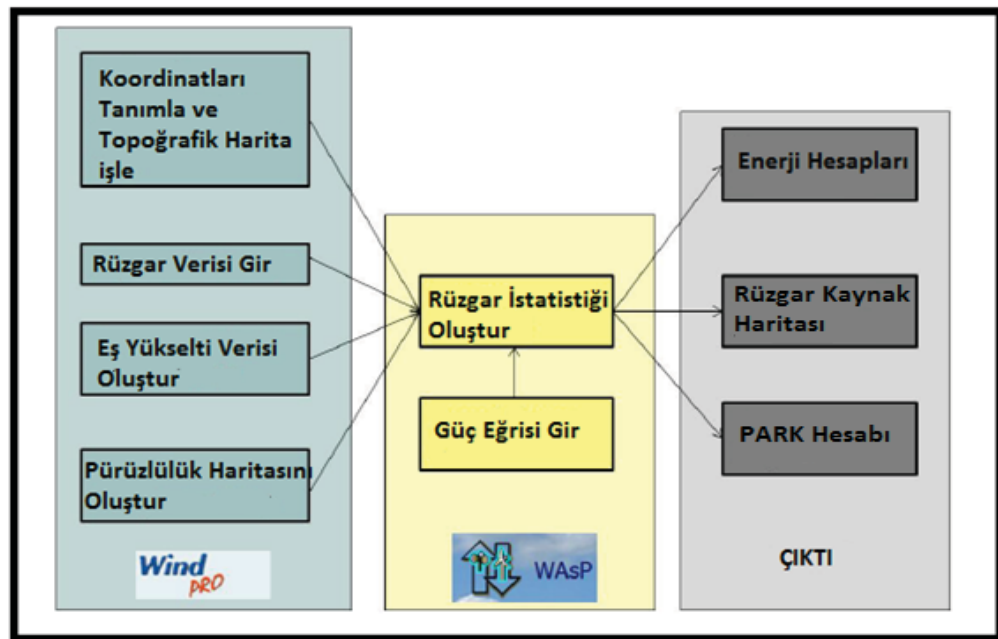
#### **4.3.3.3 Pürüzlülük değişim modeli**

İncelenen bir alanın pürüzlülüğü, bu alanın üzerindeki pürüzlülüğe neden olan cisimlerin alanı içindeki pozisyonu ve boyutlarına bağlıdır. Arazi pürüzlülüğü, pürüzlülük uzunluğu ile belirlenir. WAsP' ta kullanılan pürüzlülük sınıflarına göre pürüzlülük uzunluk değerleri Bölüm 2' de Tablo 2.1 ile gösterilmiştir. (Durak ve Özer 2008 ss. 81-88).

#### 4.3.4 WindPRO ve WAsP Yazılımları İçin Model Uygulaması ve Girdi Parametreleri

WindPRO ve WAsP yazılımı kullanılarak bir alanının rüzgar ve enerji modellerini oluşturmak için, koordinatlar, rüzgar verisi ve haritalar WindPRO'ya işlenmelidir. WAsP rüzgar istatistiği oluşturmak amacıyla işlenen verileri kullanır. Şekil 4.17' de görüldüğü üzere WAsP türbinlerin güç eğrileri ile birlikte çıktıları oluşturabilir (Acker T. 2011 s.3).

Şekil 4.17: WindPRO ve WAsP kullanarak rüzgar modelleme prosedürü



##### 4.3.4.1 Topografik harita ve rüzgar verisi

Bu çalışmada WindPRO' yazılımına girdi olarak kullanılacak ilk veri Şekil 4.18' de gösterilen 1:25000 ölçekli topografik haritadır. Verinin işlenmesinin ardından koordinat tanımlanarak, topografik harita yazılım içerisinde kullanılabilir hale getirilir. Yazılım içerisinde kullanılacak diğer bir girdi parametresi ise rüzgar verisidir. Yazılım içerisinde Seferihisar rüzgar ölçüm istasyonundan toplanan veriler kullanılmıştır. Her bir yükseklikteki sensörlere ait ölçüm verileri yazılımda tanıtılmıştır. 80 m yükseklikteki anemometre bir süre arızalı olduğu için yazılım içerisinde tanıtılmayarak hesaplamalara dahil edilmemiştir.

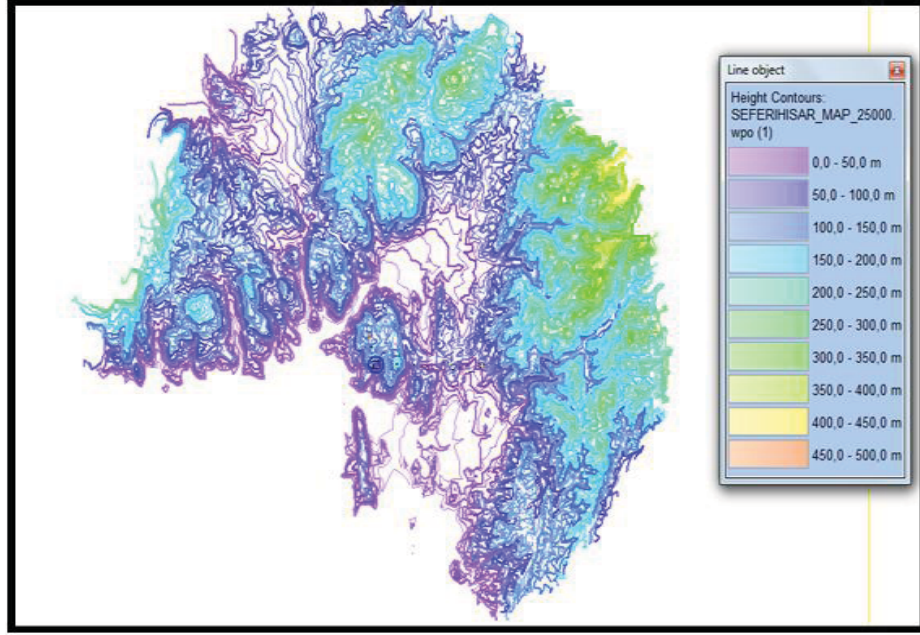
**Şekil 4.18: 1:25000 ölçekli Topoğrafik harita**



#### **4.3.4.2 Eşyüksekti çizgileri verisi**

Eşyüksekti çizgisi verisi, United States (US) Jeoloji Etüd Merkezi tarafından sağlanan Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) veritabanından alınmıştır. Şekil 4.19’ da gösterilen eşyüksekti çizgileri verisi WindPRO yazılımı tarafından online bağlantı kurularak sağlanmış ve programda tanıtılmıştır.

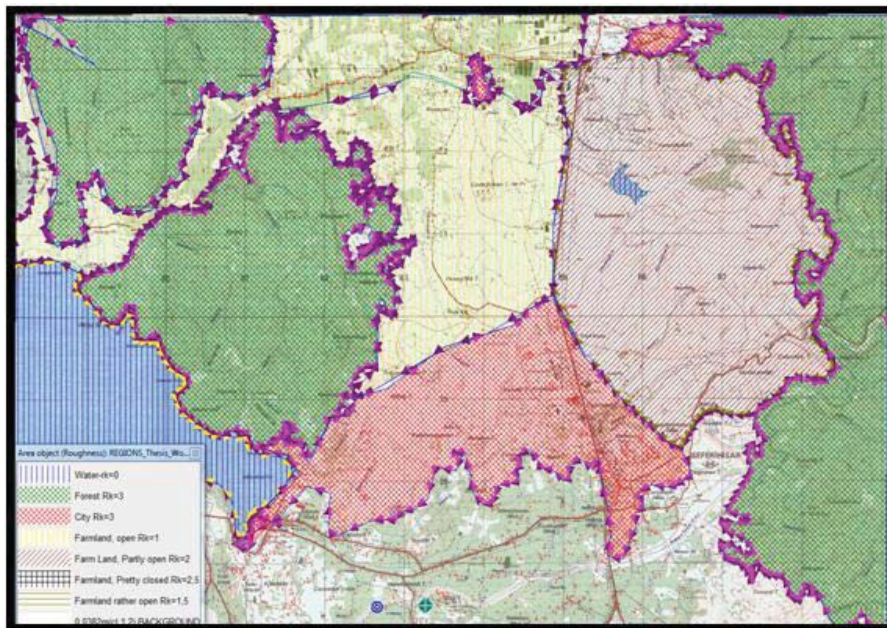
Şekil 4.19: SRTM-Eşyüksekti çizgileri verisi



#### 4.3.4.3 Pürüzlülük haritası

Rüzgar profili yüzeyin pürüzlülüğüne bağlı değişim gösterdiğinden çalışma yapılacak alan ve çevresinde yüzey pürüzlülük verisinin oluşturulması gerekmektedir. WindPRO yazılımı bize Şekil 4. 20' de gösterilen yüzey pürüzlülük haritasını oluşturmaya olanak sağlamıştır.

Şekil 4.20: WinPRO yazılımında oluşturulmuş pürüzlülük haritası



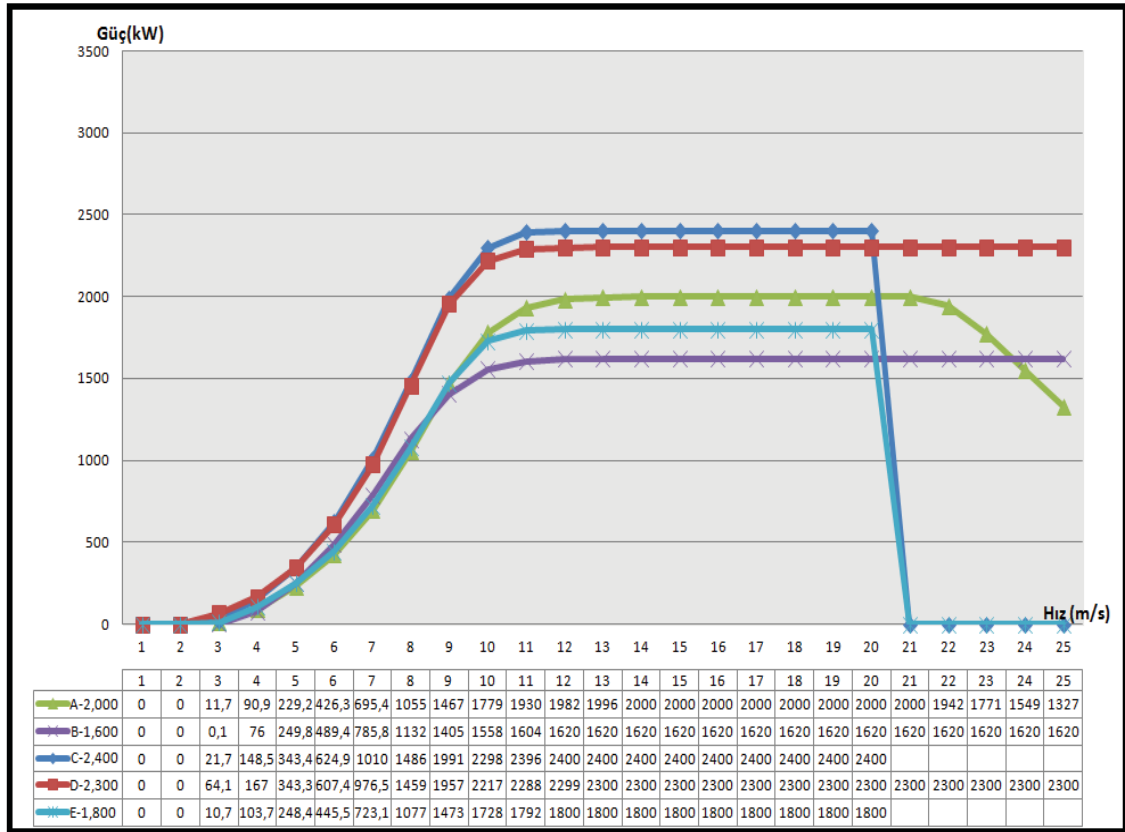
#### 4.3.4.4 Rüzgar istatistikleri

WindPRO ve WAsP yazılımı ile rüzgar ve enerji hesaplamaları yapmak için tüm girdi parametrelerinin bir arada olduğu rüzgar istatistikleri dosyası oluşturmak gerekmektedir. Bu dosya bize tüm parametreleri teker teker girerek hesaplama yapmak yerine tek bir dosya girdisiyle işlem yapabilme olanağı sağlar.

#### 4.3.4.5 Rüzgar türbinleri ve güç eğrisi

Bir rüzgar sahasında yapılacak yerleşim ve enerji hesabı için bölgeye ait orografya ve pürüzlülük bilgilerinin yanı sıra seçilen türbinlerin özellikleri ve güç eğrisi değerlerinin de bilinmesi gerekir. WindPRO yazılımı 1000' den fazla türbin modeli için özellikleri ile birlikte güç eğrisi bilgisi sunabilmektedir. Çalışmada kullanılan rüzgar türbinlerine ait bilgiler WindPRO yazılımı aracılığıyla elde edilmiştir. Çalışmada yer alan rüzgar türbinlerine ait güç eğrisi grafiği Şekil 4.21' de verilmiştir.

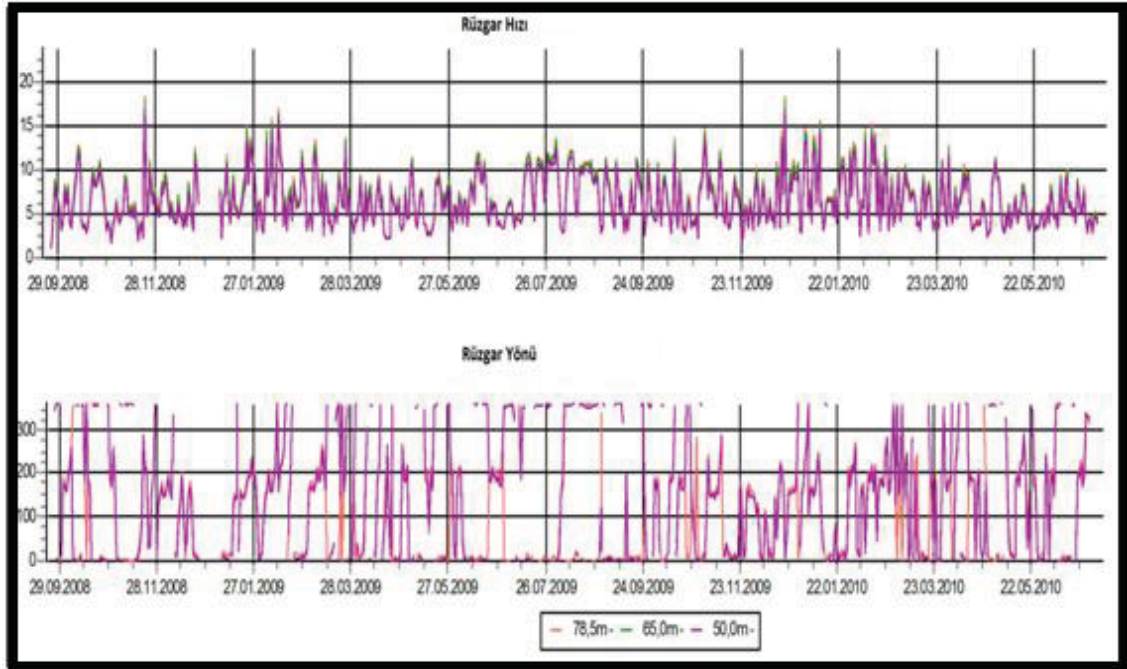
Şekil 4.21: Çalışmada kullanılacak türbinlere ait güç eğrisi ( $\rho = 1.191 \text{ kg/m}^3$ )



## 5. BULGULAR

80 m' lik İz\_Sef RÖİ' den (25.09.2008-30.06.2010) tarihleri arası 10' ar dakikalık periyotlar halinde toplam 90484 satırlık veri toplanmıştır. Analizler için 3 anemometre, 2 rüzgar gülü, 1 basınç sensörü, 1 sıcaklık-nem sensörü verileri kullanılmıştır. Bozuk verilerin elenmesinin ardından oluşturulan zaman serisi istatistiği Şekil 5.1' de verilmiştir.

Şekil 5.1: Rüzgar hız ve yön zaman serisi



### 5.1 ÖLÇÜM PARAMETRELERİNE AİT İSTATİSTİKİ BULGULAR

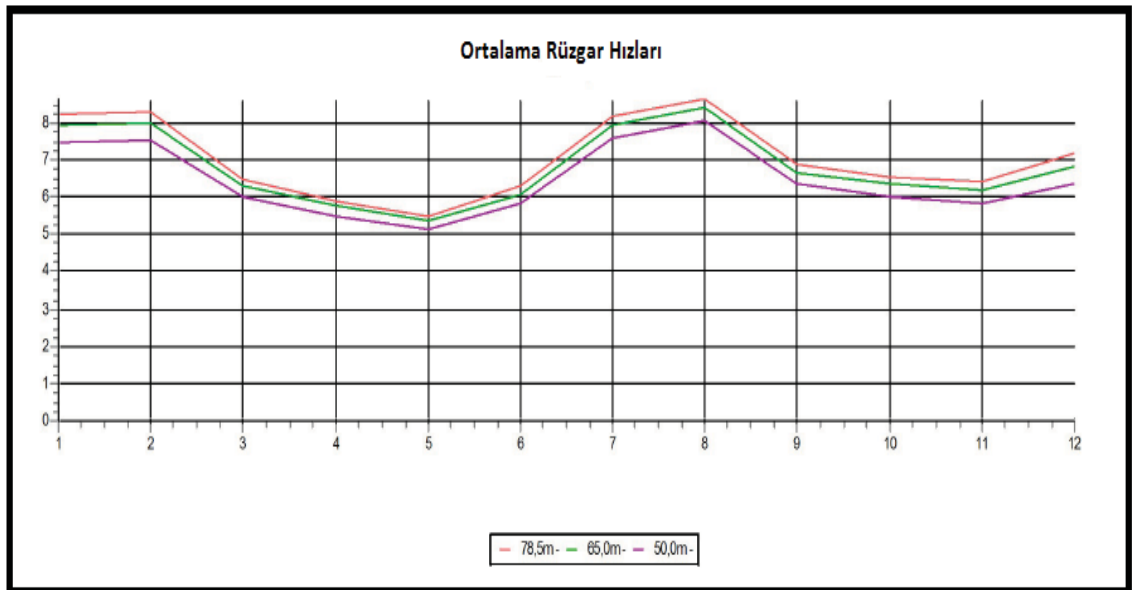
#### 5.1.1 Ortalama Rüzgar Hızı

3 anemometre ile yapılan hız ölçümlerin yükseklikleri sırasıyla 78.5 m, 65 m ve 50 m' dir. Her bir yüksekliğe ait aylık ortalama rüzgar hız değerleri Tablo 5.2' de verilmiştir. Genel olarak, 21 aya ait ortalama rüzgar hızları ise 78.5 m' de 6.88 m/s, 65 m' de 6.66 m/s ve 50 m' de 6.30 m/s bulunmuştur(Bkz Ek1: Şekil 1). Şekil 5.2' de görüldüğü üzere en yüksek rüzgar hızına sahip aylar kışın Ocak ve Şubat, yazın ise Temmuz ve Ağustos olmuştur.

Tablo 5.1: Farklı yüksekliklerde aylık ortalama hız değerleri tablosu

Tarih	Ortalama Hız (m/s)		
	78,5 m	65 m	50 m
Eyl.08	6,21	5,97	5,58
Eki.08	6,8	6,58	6,24
Kas.08	6,09	5,86	5,52
Ara.08	6,48	6,21	5,78
Oca.09	7,84	7,55	7,1
Şub.09	8,35	8,04	7,56
Mar.09	6,33	6,12	5,82
Nis.09	5,49	5,34	5,12
May.09	6,11	5,96	5,71
Haz.09	6,64	6,46	6,18
Tem.09	8,16	7,95	7,57
Ağu.09	8,63	8,42	8,04
Eyl.09	6,99	6,79	6,46
Eki.09	6,31	6,1	5,78
Kas.09	6,76	6,52	6,15
Ara.09	7,66	7,32	6,81
Oca.10	8,51	8,19	7,71
Şub.10	8,27	7,96	7,46
Mar.10	6,66	6,45	6,15
Nis.10	6,35	6,16	5,87
May.10	4,88	4,73	4,52
Haz.10	5,91	5,73	5,47
<b>Tüm Veri Ortalaması</b>	<b>6,88</b>	<b>6,66</b>	<b>6,3</b>

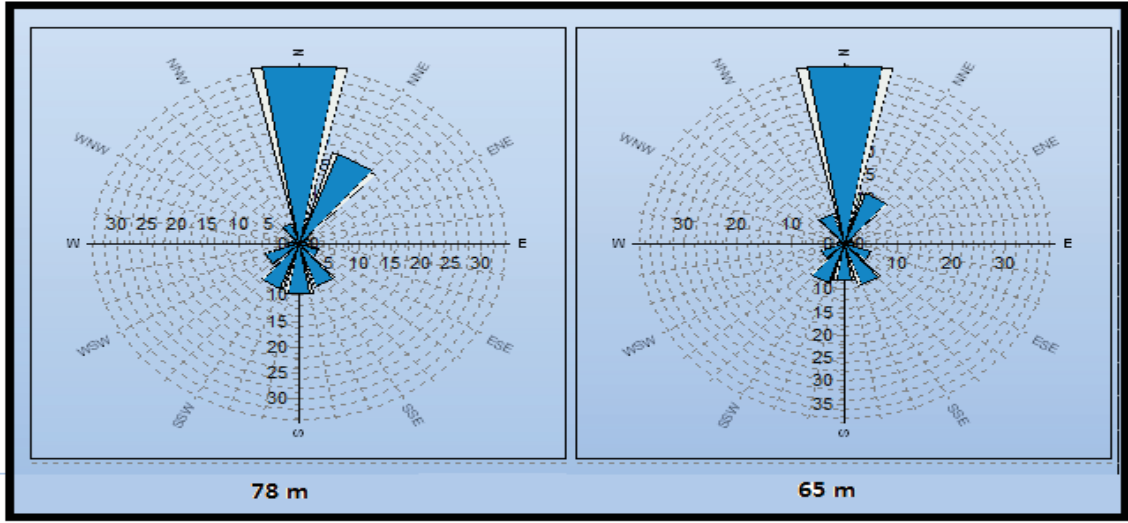
Şekil 5.2: Aylık rüzgar hızı ortalama değerleri grafiği



### 5.1.2 Rüzgar Gülü

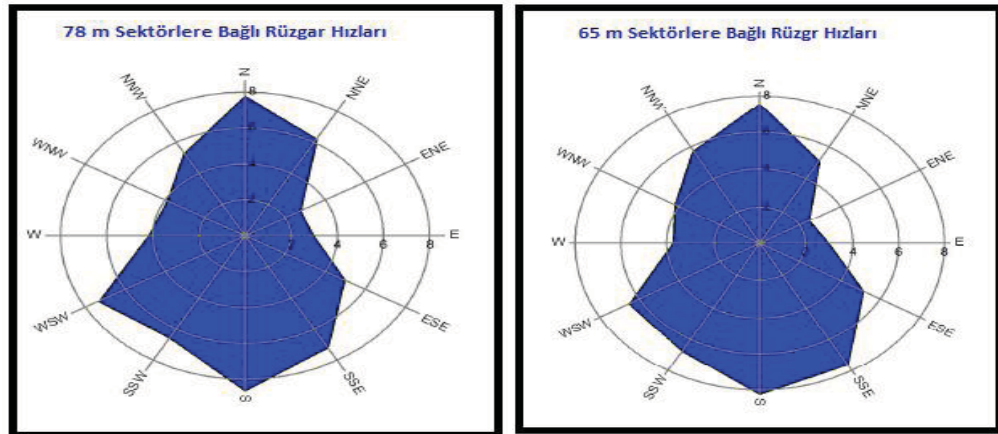
İki rüzgar gülü ile yapılan yön ölçümlerinin yükseklikleri sırasıyla 78 m ve 65 m' dir. Şekil 5.3' de görüldüğü üzere ölçüm istasyonunun bulunduğu konumda hakim rüzgar yönleri, 78 m yükseklikte ana yön yüzde 34.86' lık dağılım ile kuzey(K) ve yüzde 18.46' lık dağılımla tali yön kuzey-kuzeydoğu(KKD) bulunmuştur.

Şekil 5.3: 78 m ve 65 m yüksekliklere ait rüzgar gülü



Rüzgarın en şiddetli ortalamaya sahip olduğu yön şekil 5.4' de görüleceği üzere şekil güneydir. Güney yönünden esen rüzgarın ortalaması 78 m yükseklikte 8.63 m/s' dir. Rüzgarın en az şiddetli estiği yön ise 78 m yükseklikte 2.73 m/s ile doğu-kuzeydoğu(DKD)' dir. Aylık rüzgar istatistiklerine ait grafikler EK 2: Şekil 2' te verilmiştir.

Şekil 5.4: Sektörlere göre rüzgar hızları ortalamaları





### 5.1.3 Sıcaklık, nem ve basınç analizi

Sıcaklık, nem ve basınç ölçümleri 21 ay süresince başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve basınç değerleri enerji hesaplamalarında hava yoğunluğunu bulmak amacıyla ölçülmektedir. Türbinlerin güç eğrileri de hava yoğunluğuna göre değişim gösterir. Nem değerleri ise bu çalışmada kullanılmamıştır. Nem değerleri genel olarak sahada buzlanma durumlarının gözlemlendiği zaman göz önünde bulundurulur.

21 aylık veri göz önünde bulundurulduğunda ortalama sıcaklık değeri 15.87 °C bulunmuştur. Ancak bu veriler içerisinde iki dönem kış bir dönem yaz verisi bulunmaktadır. Ekim 2008-Ekim 2009 arası yıllık ortalama değer göz önüne alındığında ortalama sıcaklık 16.68 °C olarak bulunmaktadır. Tablo 5.2’ de görüldüğü üzere en sıcak ay 26.8 °C ile Temmuz 2009, en soğuk ay ise 8.28 °C ile Şubat 2009 dur.

Basınç değerleri Ekim 2008- Ekim 2009 arası yıllık ortalama değer 999 hPa olarak bulunmuştur. Aynı tarih aralığında yıllık nem ortalaması ise yüzde 67.17’ dir.

**Tablo 5.2: Aylık sıcaklık, nem ve basınç ortalamaları**

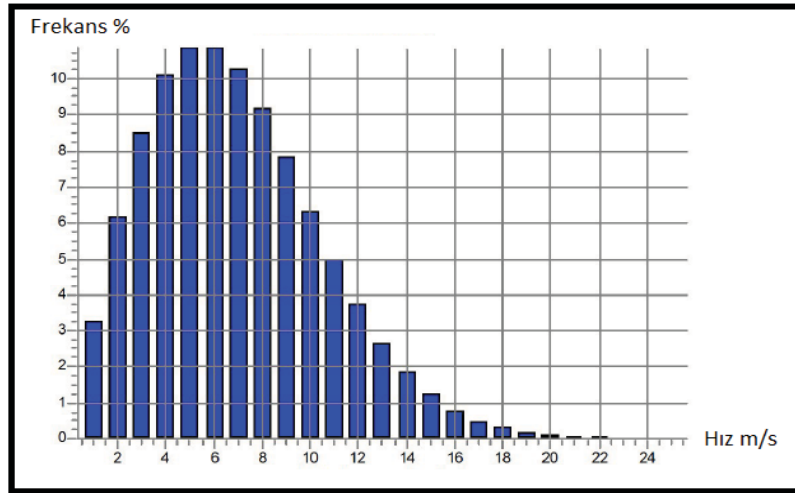
Tarih	Sıcaklık (°C)	Nem (%)	Basınç (hPa)
Eyl.08	17,43	69	1000
Eki.08	17,43	66	1004
Kas.08	14,17	78	1003
Ara.08	11,93	75	1003
Oca.09	9,66	75	1000
Şub.09	8,28	79	995
Mar.09	9,84	72	998
Nis.09	13,78	74	999
May.09	18,87	60	999
Haz.09	23,27	58	997
Tem.09	26,8	51	995
Ağu.09	24,97	54	996
Eyl.09	21,13	64	998
Eki.09	18,65	73	999
Kas.09	13,3	78	1001
Ara.09	11,73	80	996
Oca.10	9,03	78	998
Şub.10	10,87	77	994
Mar.10	11,11	73	1000
Nis.10	14,66	68	999
May.10	19,28	63	996
Haz.10	23	66	994
<b>Tüm Veri Ortalaması</b>	<b>15,87</b>	<b>70</b>	<b>998</b>

WindPRO yazılımı ile hava yoğunluğunun hesaplanması, ölçülen sıcaklık ve basınç değerlerinin yanında iklim veritabanındaki proje sahasına en yakın verilere dayandırılmaktadır. Buna göre proje alanına ait hava yoğunluğu türbin hub yüksekliğinde(80 m)  $1.191 \text{ kg/m}^3$  olarak hesaplanmıştır.

#### 5.1.4 78.5 m için Weibull Dağılımı

Weibull uyarlamasına göre 78.5 m için rüzgar frekans dağılımı dağılımı Şekil 5.5' de verilmiştir. Buna göre 78.5 m' de rüzgar hızı ortalaması 6.92 m/s olarak bulunmuştur. Tablo 5.3' de görüldüğü üzere c ve k parametre değerleri ortalamaları sırasıyla 7.81 m/s ve 1.997 bulunmuştur. 78.5 m ve 65 m için sektör bazlı Weibull dağılımları Ek 3: Şekil 3' de verilmiştir.

Şekil 5.5: 78.5 m için Weibull dağılımı



Tablo 5.3: 78.5 m için Weibull veri tablosu

Sektör	C-Parametresi (m/s)	Rüzgar Hızı Ortalaması (m/s)	k Parametresi	Frekans (%)
0 K	8,68	7,74	2,896	34
1 KKD	7,03	6,22	2,13	18,5
2 DKD	3,08	2,73	1,848	1,7
3 D	3,27	2,98	1,386	1,3
4 DGD	5,66	5,01	2,253	3,4
5 GGD	8,11	7,2	2,594	8,7
6 G	9,72	8,63	1,89	9,8
7 GGB	7,21	6,54	1,456	9,1
8 BGB	8,15	7,28	1,652	5,7
9 B	4,61	4,14	1,576	1,7
10 BKB	4,29	3,85	1,607	1,2
11 KKB	5,96	5,28	2,123	4
<b>TÜM</b>	<b>7,81</b>	<b>6,92</b>	<b>1,997</b>	<b>100</b>

### 5.1.5 Türbülans Analizi

Şekil 5.6’ da görüleceği üzere yer seviyesinde 78.5 m yükseklikte ölçülmüş verilere dayanarak ölçüm yeri, IEC 61400-1 standardı türbülans sınıflandırmasında A kategorisinde yer almaktadır. Türbin seçiminde bu bilgi göz önünde bulundurulmuştur.

Şekil 5.6: Türbülans yoğunluğu grafiği



### 5.2 KULLANILAN RÜZGAR TÜRBİNLERİ

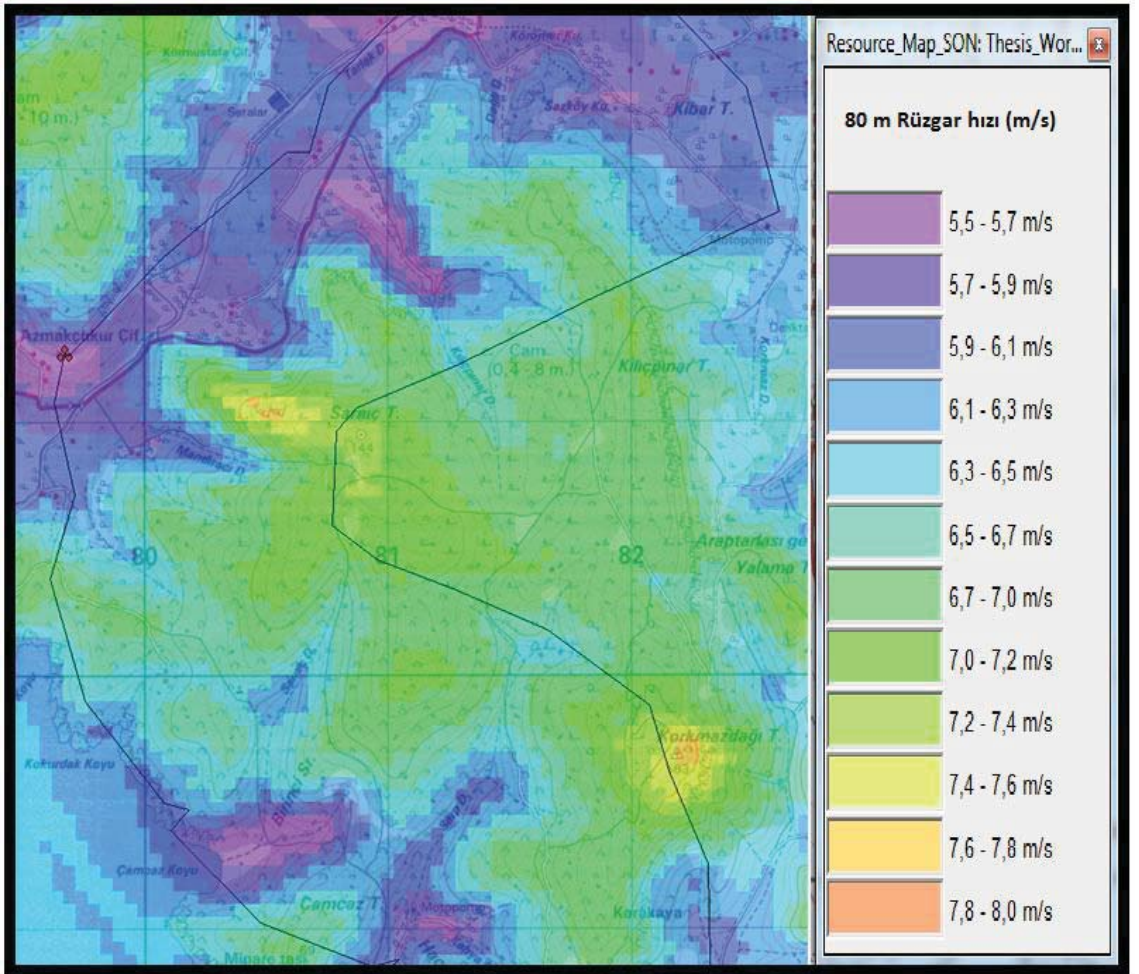
Saha içerisinde analizi yapılacak türbinler, 2005 yılında yayınlanan IEC 64100-1 standardına göre seçilmiştir. Seçilen türbin modelleri şunlardır;

- A-2,000 kW- 97 m kanat çaplı (IEC Class-III A)(Bkz. Ek4: Şekil 4)
- B-1,600 kW-100 m kanat çaplı (IEC Class-III)(Bkz. Ek4: Şekil 5)
- C-2,400 kW-117 m kanat çaplı (IEC Class-III)(Bkz. Ek4: Şekil 6)
- D-2,300 kW- 113 m kanat çaplı (IEC Class- III)(Bkz. Ek4: Şekil 7)
- E-1,800 kW- 100m kanat çaplı (IEC Class- III)(Bkz. Ek4: Şekil 8)

### 5.3 ÇALIŞMA ALANINDAKİ RÜZGAR KAYNAK HARİTALARI

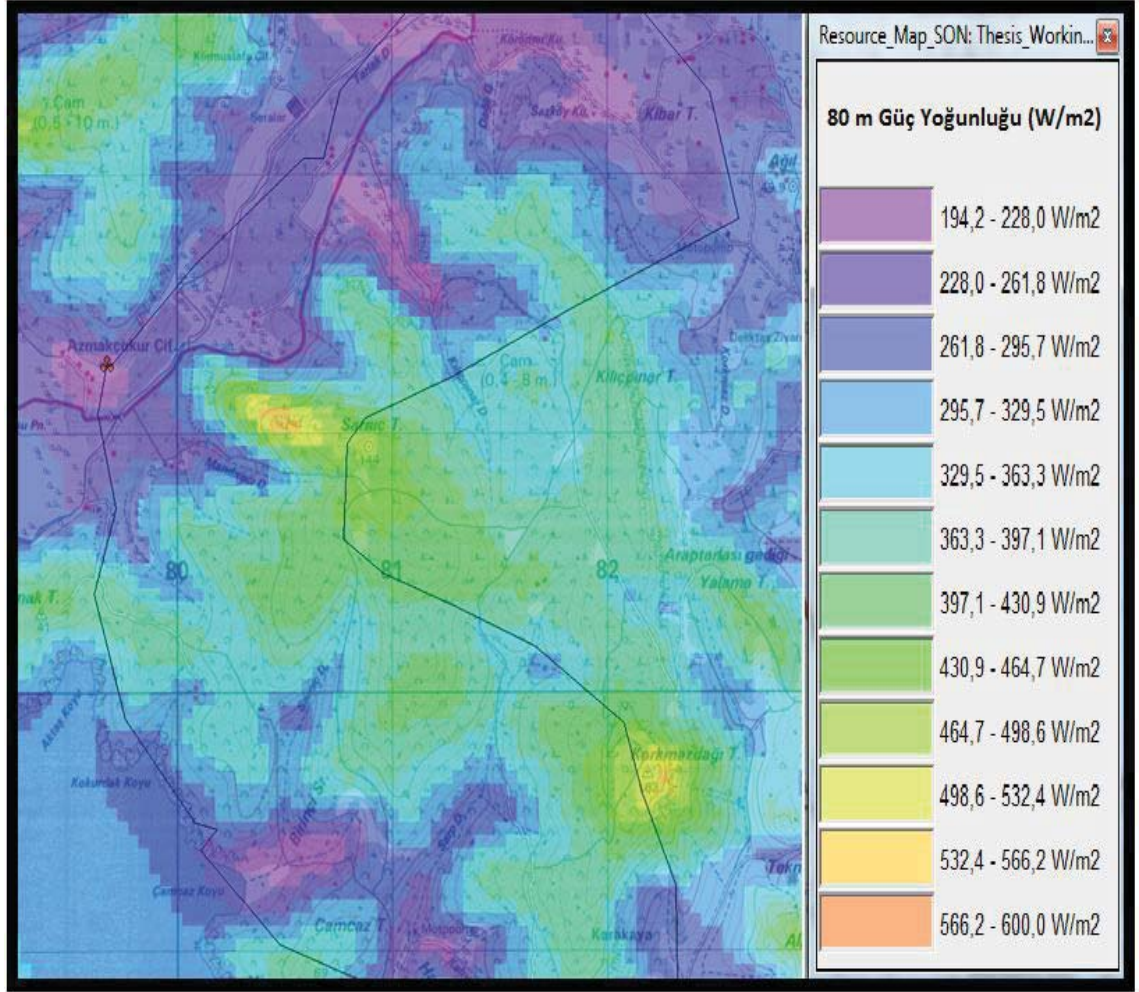
Girdi parametreleri olan eş yükselti eğrileri, pürüzlülük haritası ve rüzgar ölçüm verileri kullanılarak WindPRO ve WAsP aracılığıyla hız ve güç yoğunluğu cinsinden rüzgar kaynak haritaları oluşturulmuştur. Şekil 5.7’ de görüldüğü üzere hız (m/s) cinsinden rüzgar kaynak haritası verilmiştir. Hıza bağlı kaynak haritası 5.5 m/s ile 8.0 m/s değerleri arasında 12 farklı renge bağlı olarak oluşturulmuştur.

Şekil 5.7: 80 m yükseklikteki rüzgar hızına bağlı kaynak haritası



Güç yoğunluğuna bağlı kaynak haritası ise Şekil 5.8’ de verilmiştir. Güç yoğunluğu haritası, minimum  $194.2 \text{ W/m}^2$ , maksimum  $600 \text{ W/m}^2$  değerleri aralığında 12 farklı renk ile oluşturulmuştur.

Şekil 5.8: 80 m yükseklikte güç yoğunluğuna bağlı kaynak haritası



#### 5.4 TÜRBİN YERLEŞİM OPTİMİZASYONU

Saha içerisinde rüzgar türbinleri yerleşimi her bir model için farklı dizayn edilmiştir. Rüzgar türbini yerleşiminde öncelikle rüzgar kaynak haritası kullanılmıştır. Bunun yanında rüzgar türbinlerinin birbirlerini en az etkileyecek şekilde yerleşim sağlanabilmesi için türbinler arası mesafenin hakim rüzgar yönüne paralel yedi rotor çapı ( $7 \cdot R$ ) ve bu doğrultuya dik olarak üç rotor çapı ( $3 \cdot R$ ) uzunluğa sahip olması koşulu aranmıştır. Bu koşulu sağlamak amacıyla her bir türbin için merkez noktası elips merkezi olacak şekilde elipsler çizilmiş ve her elips içerisinde en çok bir türbin kalması sağlanmıştır (Bkz EK 5).

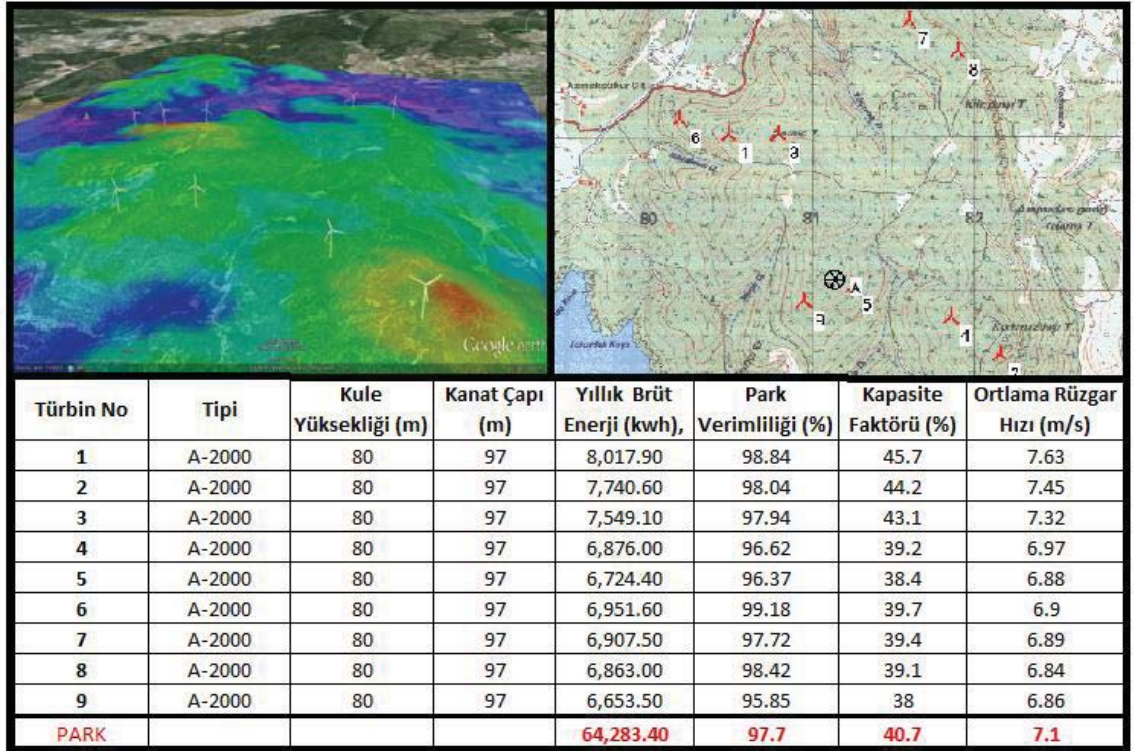
## 5.5 RÜZGAR ÇİFTLİĞİ ENERJİ HESAPLAMALARI

Çalışmamızın son aşamasında rüzgar çiftliğinin verimliliği, seçilen rüzgar türbin tipleri için kapasite faktörü, yıllık brüt enerji üretimine ilişkin tahminler tüm girdi parametrelerine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar N.O Jensen' in park etkisi(wake effect) modeline dayandırılmıştır.

Enerji hesaplamalarında, park verimliliği dışında her türlü oluşabilecek kayıplar ve belirsizlikler hesaplamalara dahil edilmemiş olup yapılan enerji hesaplamaları tahminleri brüt olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada her bir türbin için yapılan park hesaplamaları şu şekildedir:

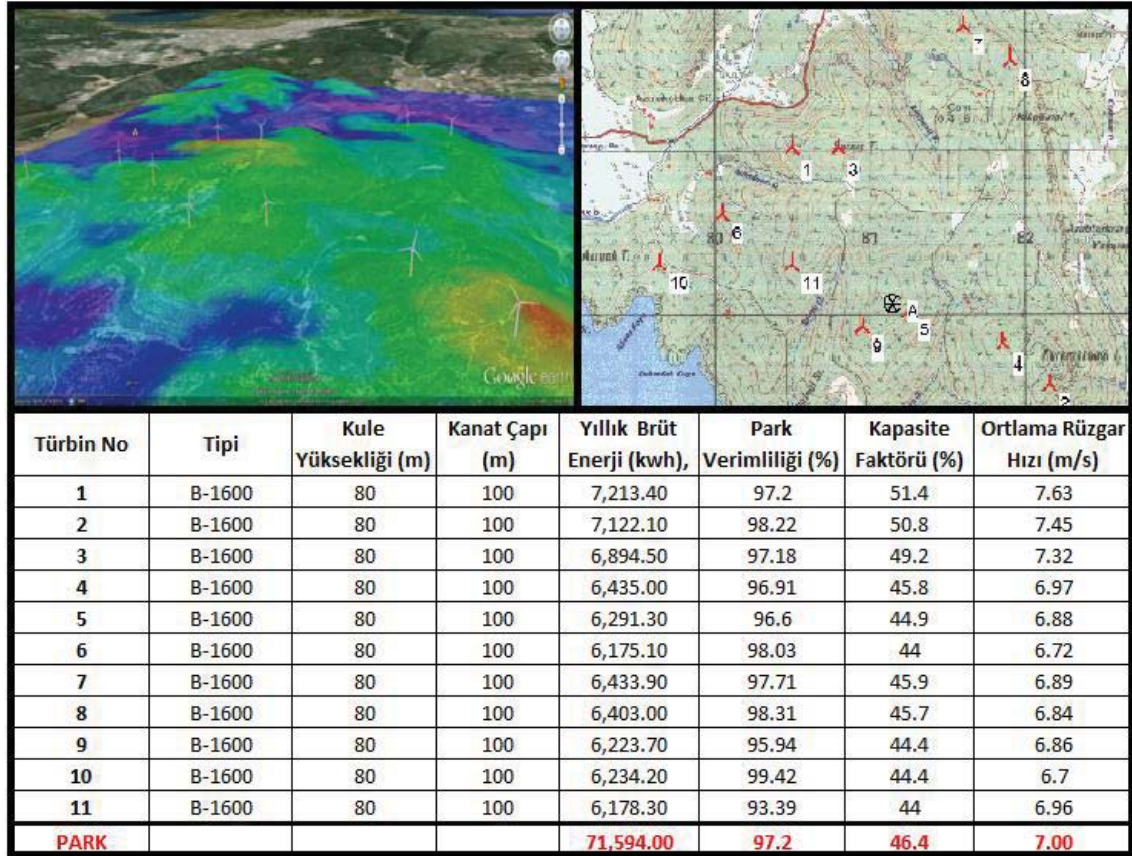
A-2,000 tipi 9 adet rüzgar türbini ile 18 MW' lık bir çiftlik oluşturulmuştur. Şekil 5.9' da görüleceği üzere rüzgar çiftliğinin toplam tahmini brüt enerji üretimi 64,283.4 MWh/yıl ve kapasite faktörü yüzde 40.7 olarak bulunmuştur. Sahanın ortalama rüzgar hızı 7.1 m/s olmakla beraber yüzde 97.7' lik bir park verimliliği oranı sağlanmıştır.

**Şekil 5.9: A-2,000 türbini için tahmini yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü**



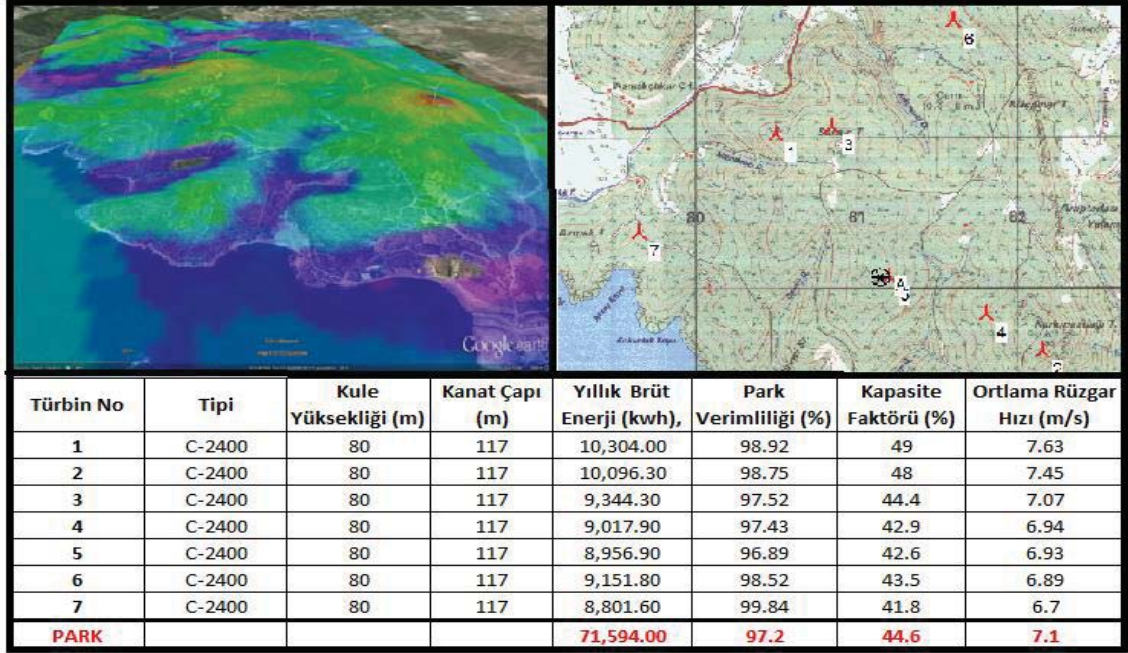
B-1,600 tipi 11 adet rüzgar türbini ile 17.6 MW'lık bir çiftlik oluşturulmuştur. Şekil 5.10' da görüleceği üzere rüzgar çiftliğinin toplam tahmini enerji brüt üretimi 71,594 MWh/yıl ve kapasite faktörü yüzde 46.4 olarak bulunmuştur. Sahanın ortalama rüzgar hızı 7.0 m/s olmakla beraber yüzde 97.2'lik bir park verimliliği oranı sağlanmıştır.

**Şekil 5.10: B-1,600 türbini için tahmini yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü**



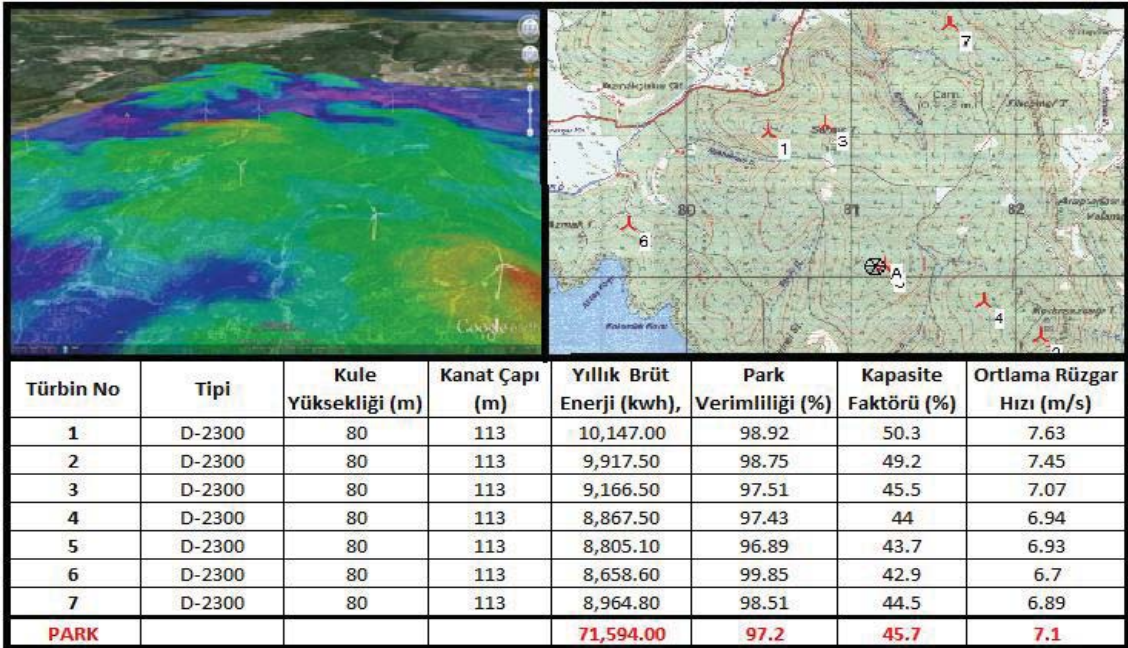
C-2,400 tipi 7 adet rüzgar türbini ile 16.8 MW'lık bir çiftlik oluşturulmuştur. Şekil 5.11' de görüleceği üzere rüzgar çiftliğinin toplam tahmini enerji brüt üretimi 65,673.5 MWh/yıl ve kapasite faktörü yüzde 44.6 olarak bulunmuştur. Sahanın ortalama rüzgar hızı 7.1 m/s olmakla beraber yüzde 98.3'lük bir park verimliliği oranı sağlanmıştır.

Şekil 5.11: C-2,400 türbini için tahmini yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü



D-2,300 tipi 7 adet rüzgar türbini ile 16.1 MW'lık bir çiftlik oluşturulmuştur. Şekil 5.12' de görüleceği üzere rüzgar çiftliğinin toplam tahmini enerji brüt üretimi 65,673.5 MWh/yıl ve kapasite faktörü yüzde 45.7 olarak bulunmuştur. Sahanın ortalama rüzgar hızı 7.1 m/s olmakla beraber yüzde 98.3' lük bir park verimliliği oranı sağlanmıştır.

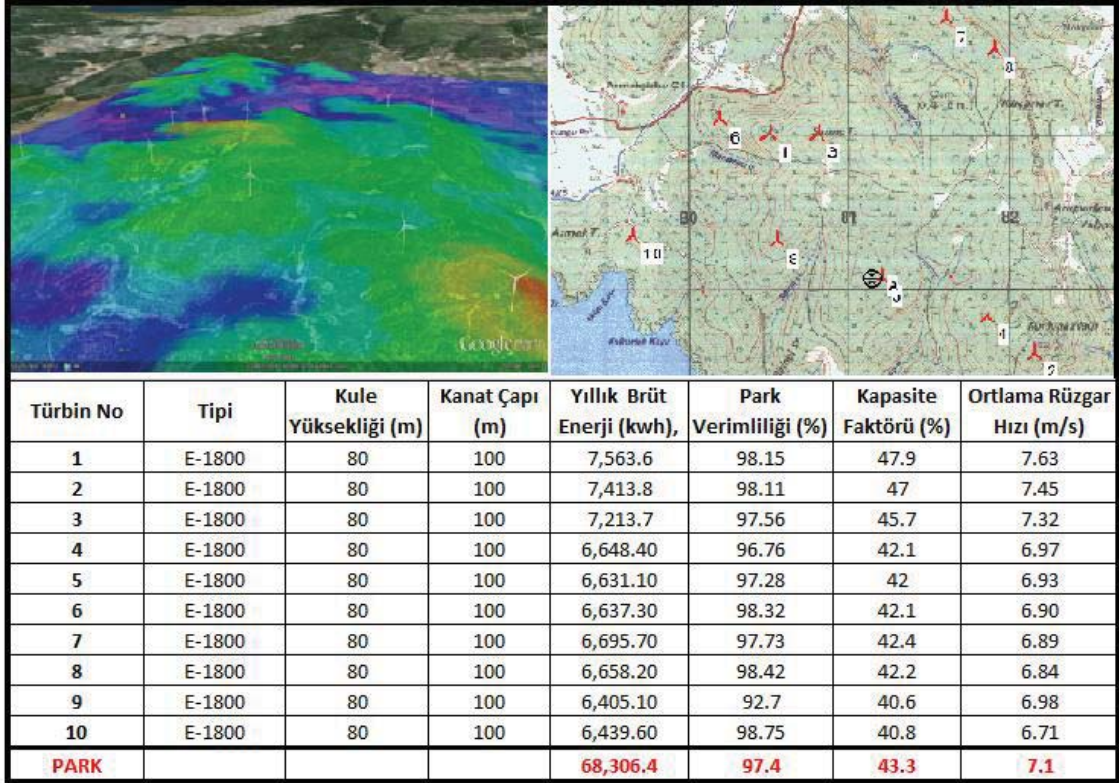
Şekil 5.12: D-2,300 türbini için tahmini yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü





E-1,800 tipi 10 adet rüzgar türbini ile 18 MW'lık bir çiftlik oluşturulmuştur. Şekil 5.13' de görüleceği üzere rüzgar çiftliğinin toplam tahmini enerji brüt üretimi 68,306.4 MWh/yıl ve kapasite faktörü yüzde 43.3 olarak bulunmuştur. Sahanın ortalama rüzgar hızı 7.1 m/s olmakla beraber yüzde 97.4' lük bir park verimliliği oranı sağlanmıştır.

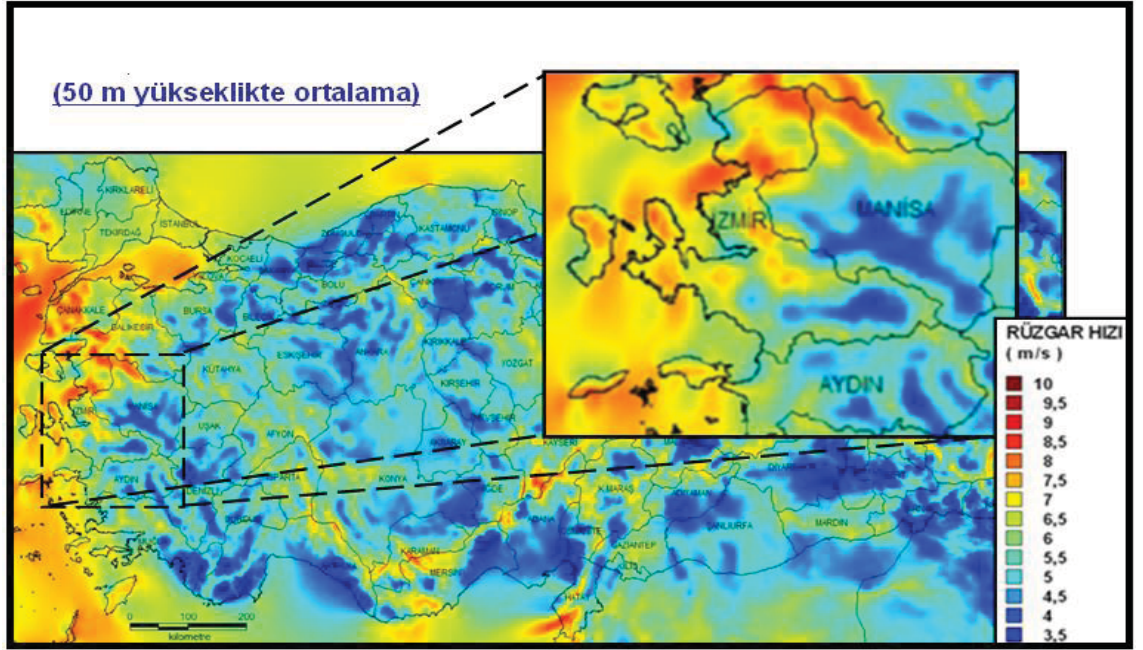
**Şekil 5.13: E-1,800 türbini için tahmini yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü**



## 6.TARTIŞMA VE SONUÇ

İzmir ilinin rüzgâr durumu; denize açık kıyı şeridi ve farklı topografik yapıları bir arada bulundurması nedeni ile önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. Şekil 6.1' deki REPA' dan görüleceği üzere şehrin doğu bölgesi hariç büyük bir bölümü yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi yatırımına uygundur. Ülkemiz yatırımcıları bu potansiyeli iyi değerlendirmiş ve bölge, 2012 yılı sonu itibariyle 390 MW' lık kurulu güç ile Türkiye' nin en fazla kurulu güce sahip ikinci ili konumundadır. Bunun yanında yaklaşık 1,000 MW' lık portföye sahip lisanslı projelerin kimisi inşaat aşamasında olup, kimisi de proje geliştirme aşamasındadır.

Şekil 6.1: İzmir rüzgar enerjisi potansiyeli atlası



Seferihisar ilçesi de İzmir ilinin rüzgar potansiyeli yüksek bölgelerinden bir tanesidir. REPA' ya göre bölgenin rüzgar hızı potansiyeli 50 m yükseklikte yıllık ortalama 6.5 m/s ile 7 m/s arasında değişmektedir. Wikipedia özgür ansiklopediye göre bölgede Ocak, Şubat, Mart aylarında rüzgar hızında nisbi bir artışın gözlemlendiği, Mart ayından Haziran ayına kadar bir azalma daha sonra tekrar yükselme gözlenmekte olduğu belirtilmiştir. Seferihisar'da ortalama yıllık sıcaklık, meteoroloji istasyonunun 1929-1995 yılları arası kayıtlarına göre 16.4 °C' dir. İlçede yıllık bağıl nem ortalama yüzde 64 olup, aylara göre değişmektedir.

Yapmış olduğumuz analizler sonucunda İz\_Sef rüzgar ölçüm istasyonundan toplanan verilerden elde edilen bulgular, genel olarak Seferihisar ilçesinin iklim durumu özelliklerini doğrular niteliktedir. İz\_Sef rüzgar ölçüm istasyonunda alınan 21 aylık verilerin analizi sonucunda 80 m, 65m ve 50 m' deki rüzgar hızı ortalamaları sırasıyla 6.88 m/s, 6.66 m/s ve 6.3 m/s bulunmuştur. Rüzgar hızlarının yüksek olduğu aylar ise kış mevsiminde Ocak ve Şubat, yaz mevsiminde ise Temmuz ve Ağustos'tur. 78 m ve 65 m yüksekliklerde yapılan yön ölçümleri sonucunda bölgenin hakim rüzgar yönü kuzey bulunmuştur. Ekim 2008- Ekim 2009 tarihleri arasında yıllık ortalama hava sıcaklığı 16.68 °C, ortalama bağıl nem ise yüzde 67.5' dir. Weibull uyarlamasında 78.5 m için ortalama rüzgar hızı 6.92 m/s, c ve k parameteleri ise sırasıyla 7.81 m/s ve 1.997 bulunmuştur.

WindPRO yazılımı ile hazırlanmış istatistiki bulguların yanısıra girdi parametreleri de kullanılarak WAsP veritabanı aracılığı ile proje sahasının rüzgar kaynak haritası oluşturulmuştur. Ardından seçmiş olduğumuz 5 farklı türbin modeli ile uygun yerleşim yapılmıştır.

Son olarak her bir türbin modeli için yıllık tahmini brüt park enerji hesaplamaları yapılmıştır. Buna göre A-2,000 rüzgar türbini ile oluşturulan park için yıllık tahmini brüt enerji üretimi 64,283.4 MWh, kapasite faktörü yüzde 40.7, B-1,600 rüzgar türbini ile oluşturulan park için yıllık tahmini brüt enerji üretimi 71,594 MWh ve kapasite faktörü yüzde 46.4, C-2,400 rüzgar türbini modeli ile oluşturulan park için yıllık tahmini brüt enerji üretimi 65,673.5 MWh ve kapasite faktörü yüzde 44.6, D-2,300 rüzgar türbini modeli ile oluşturulan park için yıllık tahmini brüt enerji üretimi 65,673.5 MWh ve kapasite faktörü yüzde 45.7, E-1,800 rüzgar türbini modeli ile oluşturulan park için yıllık tahmini brüt enerji üretimi 68,306.4 MWh ve kapasite faktörü yüzde 43.3 olarak bulunmuştur.

Yapılan park enerji hesaplamaları sonucunda en yüksek üretim ve kapasite faktörüne sahip B-1,600 türbini ile oluşturulan park için yıllık üretilecek enerji, kişi başına yıllık elektrik tüketimi(2012 yılı itibariyle 3,199 kWh) baz alındığında yaklaşık 22,380 kişinin yıllık elektrik ihtiyacını karşılayabilmektedir. Bu da Seferihisar ilçesinin nüfusunun(2012 yılı: 31,467 kişi) 2/3' ünden fazla bir nüfusun elektrik ihtiyacının

karşılanabileceğini gösterir. Görüleceği üzere böylesine orta çapta bir yatırımının dahi oluşturabileceği arz potansiyeli oldukça yüksektir.

Bu amaçla, ülkemizde dışa bağımlı fosil yakıt kaynaklarından yapılan enerji üretim payı(%70) göz önünde bulundurulduğunda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının arttırılması; ülkemiz açısından son derece önemlidir. Dolayısıyla dışa bağımlılığı ve hava kirliliğini azaltmak amacıyla ülke çapında rüzgar enerjisi yatırımları hızlandırılmalıdır.

Bunun yanı sıra rüzgar potansiyeli yüksek sahalardan itibaren lisans vermeye başlanmalıdır. Çünkü, her geçen yıl türbin teknolojileri gelişmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte rüzgar potansiyeli düşük bir sahada bugün 1 birimlik enerji üretiyorken 2 yıl sonra geliştirilmiş bir türbin modeli ile 1.5 birimlik enerji üretimi gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKÇA

### *Kitaplar*

Bailey, B. H., McDonald S. L., Bernadett, D. W., Markus, M. J. & Elsholz K. V.,1997, *Wind Resource Assessment Handbook*, AWS Scientific, Inc. CESTM, 251 Fuller Road Albany, NY 12203

Durak, M., & Özer, S., 2008. *Rüzgar enerjisi:teori ve uygulama*.Ankara: İmpress.

Karadeli, S., 2001. *Rüzgar enerjisi*. Ankara: Temiz Enerji Vakfı

Nielsen, P., 2012. *Windpro 2.8 user guide*. Denmark: Uni-Print (EMD international A/S)

Ragheb M., & Ragheb A.M., 2011. Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio, *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, Croatia:InTech, ss.19-38.

### ***Sürekli Yayınlar***

- Abbes, M., Belhadj, J., 2012. Wind resource estimation and wind park design in El-Kef region, Tunisia. *Energy*. **40**(1), ss. 2901-2914.
- Akpınar, E. K. ve Akpınar, S., 2004. Determination of wind energy potential for Maden-Elazığ, Turkey. *Energy Conversion and Management*. **45**(18-19), ss. 2901-2914.
- Arslan, O., 2010. Technoeconomics analysis of electricity generation from wind energy in Kütahya, Turkey. *Energy*. **35**(4), ss. 120-131.
- Bilgili, M., Şahin, B. ve Kahraman A., 2004. Wind energy potential in Antakya and İskenderun regions, Turkey. *Renewable Energy*. **29**(10), ss. 1733-1745.
- Bilgili, M., Şahin, B. ve Şimşek, E., 2010. Türkiye' nin Güney, Güneybatı ve Batı Bölgelerindeki Rüzgar Potansiyeli. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*. **30**, ss. 1-12.
- Çelik, A. N., 2011. Review of Turkey's current energy status: A case study for wind energy potential of Çanakkale province. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **15**(6), ss. 2743-2749.
- Durak, M. ve Şen, Z., 2002. Wind Power Potential in Turkey and Akhisar Case Study. *Renewable Energy*. **25**(3), ss. 463-472.
- Durisić, Z., Mikulović, J., 2012. Assessment of the wind energy resource in the South Banat region, Serbia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **16**(5), ss. 3014-3023.
- Eskin, N., Artar, H. ve Tolun S., 2008. Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **12**, ss. 839-851.
- Fyrrippis, I., Axaopoulos, J. ve Panayiotou, G., 2010 . Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece. *Applied Energy*. **87**, ss. 577-586.
- Gökçek, M., Bayülken, A., Bekdemir, Ş., 2007. Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kırklareli, Turkey. *Renewable Energy*. **32**(10), ss. 1739-1752.

- Hayli, S., 2001. Rüzgar enerjisinin önemi, dünyada ve Türkiye'deki durumu. *FÜ Sosyal Bilimler Dergisi*. **11**(1), s. 20.
- Janajreh, I., Su, L., Alan, F., Wind energy assessment: Masdar City case study. *Renewable Energy*. **52**, ss. 8-15.
- Karslı, V. M. ve Geçit, 2003. C., An investigation on wind power potential of Nurdağı-Gaziantep, Turkey. *Renewable Energy*. **28**(5), ss. 823-830.
- Köse, F. Ve Özgören M., 2005. Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Ölçümü ve Rüzgar Türbin Seçimi. *Mühendis ve Makine*. 551, ss. 20-30.
- Ohunakin, O. S., 2011. Wind resource evaluation in six selected high altitude locations in Nigeria. *Renewable Energy*. **36**(12), ss. 3273-3281.
- Özdamar, A., 2000. Dünya'da ve Türkiye'de rüzgar enerjisinden yararlanılması üzerine bir araştırma. *PÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*. **6**(2-3), ss.135-136.
- Özerdem B. ve Türkeli M., 2003. An investigation of wind characteristics on the campus of Izmir Institute of Technology, Turkey. *Renewable Energy*. **28**(7), ss. 1013-1027.
- Özerdem B. ve Türkeli M., 2005. Wind energy potential and micro siting on Izmir Institute of Technology Campus, Turkey. *Renewable Energy*. **30**(10), ss. 1623-1633.
- Özgener, Ö., 2002. Türkiye' de ve dünyada rüzgar enerjisi kullanımı. *DEÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*. **4**(3), s. 159.
- Palaiologou, P., Kalabokidis, K., Haralambopoulos, D., Feidas, H., Polatidis, H., 2011. Wind characteristics and mapping for power production in the Island of Lesbos, Greece. *Computers & Geosciences*. **37**(7), ss. 962-972.
- Şahin, B., Bilgili, M. ve Akıllı, H., 2005. The wind power potential of the eastern Mediterranean region of Turkey. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. **93**(2), ss. 171-183.

- Türksoy, F., 1995. Investigation of wind power potential at Bozcaada, Turkey. *Renewable Energy*. **6**(8), ss.917-923.
- Uçar, A., Balo, F., 2009. Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey. *Applied Energy*. **86**(10), ss. 1864-1872.
- Yıldırım, U., Gazibey, Y., Afşin, Güngör., 2012. Niğde ili rüzgar enerjisi potansiyeli. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. **1**(2), ss. 37-47.



## ***Diğer Yayınlar***

- Acker, T., 2011, *Wind modelling using WindPro and WAsP software*[online], Flagstaff, Northern Arizona University, [http://nau.edu/uploadedFiles/Academic/CEFNS/Centers-Institutes/Folder\\_Templates/Media/wind-modeling-using-WindPro-and-WAsP-software.pdf](http://nau.edu/uploadedFiles/Academic/CEFNS/Centers-Institutes/Folder_Templates/Media/wind-modeling-using-WindPro-and-WAsP-software.pdf). [erişim: 04 Mayıs 2013]
- Akdağ, S.A. ve GÜLER Ö., 2008. Weibull Dağılım Parametrelerini belirleme metodlarının karşılaştırılması. *7 Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*. 2009. Harbiye Askeri Müze ve Kültür Sitesi, İstanbul: Su Vakfı, 708-711.
- Akyüz, İ., 2005, Veri kaydedici nedir [Online], İstanbul, <http://www.metrolojiokulu.com/VeriKayd/VeriKayd.htm>. [erişim tarihi :02.03.2013].
- Ataseven, M. ve Ataseven S., 2009. Rüzgar Ölçüm Sistemleri. *RÜGES 2009*. 2009. Samsun OMÜ Kurupelit Yerleşkesi. EMO: Samsun Şubesi
- Anemometer*. 2012. <http://en.wikipedia.org>. [erişim tarihi:01.01.2013]
- AWEA, Fourth Quarter 2012 Market Report, 2012, [online] [www.awea.org](http://www.awea.org). [Erişim Tarihi: 15.02.2013], ss.3-4.
- Çetin, N.S., Çelik, H. ve Başaran, K., 2011 Rüzgar türbinlerinde kapasite faktörü ve türbin sınıfı ilişkisi, 6th International Advanced Technologies Symposium, 16-18 Mayıs 2011 Elazığ: Fırat Üniversitesi.
- Çubukçu, M. ve Özdamar A., 2003, Enerji eldesinde ortalama rüzgar hızı ölçüm aralığı ve hellmann katsayısının önemi: Söke örneği, *2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, 15-18 Ekim 2003 İzmir: MMO
- Datalogger Series 32*. 2012. <http://www.ammonit.com/en/products/data-logger-wind/series-32>. [erişim tarihi:01.01.2013]
- Dataloggers*. 2013. [online] <http://www.nrgsystems.com/AllProducts/DataLoggers.aspx> [erişim tarihi:01.01.2013]

*Dataloggers and Data Acquisition System.* [tarih yok]. [online] <http://www.campbellsci.com/dataloggers> [erişim tarihi:01.01.2013]

Durak,M., 2009,Rüzgar ölçümlerinde dikkat edilmesi gereken hususlar, Ankara, [online] <http://tureb.com.tr>, [erişim tarihi:30.12.2012]

Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. 2011. *Enerji raporu 2011*. Aralık. Ankara.

*Dünya üzerinde rüzgar çeşitleri.* 2006. [online] <http://www.gozlemci.net>. [erişim tarihi: 02.12.2012].

EWEA, 2011 Annual Report, 2012, [online] [www.ewea.org](http://www.ewea.org) [Erişim Tarihi:12.12.2012], s.6-7.

*Global Wind Speed Map.* 2013. [online] [www.3tier.com](http://www.3tier.com). [erişim tarihi: 15.02.2013]

Gruet, R., 2011. Achieving 30% lower emissions by 2020. *Wind Energy and EU Climate Policy*. EU:EWEA

GWEC, Global Wind Statistics 2012, 2013, [online] [www.wwindea.org](http://www.wwindea.org). [erişim tarihi:15.02.2013], s.1-4.

*Manual witerm 3.0 pc software.* [tarih yok]. [http://www.wilmers.com/download/manual\\_witerm\\_30.pdf](http://www.wilmers.com/download/manual_witerm_30.pdf). [erişim tarihi: 08.05.2013].

NRG #200P Wind Direction Vane. 2012, [online] <http://www.nrgsystems.com>. [erişim tarihi: 02.02.2013]

Özerdem, B. 2003. Türkiye’ de rüzgar enerjisi uygulamalarının gelişimi ve geleceği, *Türkiye 9. Enerji Kongresi*,24-27 Eylül 2003 İzmir: MMO.

Özgür, M.A. (2006). Kütahya rüzgar karakteristiğinin istatistiksel analizi ve elektrik üretimine uygulanabilirliği. *Yayınlanmamış Doktora Tezi*. Kütahya: D.Ü. M.M.A.D.

*Product Overview.* 2012. [online] <http://www.ammonit.com/en/products/wind-measurement-sensors>. [erişim tarihi: 01.01.2013]

Ragheb, M., 2012, Wind shear, roughness classes and turbine energy production[online], USA, Illinous University, <http://mragheb.com/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Wind%20Shear%20Roughness%20Classes%20and%20Turbine%20Energy%20Production.pdf>. [Erişim tarihi: 27.04.2013]

*Rüzgar enerjisi*. 2012. <http://www.eie.gov.tr>. [erişim tarihi 02.12.2012].

*Sensors*. 2012. <http://www.ammonit.com/en/products/sensors/wind-measurement-solar-assessment>. [erişim tarihi:01.01.2013]

Sevim, C., 2012. Rüzgar Enerji Sektöründeki Tekno-Ekonomik Gelişmeler ve Türkiye Rüzgar Enerjisi Sektörü İçin Yol Haritası, *Türkiye 9. Enerji Kongresi*, 14-16 Kasım 2012 Ankara: ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi.

Sevim, C. ve Varlıkl, C., 2009. İklim değişikliği ve rüzgar enerjisi, *Türkiye 11. Enerji Kongresi*, 21-23 Ekim 2009 İzmir: Tepekule Kongre ve Fuar Merkezi.

*Solar Power System*. [tarih yok]. [online] <http://www.earthenergyforhome.com>. [erişim tarihi: 05.3.2013]

Şimşek, V. (2007). Rüzgar enerjisi ve sivas şartlarında bir rüzgar santrali tasarımı. *Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi*. Sivas: C.Ü. E.E.M.A.

*Temperature humidity sensors*. 2012. [www.ammonit.com](http://www.ammonit.com). [erişim tarihi: 27.02.2013].

TMMOB Türkiye Makine Mühendisleri Odası. 2012. *Türkiye'nin Enerji Görünümü*. Nisan 2012. Ankara.

Türkçü, S.İ. 2005. Türkiye' nin rüzgar enerjisi politikaları ve enterkonnekte sisteme entegrasyonu. *Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi*. Ankara: G.Ü.FBE.

TEİAŞ, İşletme Faaliyetleri Raporları, [online] <http://www.teias.gov.tr>. [erişim tarihi: 17.02.2013]

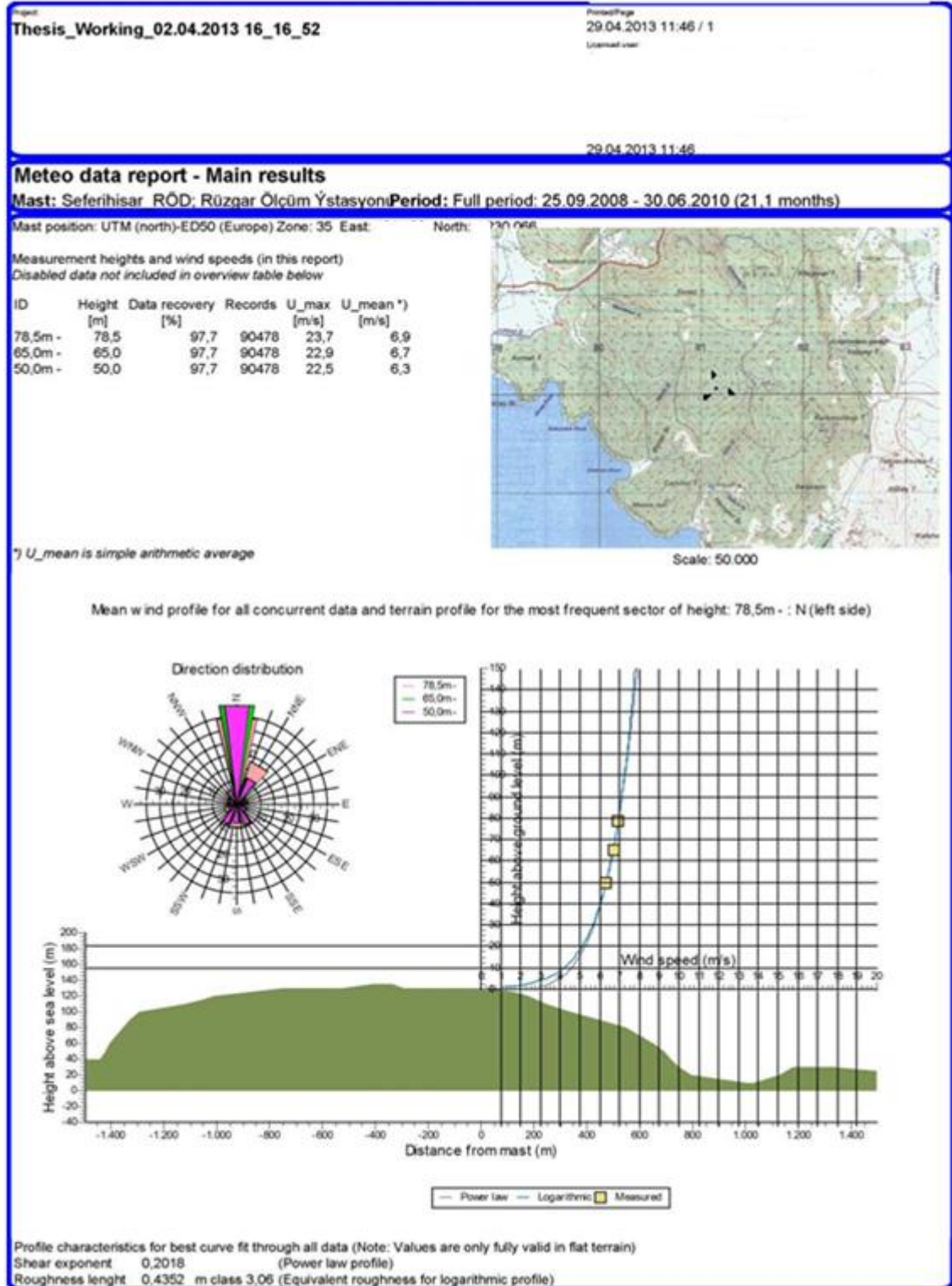
*The Weibull Distribution*. [tarih yok].

[http://wiki.windpower.org/index.php/The\\_Weibull\\_distribution](http://wiki.windpower.org/index.php/The_Weibull_distribution). [erişim tarihi: 04.04.2013].

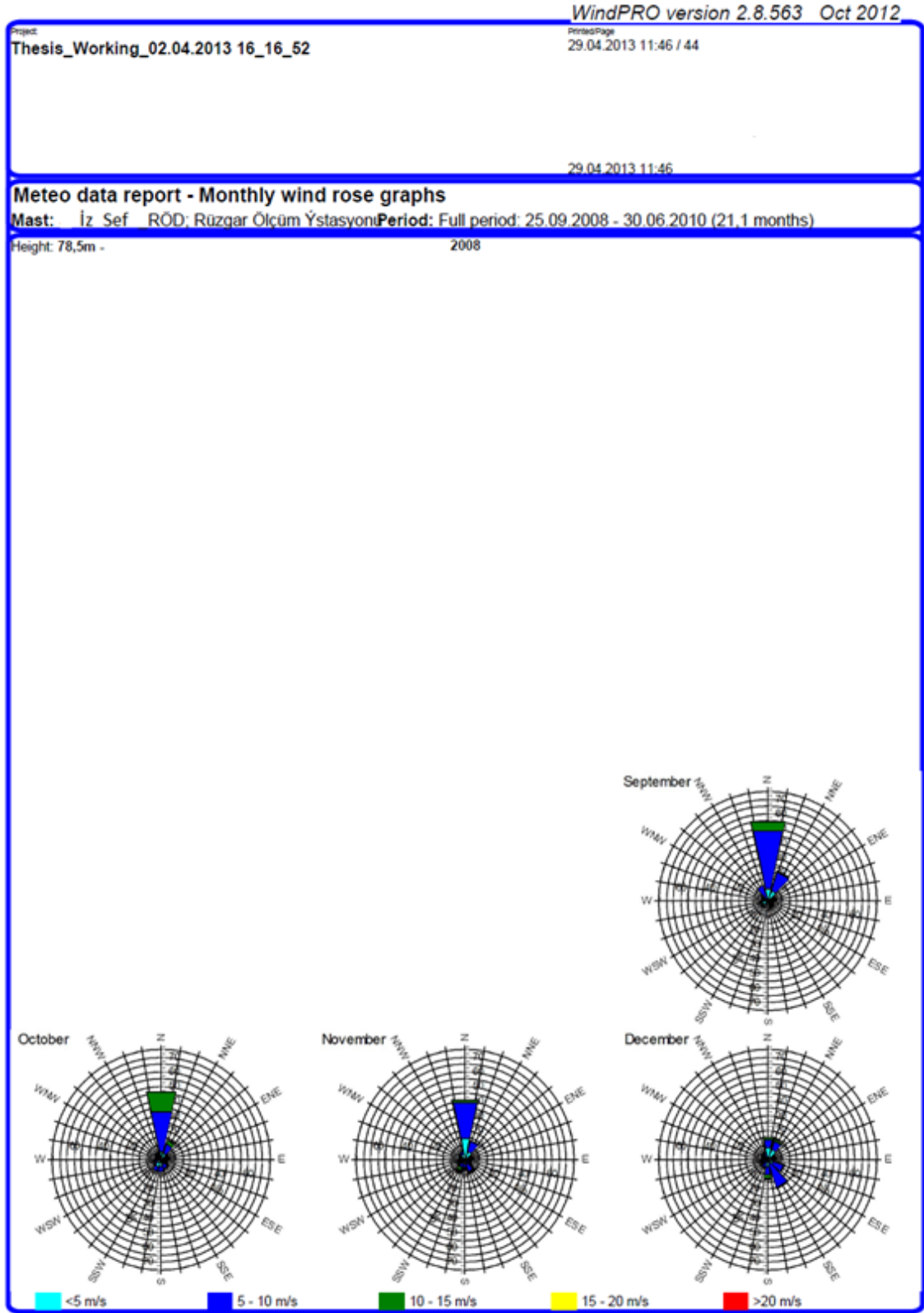
- Thogersen, M.L., 2005, Wake and turbulence models in WindPRO [online], Aalborg, <http://help.emd.dk/knowledgebase/default.aspx>. [erişim:01 Mayıs 2013]
- TÜREB, Ocak 2013 Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, 2013, [online] [www.tureb.com.tr](http://www.tureb.com.tr). [erişim tarihi: 26.04.2013].s.5-20.
- WindPRO yazılımı modül açıklaması*. [tarih yok]. [online] <http://www.emd.dk/WindPRO/Modules/>. [erişim tarihi: 20.04.2013]
- Winds*. 2001. [online] <http://library.thinkquest.org>. [erişim tarihi: 02.12.2012].
- Witem 3.0 manual*. 2012 [www.wilmers.com](http://www.wilmers.com). [erişim tarihi: 28.04.2013]
- WWEA, 2012 Report, 2013 [online] [www.wwindea.org](http://www.wwindea.org) [Erişim Tarihi: 17.05.2013], ss.1-20.
- Yüksek Planlama Kurulu.18.05.2009. 2009/11, *Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi*, Mayıs 2009, s.9.

# EKLER

## Ek 1: Şekil 1 Ana sonuçlar



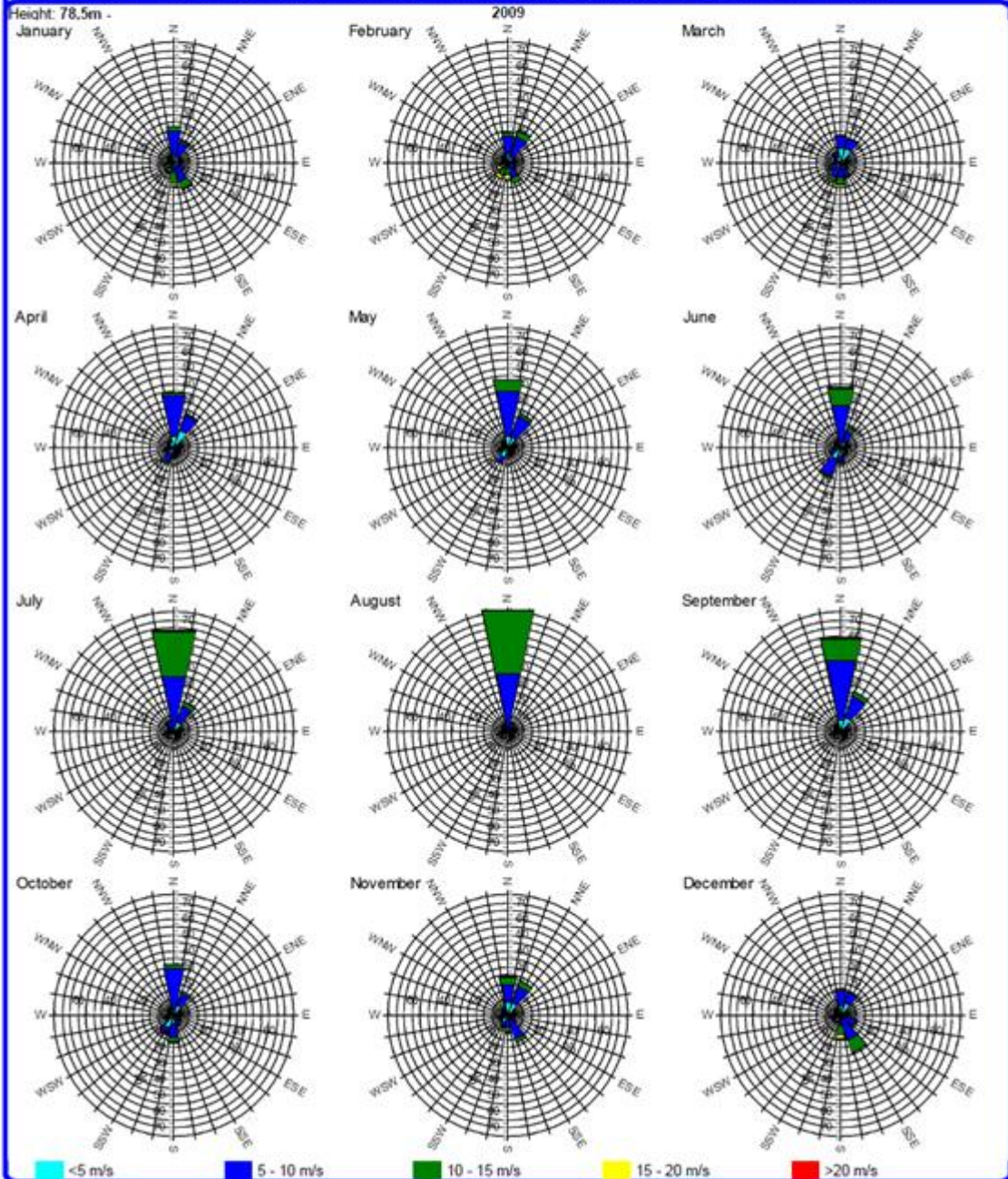
## Ek 2: Şekil 2 78 m' deki aylık rüzgar gülü grafikleri



29.04.2013 11:46

### Meteo data report - Monthly wind rose graphs

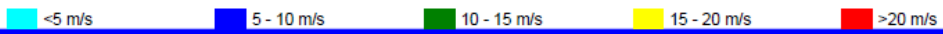
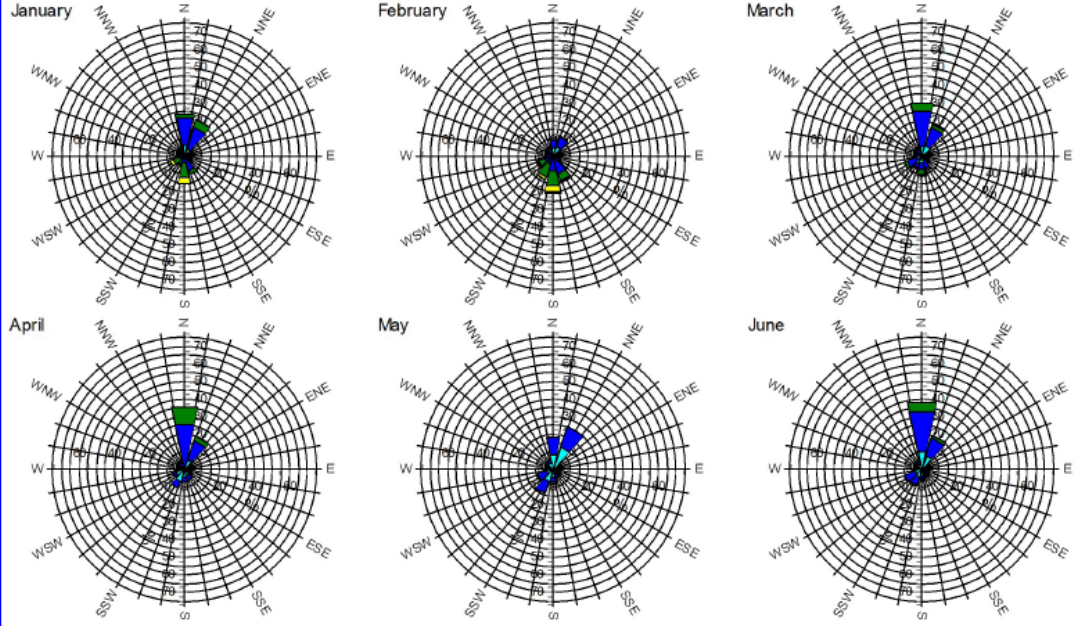
Mast: İz Sef RÖD; Rüzgar Ölçüm Ystasyonu; Period: Full period: 25.09.2008 - 30.06.2010 (21.1 months)



**Meteo data report - Monthly wind rose graphs**

Mast: İz\_Sef ; Rüzgar Ölçüm Ystasyonu Period: Full period: 25.09.2008 - 30.06.2010 (21,1 months)

Height: 78,5m -





### Ek 3 Şekil 3: Sektörlere göre weibull diyagramları

WindPRO version 2.8.563 Oct 2012

Project:  
Thesis\_Working\_02.04.2013 16\_16\_52

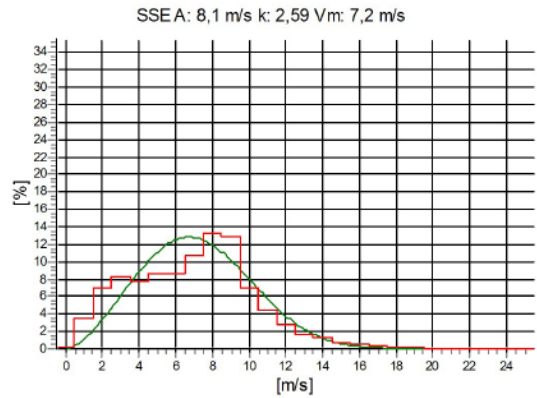
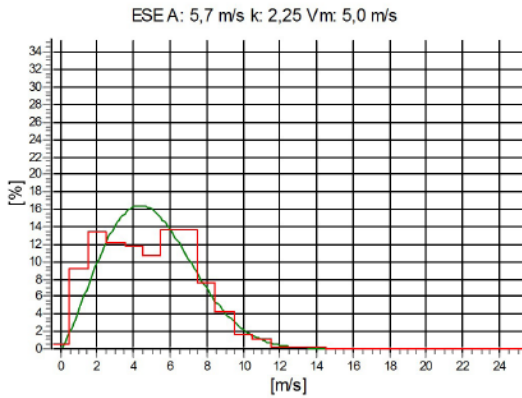
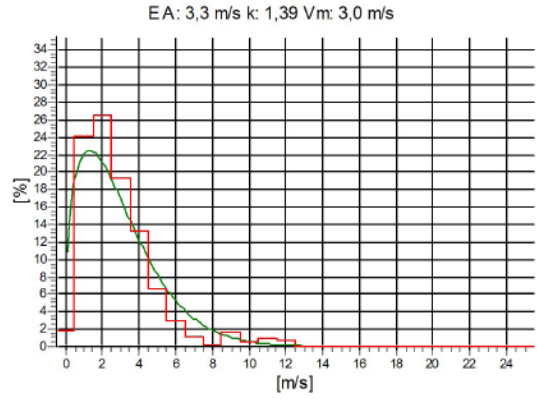
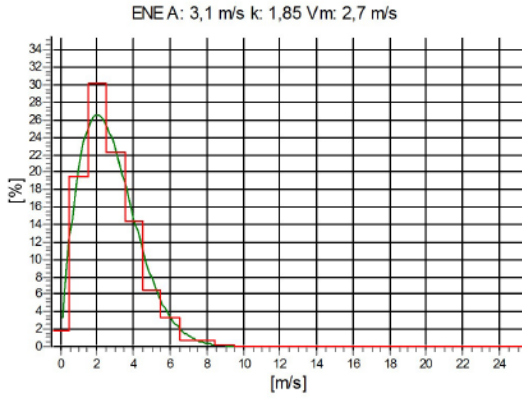
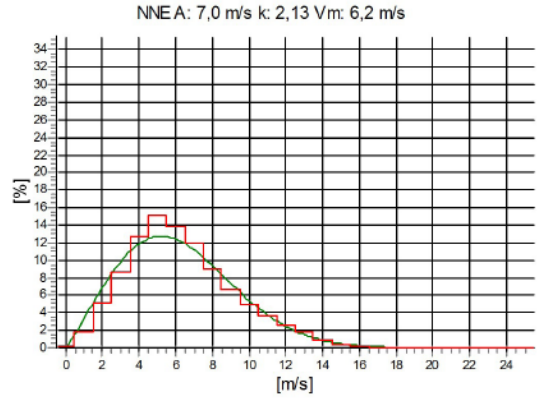
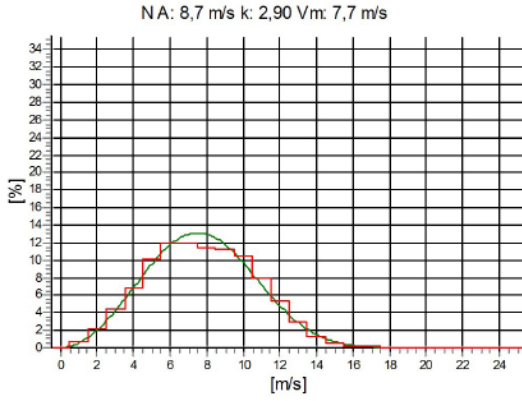
Printed Page  
29.04.2013 11:46 / 53

29.04.2013 11:46

#### Meteo data report - Sector wise histogram/weibull graphs

Mast: İz-sef RÖD; Rüzgar Ölçüm Ystasyonu Period: Full period: 25.09.2008 - 30.06.2010 (21,1 months)

Heicht: 78,5m -



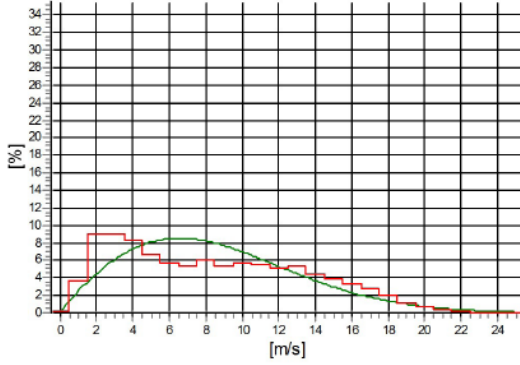
29.04.2013 11:46

**Meteo data report - Sector wise histogram/weibull graphs**

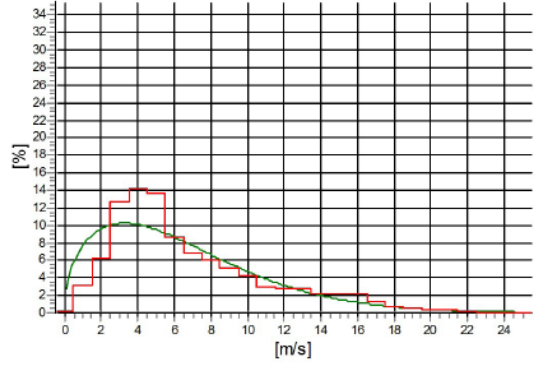
**Mast:** İz Sef - RÖD; Rüzgar Ölçüm İstasyonu **Period:** Full period: 25.09.2008 - 30.06.2010 (21,1 months)

Height: 78,5m -

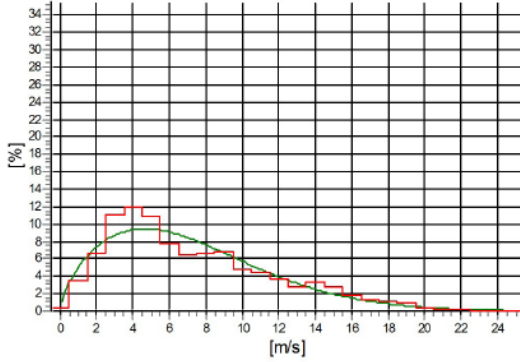
S A: 9,7 m/s k: 1,90 Vm: 8,6 m/s



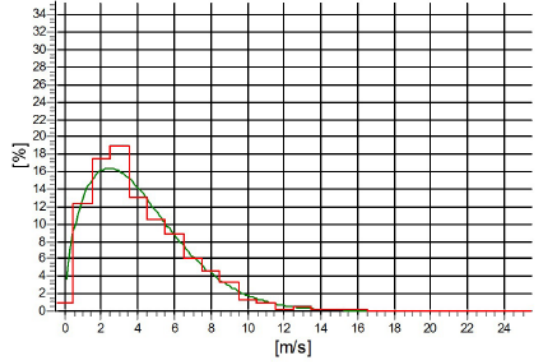
SSW A: 7,2 m/s k: 1,46 Vm: 6,5 m/s



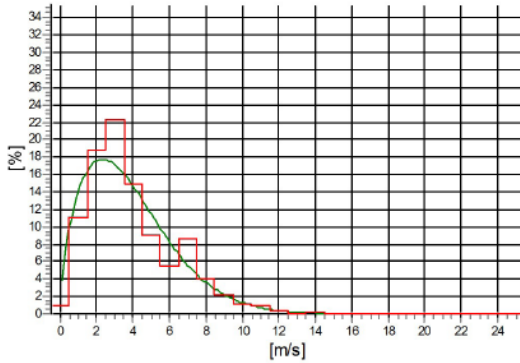
WSW A: 8,2 m/s k: 1,66 Vm: 7,3 m/s



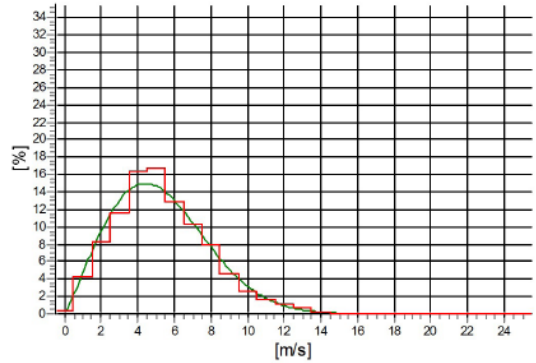
WA: 4,6 m/s k: 1,58 Vm: 4,1 m/s



WNW A: 4,3 m/s k: 1,61 Vm: 3,8 m/s



NNW A: 6,0 m/s k: 2,12 Vm: 5,3 m/s



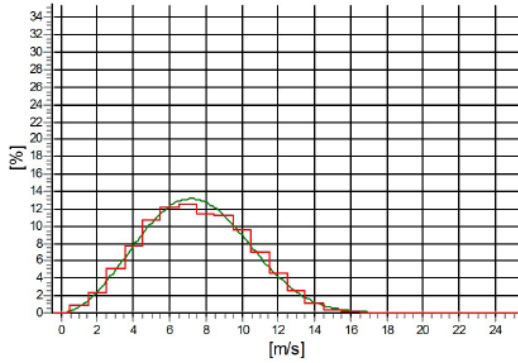
29.04.2013 11:46

**Meteo data report - Sector wise histogram/weibull graphs**

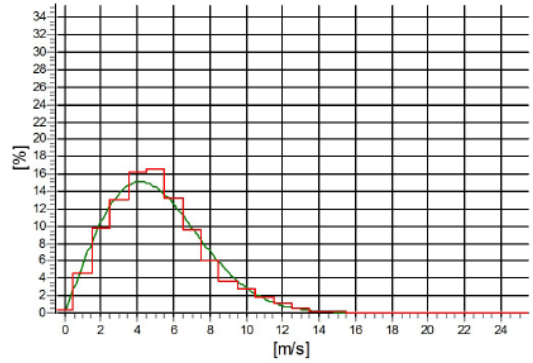
Mast: İz\_Sef ; Rüzgar Ölçüm Ystasyonu Period: Full period: 25.09.2008 - 30.06.2010 (21,1 months)

Height: 65,0m -

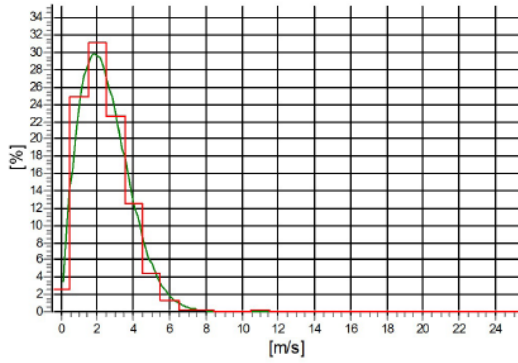
NA: 8,4 m/s k: 2,80 Vm: 7,5 m/s



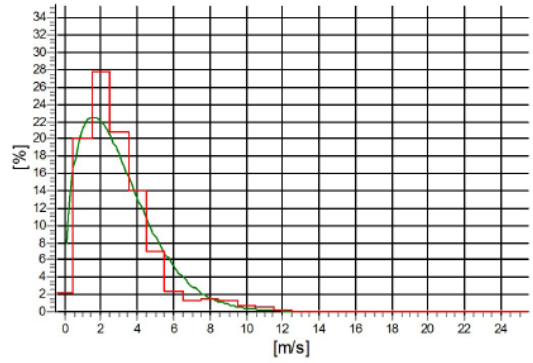
NNEA: 5,8 m/s k: 2,05 Vm: 5,1 m/s



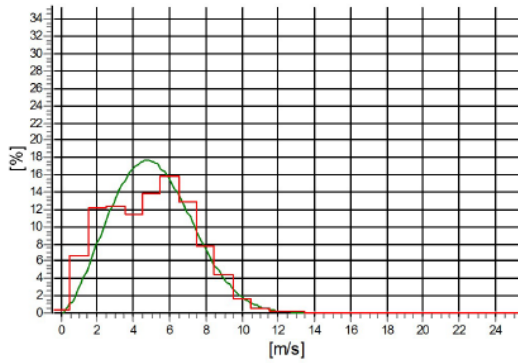
ENE A: 2,8 m/s k: 1,89 Vm: 2,5 m/s



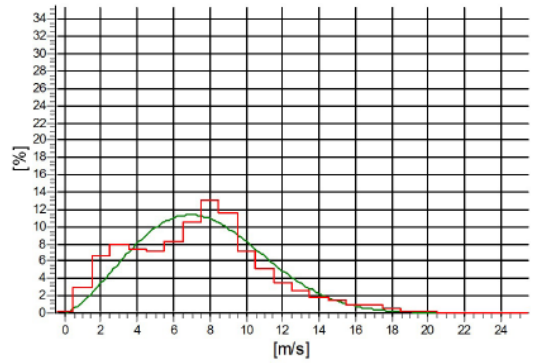
EA: 3,3 m/s k: 1,50 Vm: 3,0 m/s



ESE A: 5,8 m/s k: 2,54 Vm: 5,1 m/s



SSEA: 8,6 m/s k: 2,41 Vm: 7,7 m/s



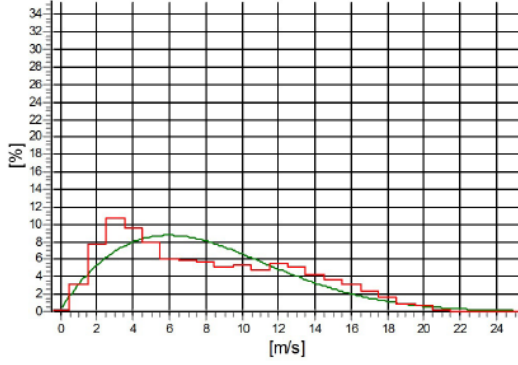
29.04.2013 11:46

**Meteo data report - Sector wise histogram/weibull graphs**

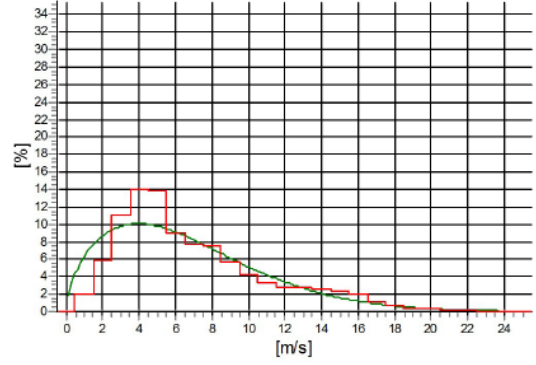
**Mast:** İz Sef RÖD; Rüzgar Ölçüm Ystasyonu **Period:** Full period: 25.09.2008 - 30.06.2010 (21,1 months)

Height: 65,0m -

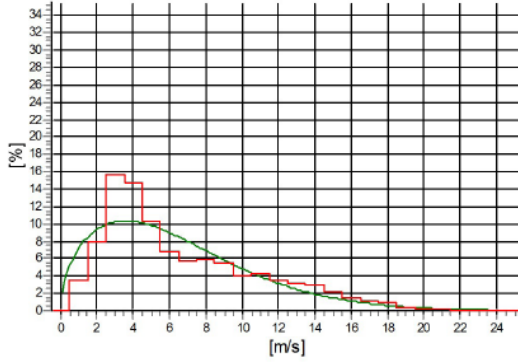
S A: 9,2 m/s k: 1,82 Vm: 8,2 m/s



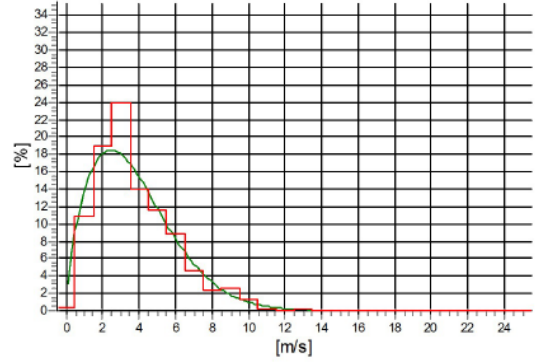
SSW A: 7,5 m/s k: 1,57 Vm: 6,7 m/s



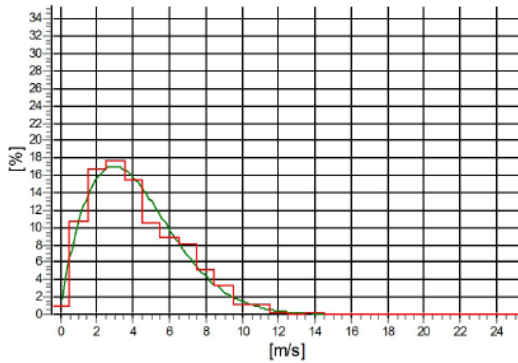
WSW A: 7,2 m/s k: 1,52 Vm: 6,5 m/s



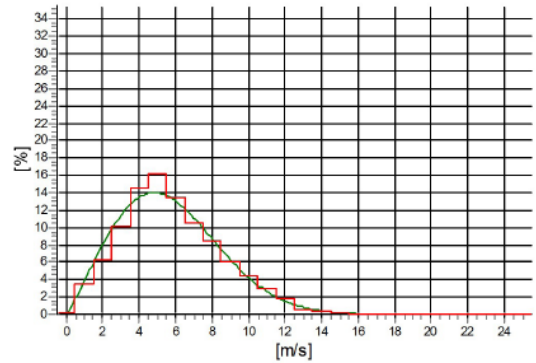
W A: 4,2 m/s k: 1,68 Vm: 3,8 m/s



WNW A: 4,7 m/s k: 1,78 Vm: 4,2 m/s

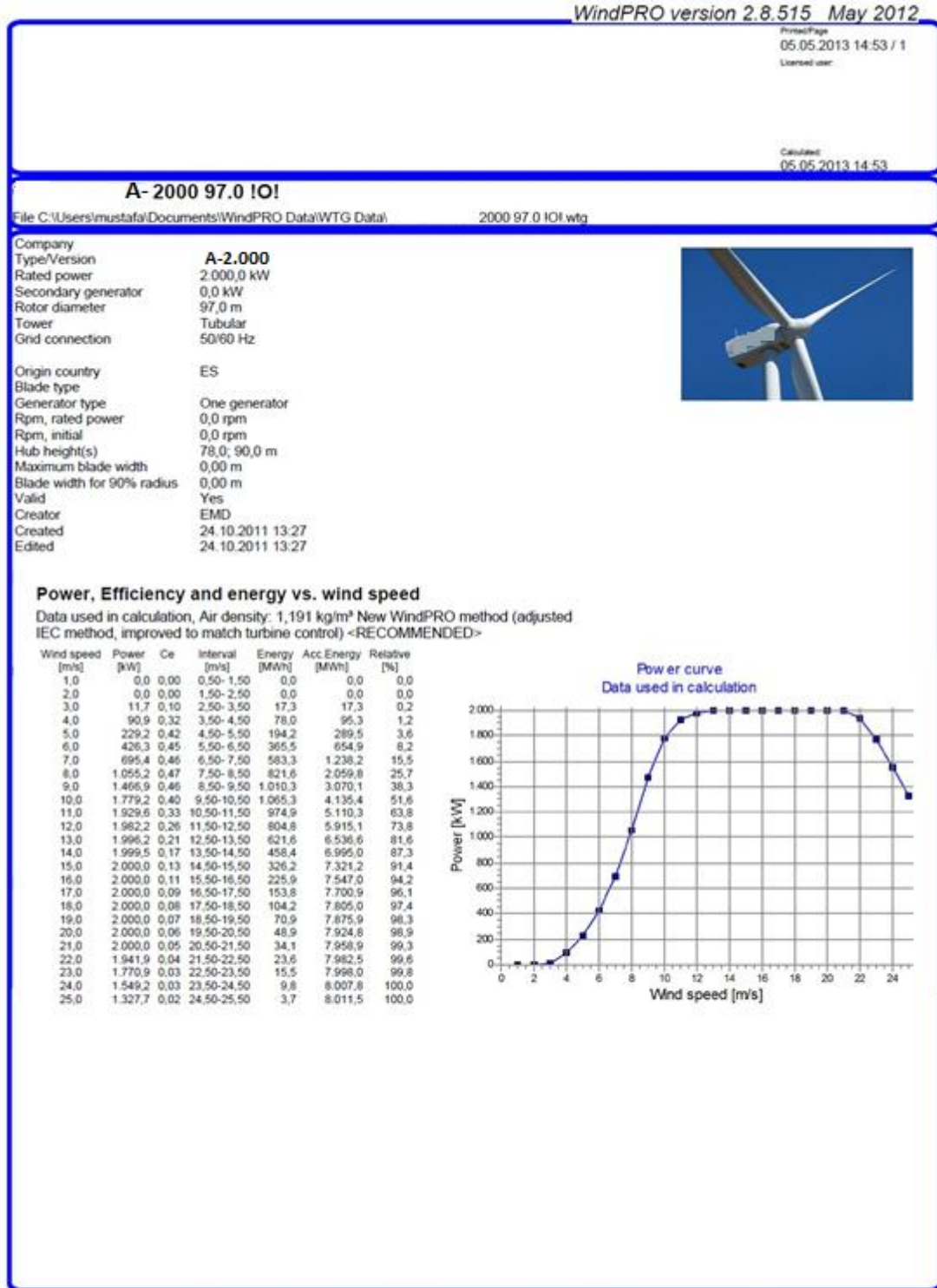


NNW A: 6,4 m/s k: 2,15 Vm: 5,7 m/s

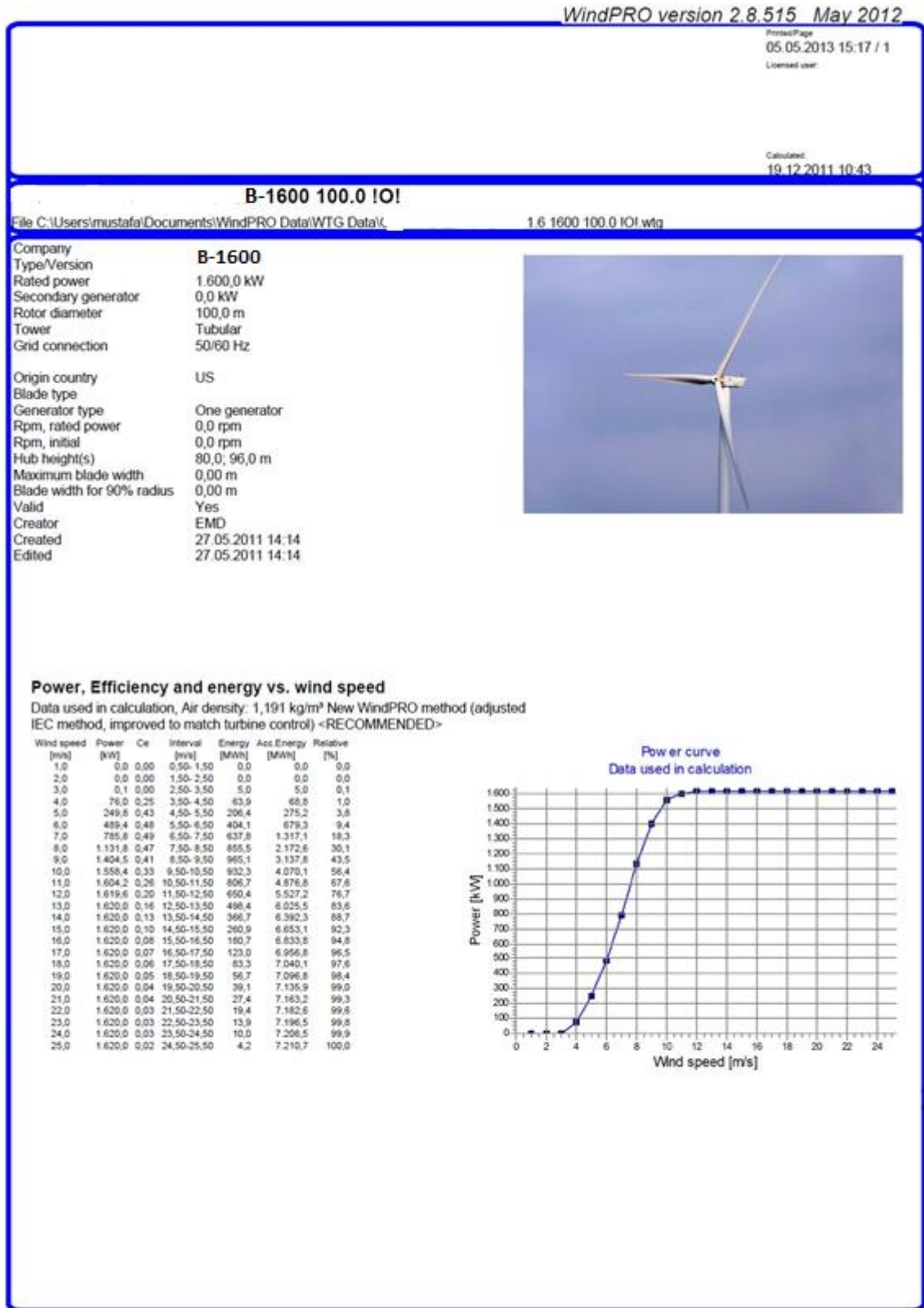


## EK 4

Şekil 4: A-2.000 rüzgar türbini özellikleri



Şekil 5: B-1.600 rüzgar türbini özellikleri



Şekil 6: C-2.400 rüzgar türbini özellikleri


WindPRO version 2.8.563 Oct 2012  
 PrintoutPage  
 13.05.2013 14:31 / 1  
 Licensed user:  
 Calculated:  
 13.05.2013 14:31

**C- 2400 117.0 !O!**

File

Company **C-2400** 91.0 m tubular tower, 120.0 m tubular tower, 141.0 m precasted hybrid  
 Type/Version  
 Rated power 2.400,0 kW  
 Secondary generator 0,0 kW  
 Rotor diameter 117,0 m  
 Tower Tubular  
 Grid connection 50/60 Hz

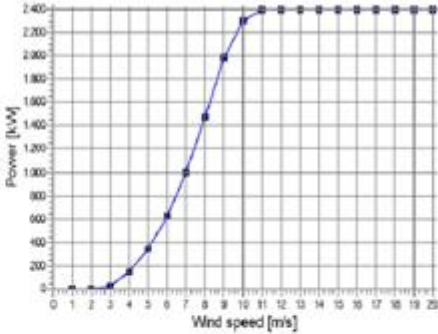
Origin country DE  
 Blade type NR 58,5  
 Generator type Variable  
 Rpm, rated power 11,8 rpm  
 Rpm, initial 7,5 rpm  
 Hub height(s) 91,0; 120,0; 141,0 m  
 Maximum blade width 3,49 m  
 Blade width for 90% radius 0,89 m  
 Valid Yes  
 Creator USER  
 Created 13.05.2013 14:31  
 Edited 13.05.2013 14:31



**Power, Efficiency and energy vs. wind speed**  
 Data used in calculation, Air density: 1,191 kg/m³ New WindPRO method (adjusted IEC method, improved to match turbine control) <RECOMMENDED>

Wind speed [m/s]	Power [kW]	Ce	Interval [m/s]	Energy [MWh]	Acc Energy [MWh]	Relative [%]
1,0	0,0	0,00	0,50-1,50	0,0	0,0	0,0
2,0	0,0	0,00	1,50-2,50	0,0	0,0	0,0
3,0	21,7	0,13	2,50-3,50	26,5	26,5	0,3
4,0	148,5	0,36	3,50-4,50	117,4	144,0	1,4
5,0	343,4	0,43	4,50-5,50	284,3	428,3	4,2
6,0	624,9	0,45	5,50-6,50	527,9	956,3	9,3
7,0	1.009,7	0,46	6,50-7,50	830,6	1.786,9	17,3
8,0	1.485,8	0,45	7,50-8,50	1.147,7	2.934,6	28,5
9,0	1.991,2	0,43	8,50-9,50	1.369,5	4.304,1	41,8
10,0	2.298,1	0,36	9,50-10,50	1.386,3	5.690,4	55,2
11,0	2.385,5	0,28	10,50-11,50	1.219,0	6.909,5	67,0
12,0	2.400,0	0,22	11,50-12,50	983,2	7.892,7	76,6
13,0	2.400,0	0,17	12,50-13,50	755,4	8.648,1	83,9
14,0	2.400,0	0,14	13,50-14,50	557,8	9.205,9	89,3
15,0	2.400,0	0,11	14,50-15,50	397,4	9.603,3	93,2
16,0	2.400,0	0,09	15,50-16,50	274,7	9.878,0	95,8
17,0	2.400,0	0,08	16,50-17,50	196,0	10.074,0	97,7
18,0	2.400,0	0,06	17,50-18,50	124,6	10.198,6	98,9
19,0	2.400,0	0,05	18,50-19,50	83,6	10.282,2	99,7
20,0	2.400,0	0,05	19,50-20,50	33,7	10.315,9	100,0

Power curve  
 Data used in calculation



Şekil 7: D-2.300 rüzgar türbini özellikleri

**D- 2300 113.0 IO!**

File C:\Users\mustafa\Documents\WindPRO Data\WTG Data\ -2.3-113.2300.113.0 IO! wtg

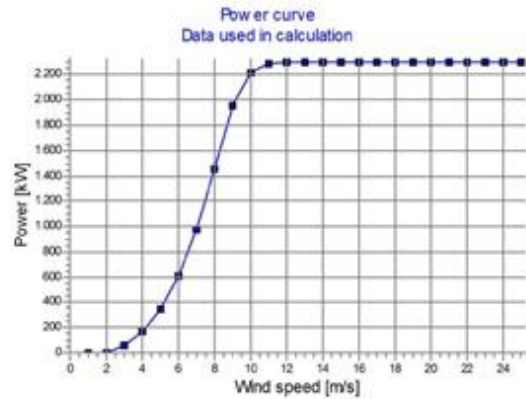
Company	<b>D-2300</b>	Noise reduced edition available. Please contact Siemens Wind Power for details
Type/Version	2.300,0 kW	
Rated power	2.300,0 kW	
Secondary generator	0,0 kW	
Rotor diameter	113,0 m	
Tower	Tubular	
Grid connection	50/60 Hz	
Origin country	DK	
Blade type		
Generator type	Variable	
Rpm, rated power	0,0 rpm	
Rpm, initial	0,0 rpm	
Hub height(s)	93,0; 0,0 m	
Maximum blade width	3,40 m	
Blade width for 90% radius	0,60 m	
Valid	Yes	
Creator	EMD	
Created	16.06.2011 14:33	
Edited	16.06.2011 14:33	



**Power, Efficiency and energy vs. wind speed**

Data used in calculation, Air density: 1,191 kg/m³ New WindPRO method (adjusted IEC method, improved to match turbine control) <RECOMMENDED>

Wind speed [m/s]	Power [kW]	Ce	Interval [m/s]	Energy [MWh]	Acc Energy [MWh]	Relative [%]
1,0	0,0	0,00	0,50-1,50	0,0	0,0	0,0
2,0	0,0	0,00	1,50-2,50	8,6	8,6	0,1
3,0	64,1	0,40	2,50-3,50	47,3	55,9	0,6
4,0	167,0	0,44	3,50-4,50	135,8	191,7	1,9
5,0	343,3	0,46	4,50-5,50	290,7	482,4	4,8
6,0	607,4	0,47	5,50-6,50	521,4	1.003,8	9,9
7,0	976,5	0,48	6,50-7,50	816,9	1.820,7	18,0
8,0	1.458,5	0,48	7,50-8,50	1.127,3	2.948,1	29,1
9,0	1.956,9	0,45	8,50-9,50	1.334,8	4.282,9	42,2
10,0	2.216,6	0,37	9,50-10,50	1.334,7	5.617,6	55,4
11,0	2.288,0	0,29	10,50-11,50	1.164,4	6.782,0	66,9
12,0	2.299,2	0,22	11,50-12,50	936,7	7.718,7	76,1
13,0	2.300,0	0,18	12,50-13,50	717,1	8.435,8	83,2
14,0	2.300,0	0,14	13,50-14,50	527,7	8.963,4	88,4
15,0	2.300,0	0,11	14,50-15,50	375,3	9.338,8	92,1
16,0	2.300,0	0,09	15,50-16,50	259,9	9.598,7	94,7
17,0	2.300,0	0,08	16,50-17,50	177,0	9.775,7	96,4
18,0	2.300,0	0,07	17,50-18,50	119,9	9.895,6	97,6
19,0	2.300,0	0,06	18,50-19,50	81,6	9.977,2	98,4
20,0	2.300,0	0,05	19,50-20,50	56,2	10.033,4	98,9
21,0	2.300,0	0,04	20,50-21,50	39,4	10.072,8	99,3
22,0	2.300,0	0,04	21,50-22,50	27,9	10.100,7	99,6
23,0	2.300,0	0,03	22,50-23,50	20,0	10.120,7	99,8
24,0	2.300,0	0,03	23,50-24,50	14,3	10.135,0	99,9
25,0	2.300,0	0,02	24,50-25,50	6,0	10.141,0	100,0





Şekil 8: E-1.800 rüzgar türbini özellikleri

**E-1800 100.0 IO!**

File C:\Users\mustafa\Documents\WindPRO Data\WTG Data\100.0 IO!.wtg

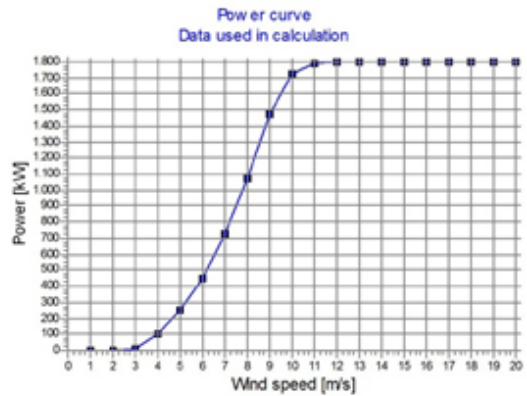
Company	<b>E-1800</b>	IEC Class S.
Type/Version		
Rated power	1.800,0 kW	
Secondary generator	0,0 kW	
Rotor diameter	100,0 m	
Tower	Tubular	
Grid connection	50 Hz	
Origin country	DK	
Blade type		
Generator type	One generator	
Rpm, rated power	14,9 rpm	
Rpm, initial	0,0 rpm	
Hub height(s)	80,0; 95,0 m	
Maximum blade width	3,92 m	
Blade width for 90% radius	1,05 m	
Valid	Yes	
Creator	EMD	
Created	01.11.2011 12:37	
Edited	01.11.2011 12:37	



**Power, Efficiency and energy vs. wind speed**

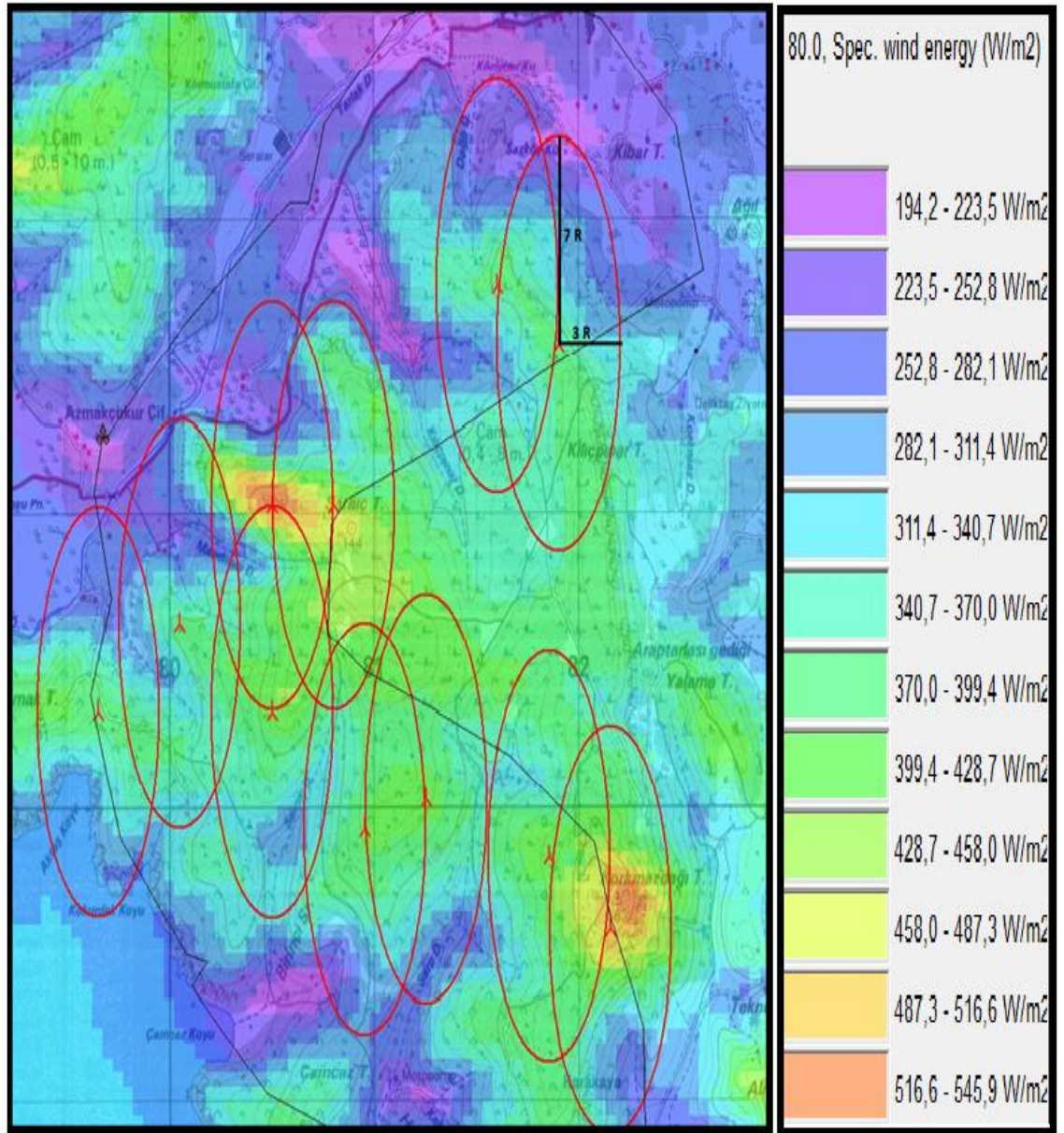
Data used in calculation, Air density: 1,191 kg/m<sup>3</sup> New WindPRO method (adjusted IEC method, improved to match turbine control) <RECOMMENDED>

Wind speed [m/s]	Power [kW]	Ce	Interval [m/s]	Energy [MWh]	Acc. Energy [MWh]	Relative [%]
1,0	0,0	0,00	0,50-1,50	0,0	0,0	0,0
2,0	0,0	0,00	1,50-2,50	0,0	0,0	0,0
3,0	10,7	0,09	2,50-3,50	16,5	16,5	0,2
4,0	103,7	0,35	3,50-4,50	81,5	98,0	1,3
5,0	248,4	0,42	4,50-5,50	203,1	301,0	4,0
6,0	445,5	0,44	5,50-6,50	374,3	675,3	8,9
7,0	723,1	0,45	6,50-7,50	592,7	1.268,0	16,8
8,0	1.076,5	0,45	7,50-8,50	830,2	2.098,2	27,8
9,0	1.472,6	0,43	8,50-9,50	1.010,7	3.108,9	41,2
10,0	1.728,1	0,37	9,50-10,50	1.033,2	4.142,1	54,8
11,0	1.792,2	0,29	10,50-11,50	905,1	5.047,2	66,8
12,0	1.799,6	0,22	11,50-12,50	727,6	5.774,8	76,4
13,0	1.800,0	0,18	12,50-13,50	557,0	6.331,8	83,8
14,0	1.800,0	0,14	13,50-14,50	409,9	6.741,7	89,2
15,0	1.800,0	0,11	14,50-15,50	291,5	7.033,2	93,1
16,0	1.800,0	0,09	15,50-16,50	201,9	7.235,1	95,8
17,0	1.800,0	0,08	16,50-17,50	137,5	7.372,6	97,6
18,0	1.800,0	0,07	17,50-18,50	93,1	7.465,7	98,8
19,0	1.800,0	0,06	18,50-19,50	63,4	7.529,1	99,7
20,0	1.800,0	0,05	19,50-20,50	25,8	7.554,8	100,0

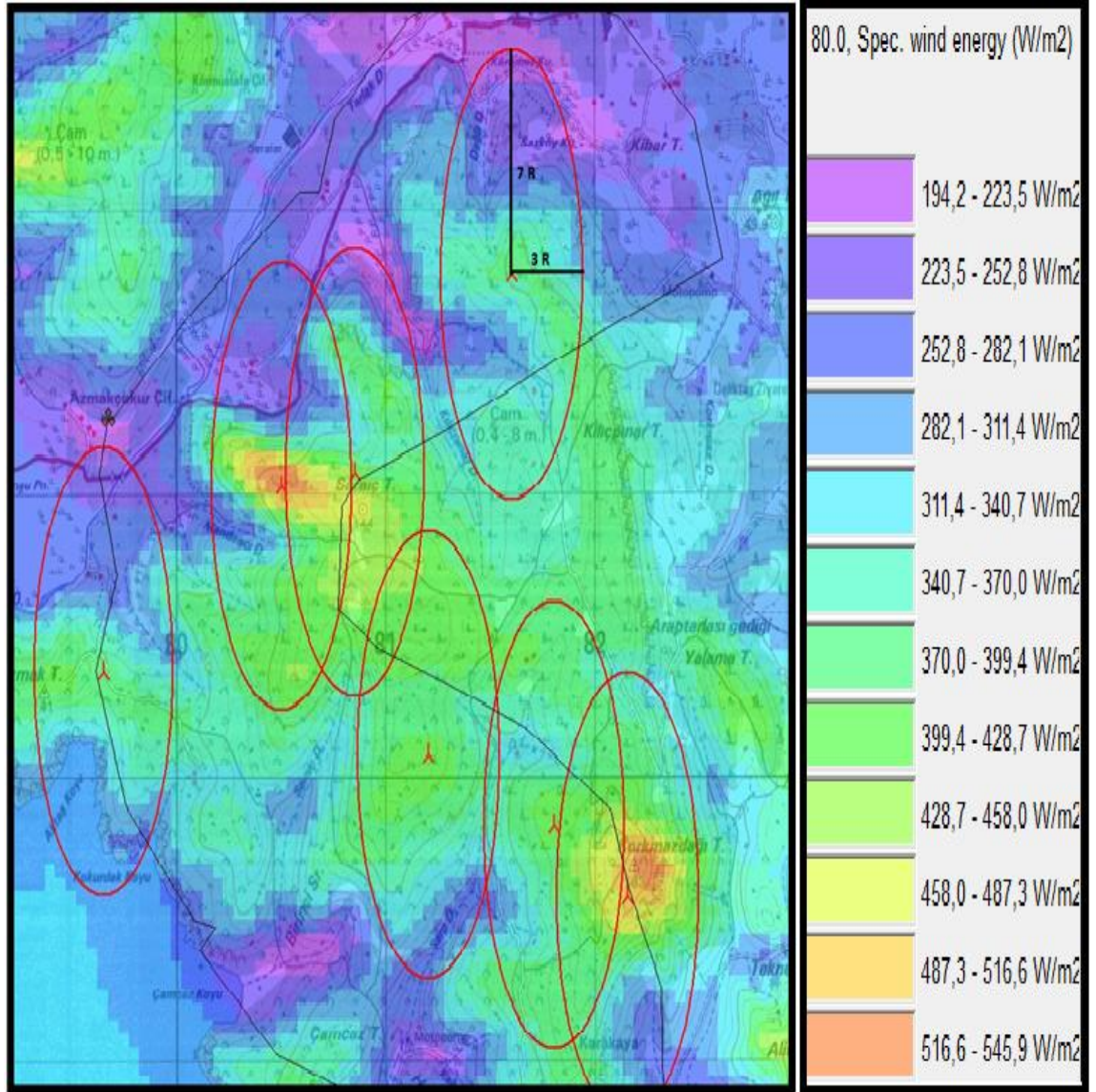




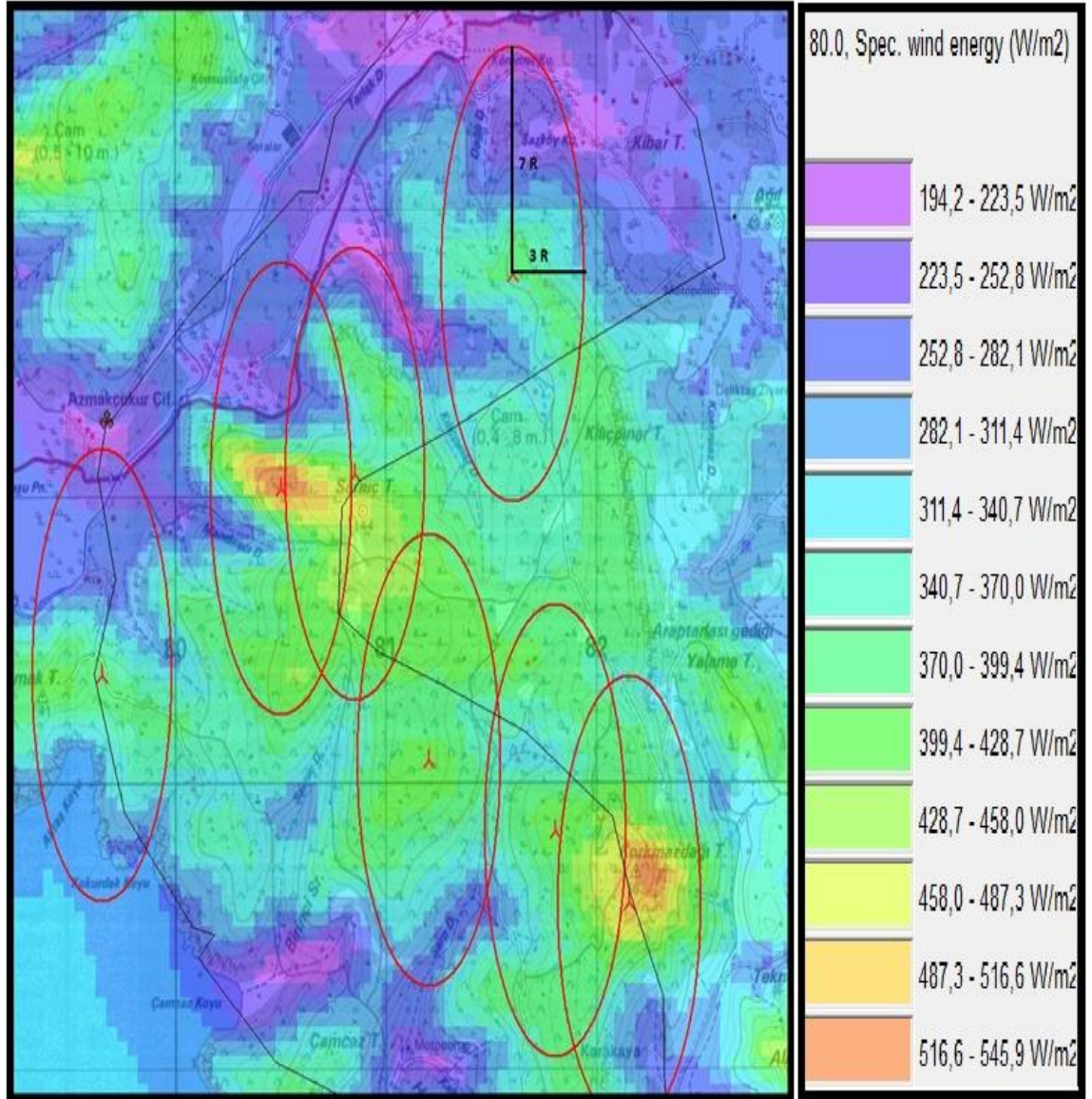
Şekil 10: B 1.600 türbin modeli için yerleşim optimizasyonu



Şekil 11: C 2.400 türbin modeli için yerleşim optimizasyonu



Şekil 12: D-2.300 türbin modeli için türbin yerleşim optimizasyonu



Şekil 13: E-1.800 türbini için yerleşim optimizasyonu

