

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**DENİZLİ İLİNİN TAVAS İLÇESİNE AİT RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN  
HESAPLANMASI VE EKONOMİK ANALİZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Serap TALAYOĞLU**

**Anabilim Dalı: Enerji Bilim ve Teknoloji**

**Programı: Enerji Bilim ve Teknoloji**

**OCAK 2010**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**DENİZLİ İLİNİN TAVAS İLÇESİNE AİT RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN  
HESAPLANMASI VE EKONOMİK ANALİZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Serap TALAYOĞLU  
301061025**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2009**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Ocak 2010**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Önder GÜLER (İTÜ)  
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Bihrat Önöz (İTÜ)  
Yrd. Doç. Dr. Emel Önal (İTÜ)**

**OCAK 2010**



## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında bilgilerini, yardımlarını ve desteğini esirgemeyen sayın Yrd. Doç. Dr. Önder GÜLER hocama, rüzgar verilerini ve kullanılan haritayı temin eden sayın Seyit Ahmet AKDAĞ'a çok teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca iyi bir öğrenim görmemi sağlayan, her zaman beni destekleyen, tecrübelerinden çokça faydalandığım sevgili ağabeyim Nusret KARAKAYA ve tüm aileme, çalışmalarım sırasında her zaman desteğini hissettiğim, tüm sabrı ve anlayışıyla beni sürekli teşvik eden ve her zaman yanımda olan değerli eşim Engin TALAYOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Ocak 2010

Serap TALAYOĞLU  
Meteoroloji Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. RÜZGAR ENERJİSİ.....</b>	<b>3</b>
2.1. Rüzgar.....	3
2.2. Rüzgar Türleri.....	4
2.3. Rüzgar Enerjisi.....	5
2.3.1. Rüzgar enerjisinin tarihsel gelişimi.....	5
2.3.2. Rüzgar enerjisi santralleri.....	6
2.3.3. Rüzgar türbinleri için yer seçimi.....	6
2.3.4. Dünyada rüzgar enerjisinin kullanımı.....	7
2.3.5. Türkiye’de rüzgar enerjisinin kullanımı.....	10
<b>3. VERİ ANALİZİ VE YÖNTEM.....</b>	<b>13</b>
3.1. Yöntem.....	13
3.1.1. Matematiksel yöntem.....	13
3.1.2. İstatistiksel yöntem.....	14
3.1.3. Lambert formülü.....	15
<b>4. WASP MODELİ.....</b>	<b>17</b>
4.1. Rüzgar Atlas Analizi ve Program Uygulaması.....	17
4.2. Pürüzlülük Değişim Etkisi.....	19
4.3. Pürüzlülük Uzunluğu.....	21
4.4. Pürüzlülük Katsayısı.....	22
4.4.1. Pürüzlülük uzunluğu cinsinden pürüzlülük katsayısının bulunması.....	23
4.4.2. Hız ve yükseklik cinsinden pürüzlülük katsayısının bulunması.....	23
4.4.3. Pürüzlülük uzunluğu ve hız cinsinden pürüzlülük katsayısının bulunması.....	23
4.5. Engel Perdeleme Etkisi.....	23
4.6. Topografik Etki.....	25
4.7. Rüzgar Atlasının Oluşturulması İçin Kullanılan Fiziksel ve İstatistiksel Modeller.....	27
4.7.1. Yüzey tabaka benzerlik yasası.....	27
4.7.2. Kararlılık modeli.....	28
4.7.3. Pürüzlülük değişim modeli.....	31
4.7.4. Perdeleme (shelter) modeli.....	32
4.7.5. Orografik model.....	33

<b>5. DENİZLİ İLİNİN TAVAS İLÇESİNE AİT RÜZGAR VERİLERİNİN WASP MODELİ İLE ANALİZİNİN YAPILMASI .....</b>	<b>35</b>
5.1. Çalışmada Seçilen Tavas İlçesinin Coğrafi Durumu .....	35
5.2. Tavas İlçesine Ait Verilerin Analizi ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi .....	36
5.2.1. Rüzgar ölçüm verilerinin analizi.....	36
5.2.2. Saatlik, aylık ve mevsimsel olarak rüzgar hızlarının ve Helmann katsayısının incelenmesi.....	37
5.2.3. WASP sonuçları .....	46
5.2.4. Rüzgar enerji türbinleri ve enerji üretim miktarının belirlenmesi .....	51
5.3. Türbinlerin Konumlandırılması .....	53
5.4. Verilerin Ekonomik Analizi .....	92
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>97</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>103</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>105</b>



## **KISALTMALAR**

<b>AEP</b>	: Yıllık Enerji Üretimi
<b>EİE</b>	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
<b>EWEA</b>	: European Wind Energy Association
<b>IEA</b>	: Uluslararası Enerji Ajansı
<b>MS</b>	: Microsoft
<b>NNE</b>	: Kuzey Kuzey Doğu
<b>UTM</b>	: The Universal Transverse Mercator
<b>WASP</b>	: TheWind Atlas Application and Program
<b>WMO</b>	: Dünya Meteoroloji Organizasyonu



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1: Küresel kurulu rüzgar gücü kapasitesi (MW)[15].....	8
Çizelge 2.2: Dünya’da en yüksek kurulu güce sahip ilk on ülke ve kurulu güç değerleri.....	9
Çizelge 2.3: Türkiye’de işletmede olan rüzgar enerji santralleri [12].....	11
Çizelge 4.1: Rüzgar kırıcılarının türüne göre geçirgenlik değerleri.....	24
Çizelge 5.1: 10m ve 30m’deki saatlik ortalama rüzgar hızları .....	37
Çizelge 5.2: 10m ve 30m’deki aylık ortalama rüzgar hızı değişimi .....	38
Çizelge 5.3: 10m ve 30m deki farklı zaman aralıkları için ölçülen yıllık ortalama güç yoğunluğu değerleri .....	39
Çizelge 5.4: 10m ve 30m’deki mevsimsel ortalama rüzgar hızı değerleri .....	40
Çizelge 5.5: Verilere ait durum tanımları .....	47
Çizelge 5.6: 10m yükseklikteki rüzgar verilerine ait rüzgar frekans bilgileri ve weibull parametreleri .....	48
Çizelge 5.7: Pürüzlülük sınıfları ve yüksekliklerine göre Weibull parametreleri.....	48
Çizelge 5.8: 30m yükseklikteki rüzgar verilerine ait Weibull parametreleri ve rüzgar frekansı .....	50
Çizelge 5.9: Pürüzlülük sınıfları ve yüksekliklerine göre Weibull parametreleri.....	50
Çizelge 5.10: Farklı zaman aralıkları için, 20 tane Vestas V63 türbinleri kullanılarak oluşturulan yıllık enerji üretim değerleri .....	55
Çizelge 5.11: Durum 7 için yıllık enerji üretim değerleri, kayıplar ve kapasite faktörleri .....	55
Çizelge 5.12: Durum 7 için Weibull parametreleri.....	56
Çizelge 5.13: Farklı zaman aralıkları için, 15 tane Vestas V80 türbinleri kullanılarak oluşturulan yıllık enerji üretim değerleri .....	57
Çizelge 5.14: Durum 10 türbinleri kullanılarak elde edilen yıllık enerji üretim değerleri, kayıplar, verimlilik ve kapasite faktörleri.....	58
Çizelge 5.15: Durum 10 için Weibull parametreleri .....	58
Çizelge 5.16: Durum 8 ayrıntılı üretim değerleri.....	59
Çizelge 5.17: Durum 8 için Weibull parametreleri.....	59
Çizelge 5.18: Durum 11 ayrıntılı üretim değerleri.....	60
Çizelge 5.19: Durum 11 için Weibull parametreleri .....	60
Çizelge 5.20: Durum 9 ayrıntılı üretim değerleri.....	61
Çizelge 5.21: Durum 9 için Weibull parametreleri .....	61
Çizelge 5.22: Durum 12 ayrıntılı üretim değerleri.....	62
Çizelge 5.23: Durum 12 için Weibull parametreleri .....	62
Çizelge 5.24: Durum 1 ayrıntılı üretim değerleri.....	63
Çizelge 5.25: Durum 1 için Weibull parametreleri.....	63
Çizelge 5.26: Durum 4 ayrıntılı üretim değerleri.....	64
Çizelge 5.27: Durum 4 için weibull parametreleri.....	64
Çizelge 5.28: Durum 2 ayrıntılı üretim değerleri.....	65
Çizelge 5.29: Durum 2 için Weibull parametreleri.....	65

<b>Çizelge 5.30:</b> Durum 5 ayrıntılı üretim değerleri .....	66
<b>Çizelge 5.31:</b> Durum 5 için Weibull parametreleri.....	66
<b>Çizelge 5.32:</b> Durum 3 ayrıntılı üretim değerleri .....	67
<b>Çizelge 5.33:</b> Durum 3 için Weibull parametreleri.....	67
<b>Çizelge 5.34:</b> Durum 6 ayrıntılı üretim değerleri .....	68
<b>Çizelge 5.35:</b> Durum 6 için Weibull parametreleri.....	68
<b>Çizelge 5.36:</b> V63 ve V80 türbinleri için tanımlanan durumların karşılaştırmalı enerji üretim değerleri.....	69
<b>Çizelge 5.37:</b> Helmann katsayıları için durum tanımları .....	91
<b>Çizelge 5.38:</b> Helmann katsayılarına göre yıllık enerji üretimleri ve kapasite faktörleri.....	92
<b>Çizelge 5.39:</b> Farklı durumlardaki türbin fiyatları ve kWh maliyetleri .....	95

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli atlası (REPA).....	12
Şekil 4.1: Rüzgar atlas modeli .....	19
Şekil 4.2: Pürüzlülük sınıfı 0 olan arazi .....	20
Şekil 4.3: Pürüzlülük sınıfı 1 olan arazi .....	20
Şekil 4.4: Pürüzlülük sınıfı 2 olan arazi .....	21
Şekil 4.5: Pürüzlülük sınıfı 3 olan arazi .....	21
Şekil 4.6: Pürüzlülük uzunluğu ve yüzey yapısı özelliklerine göre pürüzlülük sınıfları.....	22
Şekil 4.7: Bir engelin perdeleme etkisi.....	25
Şekil 4.8: Tepenin zirvesinden olan uzaklığa göre nispi hız artış oranları.....	26
Şekil 4.9: Yamaçta ve tepenin zirvesinde akım profili.....	27
Şekil 5.1: Tavas ilçesinin uydudan görünümü.....	35
Şekil 5.2: 10m ve 30m'deki saatlik ortalama rüzgar hızlarının grafiksel gösterimi ..	38
Şekil 5.3: Aylık ortalama rüzgar hızlarının değişimi .....	39
Şekil 5.4: 10m ve 30m'deki ortalama rüzgar hızlarının mevsimsel değişimi .....	40
Şekil 5.5: Yönlere göre rüzgar esme sıklıkları.....	41
Şekil 5.6: Yönlere göre ortalama rüzgar hızlarının değişimi .....	41
Şekil 5.7: Helmann katsayısının rüzgar yönlerine göre değişimi .....	42
Şekil 5.8: Rüzgarın gün içerisindeki esme sıklıkları ve yönleri .....	42
Şekil 5.9: Helmann katsayılarının frekans değerleri .....	43
Şekil 5.10: Helmann katsayısının saatlik değişimi .....	43
Şekil 5.11: Gün içerisinde sıcaklık ile helmann katsayılarının değişimleri .....	44
Şekil 5.12: Helmann katsayılarının gün içerisindeki frekans değerleri.....	44
Şekil 5.13: Helmann katsayılarının aylık değişimleri .....	45
Şekil 5.14: Helmann katsayısının mevsimsel değişimi .....	45
Şekil 5.15: Aylara göre sıcaklık ve helmann katsayılarının değişimi .....	46
Şekil 5.16: Mevsimlere göre helmann katsayılarının frekans değişimleri .....	46
Şekil 5.17: Tavas ilçesine ait 10m'lik veriler kullanılarak elde edilen rüzgar gülü ve Weibull dağılımı .....	47
Şekil 5.18: Tavas ilçesine ait 30m'lik veriler kullanılarak elde edilen rüzgar gülü ve Weibull dağılımı .....	49
Şekil 5.19: Rüzgar hızı değerlerinin alansal dağılımı .....	52
Şekil 5.20: Güç yoğunluğu değerlerinin alansal dağılımı .....	53
Şekil 5.21: Vestas V80 türbinleri kullanılarak oluşturulan 30 MW kurulu güce sahip rüzgar santrali.....	54
Şekil 5.22: Durum 4-5-6 için ortalama rüzgar hızı ve yıllık enerji üretim değerleri ..	70
Şekil 5.23: Durum 4-5-6 için güç yoğunlukları ve yıllık enerji üretim değerleri .....	71
Şekil 5.24: Durum 10-11-12 için ortalama rüzgar hızı ve yıllık enerji üretim değerleri .....	72
Şekil 5.25: Durum 10-11-12 için güç yoğunlukları ve yıllık enerji üretim değişimleri.....	73
Şekil 5.26: Durum 4 için yıllık enerji üretim değişimleri.....	74
Şekil 5.27: Durum 5 için yıllık enerji üretimleri.....	75

<b>Şekil 5.28:</b> Durum 6 için yıllık enerji üretimleri .....	76
<b>Şekil 5.29:</b> Durum 10 için yıllık enerji üretimleri .....	77
<b>Şekil 5.30:</b> Durum 11 için yıllık enerji üretimleri .....	78
<b>Şekil 5.31:</b> Durum 12 için yıllık enerji üretimleri .....	79
<b>Şekil 5.32:</b> Durum 1-2-3 için ortalama rüzgar hızı ve yıllık enerji üretim değerleri .....	81
<b>Şekil 5.33:</b> Durum 1-2-3 için güç yoğunlukları ile birlikte yıllık enerji üretimi değişimleri .....	82
<b>Şekil 5.34:</b> Durum 7-8-9 için ort. rüzgar hızı ve yıllık enerji üretimleri.....	83
<b>Şekil 5.35:</b> Durum 7-8-9 için güç yoğunlukları ve yıllık enerji üretimleri .....	84
<b>Şekil 5.36:</b> Durum 1 için yıllık enerji üretimleri .....	85
<b>Şekil 5.37:</b> Durum 2 için yıllık enerji üretimleri .....	86
<b>Şekil 5.38:</b> Durum 3 için yıllık enerji üretimleri .....	87
<b>Şekil 5.39:</b> Durum 7 için yıllık enerji üretimleri .....	88
<b>Şekil 5.40:</b> Durum 8 için yıllık enerji üretimleri .....	89
<b>Şekil 5.41:</b> Durum 9 için yıllık enerji üretimleri .....	90

## SEMBOL LİSTESİ

<b>E</b>	: Enerji Yoğunluğu
<b>m</b>	: Kütle
<b>v</b>	: Hız
<b>V</b>	: Hacim
<b>A</b>	: Alan
<b>L</b>	: Rüzgar yönündeki uzunluk
<b><math>\rho</math></b>	: Havanın Yoğunluğu
<b>t</b>	: Zaman
<b>R<sub>x</sub></b>	: Bileşke rüzgarın doğu-batı doğrultusundaki bileşenlerinin ortalamasıdır
<b>R<sub>y</sub></b>	: Bileşke rüzgarın kuzey-güney doğrultusundaki bileşenlerinin ortalamasıdır
<b>R</b>	: Bileşke rüzgar
<b>P</b>	: Persistans
<b><math>\bar{v}</math></b>	: Rüzgar hızı ortalaması
<b><math>\alpha</math></b>	: İki rüzgar yönü arasındaki açı
<b>P(v)</b>	: Rüzgar hızı frekansı
<b>k</b>	: Weibull şekil parametresi
<b>c</b>	: Weibull ölçek parametresi
<b><math>\Gamma</math></b>	: Genel gamma fonksiyonu
<b><math>\sigma</math></b>	: Standart sapma
<b>z<sub>0</sub></b>	: Pürüzlülük uzunluğu
<b>S</b>	: Rüzgara karşı gelen dikey kesit alanı
<b>A<sub>h</sub></b>	: Arazi üzerindeki ortalama kesit alanı
<b>z</b>	: Rüzgar hızı hesap edilmesi gereken yükseklik
<b>z<sub>ref</sub></b>	: Rüzgar hızı bilinen yükseklik
<b>U</b>	: z Seviyesindeki Rüzgar Hızı
<b>U<sub>ref</sub></b>	: Bilinen z <sub>ref</sub> yüksekliğindeki rüzgar hızı
<b>k<sub>1</sub></b>	: Pürüzlülük Katsayısı
<b>x</b>	: Hesaplama noktasının engelden olan uzaklığı
<b>p</b>	:Engelin geçirgenliği
<b>R<sub>1</sub></b>	: Oransal rüzgar hızındaki azalma
<b>R<sub>2</sub></b>	: Ortalama rüzgar hızındaki azalma
<b>u</b>	: Ortalama rüzgar hızı
<b>u<sub>cor</sub></b>	: Düzeltilmiş ortalama rüzgar hızı
<b>u*</b>	: Sürtünme Hızı
<b><math>\tau</math></b>	: Yüzey gerilmesi
<b><math>\Psi</math></b>	: Yüzey ısı akısı
<b>T<sub>0</sub></b>	: Mutlak yüzey sıcaklığı
<b>C<sub>p</sub></b>	: Sabit basınçta ısı akısı
<b>D</b>	: Denge Mesafesi
<b>W<sub>n</sub></b>	: Pürüzlülük Değişimi
<b>K<sub>nj</sub></b>	: Rastgele sayılar
<b>J<sub>n</sub></b>	: n. Mertebe Bessel fonksiyonu

<b>r</b>	: Yarıçap
<b><math>\Phi</math></b>	: Azimut
<b>PVC</b>	: Sistemin ömrü boyunca yapılan yatırımın şimdiki değeri
<b>I</b>	: İlk yatırım maliyetini( türbin fiyatı ile fiyatın %20si kadar olan bağlantı giderleri),
<b>B</b>	: Yıllık bakım onarım giderleri
<b>i</b>	: Enflasyon oranı
<b>r</b>	: PVC formülünde faiz değeri
<b>S</b>	: Hurda bedeli
<b>t</b>	: Türbinin ömrü



## **DENİZLİ İLİNİN TAVAS İLÇESİNE AİT RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN HESAPLANMASI VE EKONOMİK ANALİZ**

### **ÖZET**

Artan enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için kullanılacak kaynakların çeşitlendirilmesi her ülkenin enerji politikasının temelini oluşturur. Çeşitli kaynakların kullanılmasında ki bir diğer sebep Kyoto Protokolü çerçevesinde atmosfere CO<sub>2</sub> salınımını engellemektir. Bu nedenle enerji ihtiyacının fosil yakıtlardan karşılanmasının yanında, yenilenebilir enerji kaynaklarının da kullanılması gündeme gelmiştir. Enerji ihtiyacını karşılamak için yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde rüzgar enerjisinin kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Türkiye’de de son yıllarda rüzgar enerjisinden yararlanarak elde edilen enerji üretimi artmıştır ve artmaya da devam etmektedir. Artan talep ve enerji ihtiyacının karşılanması için, kurulması hedeflenen rüzgar enerjisi santrallerinin tüm hazırlıkları ayrıntılı olarak yapılmalı ve bu santrallerin kurulumu için yapılan fizibilite çalışmaları da çok hassas hesaplamalar yapılarak sonuçlandırılmalıdır. Bu hesaplamalar için bir çok model kullanılmaktadır. Bu çalışmada bu modeller arasında WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) modeli kullanılarak seçilen Denizli’nin Tavas ilçesi için rüzgar enerjisi potansiyel ve enerji üretim hesaplamaları yapılmıştır. Farklı zaman aralıklarına ait rüzgar verilerinin ve Helmann katsayılarının değişiminin rüzgar enerjisi üretimine etkileri incelenmiştir. Bunun yanında, aynı WasP modeli içerisinde farklı türbin tipleri kullanılarak, bölgeye uygun türbin konumlandırma işlemleri de yapılmıştır. Seçilen farklı türbin modellerinin farklı zaman aralıklarında ve farklı yüksekliklerdeki enerji üretim değerleri karşılaştırılarak en uygun türbin ve zaman aralığı belirlenmiştir. WAsP ile yapılan çalışmalara ek olarak, çalışmalarda kullanılan verilerin saatlik, aylık ve mevsimsel olarak analizleri yapılmış, rüzgar yönlerine ve Helmann katsayılarına göre frekans dağılımlarını da içeren değerler elde edilmiştir.



## **THE MODELLING OF WIND ENERGY POTENTIAL OF DENİZLİ CITY TAVAS DISTRICT AND ECONOMIC ANALYSIS**

### **SUMMARY**

Diversification of energy sources to supply increasing energy demands constitutes the main energy policy of each country. Another reason for the source diversification is to decrease CO<sub>2</sub> emission in terms of Kyoto Protocol. Beside fossil fuels, using renewable energy sources has become a current issue. Using windpower energy among the other energy sources to provide increasing energy demand has become prevalent in recent years. In Turkey, windpower energy production has increased and expected to increase continuously. To supply increasing energy demand, preparation of planned windfarm installations has to be done in detail and feasibility studies has to be finalized by precise accurate calculation. There are many models for these calculations. In this study, WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) was used for calculation of wind energy potential and energy production for Denizli city, Tavas district. The effect of wind data of different time intervals and changes of Helmann coefficients on windpower production was analyzed. Additionally, most suitable micro siting has been made in the same WAsP model by using different turbine types. The best turbine type and time interval was determined by comparing windpower production results of selected different turbine types in different time intervals and altitudes. Beside WAsP studies, hourly, monthly and seasonal analyses were made of used data. Frequency distribution values were obtained according to wind directions and Helmann coefficients.



## 1. GİRİŞ

Dünya'daki hızlı sanayileşme ve kentleşme doğal kaynaklara ve enerjiye olan talebi giderek artırmaktadır [1]. Dünyada Enerji ihtiyacının yaklaşık % 80'i fosil yakıtlardan karşılanmaktadır [2]. Bu kaynaklar, gerek ısınmada gerekse yakıt olarak çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu fosil kaynakların rezervlerinin gelecek için yeterli görülmemesi, ayrıca elde ediliş ve depolama bakımından büyük ölçüde ileri teknoloji ve finans kaynağı gerektirmesi, dünyadaki bütün ülkelerin mevcut enerji programlarını tekrar gözden geçirmesine ve acilen gerekli önlemleri almasına sebep olmuştur[3]. Türkiye'de ise enerji ihtiyacının çoğu fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Global açıdan çevreye zarar veren kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil kaynaklı yakıtlar, çevre kirliliği bir yana ekonomik açıdan da Türkiye'yi üretici firmalara sahip ülkelere bağımlı hale getirmektedir. Bu nedenle, bugün dünyanın birçok ülkesinde yenilenebilir temiz enerji kaynakları arayışına girilmiştir. Bu temiz enerji kaynakları güneş, rüzgar, hidrolik, jeotermal ve biokütle olarak sıralanabilir[2].

Türkiyenin ihtiyaç duyduğu enerji, gelişmiş bir ülke olma çabalarından dolayı günden güne artmaktadır. Sürdürülebilir kalkınmanın gereksinim duyduğu yenilenebilir enerji çeşitlerine ülkemizde hemen hemen hepsine rastlanmaktadır. Fakat kurulum maliyetlerinin çok yüksek olması ve buna benzer etkiler nedeniyle bu enerji kaynaklarından istenildiği kadar yararlanılmamaktadır. Oysa ülkemiz konumu dolayısıyla dünyanın kuvvetli ve etkin rüzgarlar bölgesinde yer almaktadır. Marmara, Ege, Akdeniz kıyıları dünya üzerinde rüzgar gücü potansiyeli en yüksek olan alanlar arasındadır. Türkiye' de rüzgar ölçümleri ve arazi durumu göz önüne alınarak yapılan teorik çalışmalar sonucunda, 400 Milyar kWh üzerinde doğal brüt potansiyel, 124 Milyar kWh civarında teknik potansiyel ve uygun yöreler için 14 milyar kWh 'ın üzerinde net ekonomik potansiyelin varlığı hesaplanmaktadır [2]. Kyoto protokolü çerçevesinde küresel ısınma ve çevre kirliliği gözönüne alındığında, Türkiye'de hükümet alım garantisi desteği ile rüzgar enerjisi yatırımlarına büyük bir yönelme gerçekleşmiştir.

Rüzgar enerjisindeki süreksizlik planlama açısından hem maliyetleri artırmakta hem de uygulanabilirliği sorgular hale getirmektedir. Bu nedenle Rüzgar enerjisi santral

kurulum aşamasından önce fizibilite çalışmaları hassas bir şekilde yapılmalıdır. Bu çalışmada Denizli, Tavas bölgesindeki meteoroloji istasyonuna ait 10 dakikalık , yarım saatlik ve bir saatlik veriler kullanılarak santral kurulum aşamasından önce yapılması gereken enerji potansiyeli değerleri hesaplanmıştır. Çevrede daha uygun bölgelerdeki enerji potansiyelini belirlemek amacıyla bir rüzgar alan modeli (WASP) kullanılmış ve rüzgar hızı ve enerji potansiyelinin alansal dağılımı belirlenmiştir ve son olarak yine aynı bölge için maliyet analizi hesaplamaları da yapılmıştır.

## 2. RÜZGAR ENERJİSİ

### 2.1. Rüzgar

Yeryüzünün farklı bölgelerinin, güneşten gelen enerji sayesinde, dünyanın eğriliği, dönme ekseninin eğimi ve dünya yüzeyinin homojen olmayan yapısı nedeniyle farklı ısınması sonucu meydana gelen basınç ve sıcaklık farkları, rüzgarı oluşturur. Güneş enerjisi yeryüzüne ulaştığı zaman büyük ölçekli atmosfer hareketleri oluşur, aynı zaman da çeşitli etkilerle de yerel değişiklikler meydana gelir. Ekvatorial bölgelerde havanın ısınmasına bağlı olarak, hava yükselmeye başlar, kutuplardaki soğuk hava ise çöker. Ekvatorda yükselen hava tropopoz seviyesinde kuzey ve güney kutba doğru hareket eder. Daha yukarı enlemlerden gelen soğuk hava akımıyla karşılaştığı 30°N ve 30°S enlemlerinde oluşan konverjansa bağlı olarak hava bu enlemlerde alçalmaya başlar. Yer seviyesinde ise meydana gelen subtropikal yüksek basınç alanlarındaki diverjansa bağlı olarak her iki yarım kürede akış kutba ve ekvatora doğru yönelir. Coriolis kuvvetinin sapıtıcı etkisiyle 30°N ve 30°S enlemleri arasında kuzey doğulu ve güney doğulu ticaret rüzgarları oluşur. Aynı şekilde 30°N ve 30°S enlemleri ile 60°N ve 60°S enlemleri arasında kutba doğru olan akış batılı akış olarak tanımlanır[4].

Karaların ve denizlerin farklı ısınmaları da hava akımlarına sebep olurlar. Bu hava akımları rüzgar adını alır. Yeryüzünün topografik yapısı, çeşitli engeller, örneğin binalar ve ağaçlar, rüzgarın farklı hızlarda olmasına neden olurlar. Bu bilgiler doğrultusunda kuvvetli ve zayıf rüzgar alanlarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

1. Kuvvetli rüzgar alanları;
2. Kuvvetli basınç gradyanının bulunduğu bölgeler,
3. Yüksek ova ve platolar,
4. Sürekli inici akış bölgeleri,
5. Hakim rüzgar yönüne paralel vadiler,

6. Tepe ve dağ zirveleri,
7. Jeostrofik rüzgar ve termal etkileşimlerin meydana geldiği kıyı şeritleri.

Zayıf rüzgar alanları;

1. Hakim rüzgar yönüne dik vadiler,
2. Engebelerle gölgelenmiş arazi,
3. Kısa, dar vadi veya kanyonlar,
4. Pürüzlülük yüksekliğinin büyük olduğu alanlar

Herhangi bir bölgedeki rüzgar potansiyelinin saptanması ve rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerine uygun yer seçilebilmesi için bu kuvvetli ve zayıf rüzgar alanlarının doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekir [5].

## **2.2. Rüzgar Türleri**

Tüm dinamik hava olayları, atmosferin yeryüzeyine en yakın tabakası olan troposfer tabakası içerisinde meydana gelirler. Rüzgar türleri, kutuplar ile ekvator arasındaki hava hareketlerine bağlı olan küresel rüzgarlar, coriolis ve merkezkaç kuvvetinin sebep olduğu bölgesel rüzgarlar ve özellikle rüzgardan enerji üretimi açısından oldukça önemli olan denizler, karalar ve vadiler arasındaki hava akımlarından oluşan yerel rüzgarlar olarak sayılabilir.

Yüzey rüzgarları yeryüzeyinden yaklaşık olarak 100m yükseklikte meydana gelir ve yeryüzeyinden çok etkilenir. Rüzgar enerjisi üretilirken yüzey rüzgarlarından yararlanılır ve belirli bir alanda hakim rüzgar yönünü belirlemede çok önemlidir. Yerel rüzgarlar büyük ölçekli rüzgarların oluşmasına katkıda bulunurlar. Büyük ölçekli rüzgarlar zayıf olduklarında yerel rüzgarlar, rüzgarın türünü belirler. Bunlar dağ, vadi ile deniz ve kara meltemleri yerel rüzgarların önemlileridir [6]. Literatürde rüzgarlar farklı ölçeklerde incelenir ve değerlendirilir. Bunlar:

1. Makro: Büyük ölçekli hava modelleri( kıtalar ya da kıtaların bir parçası)
2. Mezo: Ülke veya bölge gibi daha küçük alanlar
3. Yerel: Sınırlandırılmış bir bölge veya bir alan, ova, plato, sahil şeridi ya da şehir alanı gibi



4. Mikro: Çok küçük ölçüklerde daha yerel ve daha fazla sıklıkta en iyi biçimde yerleştirilmiş yerel anemometre kayıtları ile tespit edilebilir.

Yukarıda bahsi geçen farklı ölçekler kullanım alanlarına göre farklı şekillerde değerlendirilir. Basın ve havayolları, makro ve mezo ölçeklerdeki değerlendirmelere göre inceleme yapmakta, rüzgar enerjisi ile ilgili çalışmalarda ise yerel ve özellikle mikro ölçekteki değerlendirmeler kullanılmaktadır. Bu ölçekteki veriler, türbin tasarımı ve mikro-konuşlandırma için gereklidir. Türbinlerin teker teker konuşlandırılmasının verimi bu verilere bağlıdır [7].

## **2.3. Rüzgar Enerjisi**

### **2.3.1. Rüzgar enerjisinin tarihsel gelişimi**

M.Ö. 5000 yıllarında Nil nehrinde kayıkları hareket ettirmek için rüzgar enerjisinden yararlanılırken, Çin`de basit yel değirmenleriyle su pompalanmıştır. 640 yılına doğru ise İran`da yapılan yel değirmenlerinin, haclı seferleri sırasında Avrupa`ya doğru götürülmesi, Avrupalıların bu mekanik teknolojiyle tanışmasına sebep olmuştur. 13. yy da yel değirmenleri, İngiltere`de sanayi makinalarını hareket ettirmek için kullanılmıştır. 18. yy da ise Hollandalı göçmenler tarafından Amerika`ya götürüldüğü bilinmektedir. Rüzgar kullanımına ait ilk yazılı bilgiler ise Büyük İskender tarafından kaleme alınmıştır.

Enerji üretimi için ise ilk rüzgar türbini, aerodinamik alanındaki çalışmalarıyla da tanınan La Cour adında Danimarkalı bir meteorolog tarafından 1891 yılında yapılmıştır, 1908 yılına ulaşılan kadar ise bir çok rüzgar çiftliği kurulmuştur. Benzin ve dizel motorların yaygınlaşması ve elektrik üretiminde sağlanan gelişmeler nedeniyle geri plana itilen rüzgar enerjisi 1973`te yaşanan petrol krizi nedeniyle yeniden gündeme gelmiştir[8]

Rüzgardan bir enerji kaynağı olarak yararlanma ve bazı teorik ve deneysel incelemeler 1981 yılında Dünya Meteoroloji Organizasyonu (WMO) tarafından yapılmıştır. Rüzgar, güneş, jeotermal, biyokütle gibi alternatif enerji kaynaklarının yenilenebilir olması, çevre kirliliğine yol açmaması ve ham maddeye gereksinim duyulmaması, bu tür enerjilere yönelmesine neden olmuştur.

### **2.3.2. Rüzgar enerjisi santralleri**

Rüzgar enerjisi üretmeye elverişli olan bir yere en azından birkaç tane rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürülebilir türbinin kurulmasıyla ortaya çıkan sahaya rüzgar santrali (rüzgar çiftliği) adı verilir. Rüzgar santralleri, kurulmasına sakınca olmayan yerlere yaklaşık 100-200 m aralıkla türbinin yerleştirilmesiyle ortaya çıkar. Rüzgar santrallerinin ana elemanı, rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine çeviren rüzgar türbinidir. Modern rüzgar türbinleri; aerodinamik olarak rüzgarın sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinden yararlanarak çalışırlar. Sürüklenme kuvveti rüzgarın esme yönünde türbin yüzeyine rüzgar tarafından yapılan basınç kuvveti, kaldırma kuvveti ise esme yönüne dik olan kuvvettir.

### **2.3.3. Rüzgar türbinleri için yer seçimi**

Rüzgar enerjisinden, maksimum verimlilik elde edebilmek için rüzgar türbinlerinin yerlerinin seçimi çok önemlidir. Yer seçiminde güç verimini arttırmak için; sistemin ömrünü azaltan, bakım masraflarını artıran kuvvetli türbülans bölgelerinden kaçınmak gerekir. Rüzgar türbini monte edilmeden önce, rüzgar enerjisi maliyeti hassas olarak belirlenmelidir. Böyle bir değerlendirme türbin yerleşim alanındaki rüzgar karakteristikleriyle ilgili doğru bilgiyi gerektirir. Rüzgar değişken ve yerleşim alanına bağlı olduğundan, bir rüzgar türbininin mevcut üretim sistemlerinden farklı bir değerlendirmeye tabi tutulması gerekir[9]. Bu durum için yapılan analizler aşağıdaki başlıklar altında toplanmaktadır;

#### **1. Uygunluk analizi**

##### **a- Başlangıç enerji kaynağı analizi**

- 1) Enerji gereksinimi tahmini,
- 2) Rüzgar türbininin enerji üretim tahmini,
- 3) Mevcut rüzgar sistemlerinin çalıştırılması,

##### **b- Ekonomik analiz**

- 1) Rüzgar türbininin maliyetinin belirlenmesi,
- 2) Kültürel ve diğer faktörlerin belirlenmesi,
- 3) İşletme bütçesinin formülasyonu,

## 2. Yer ve sistemin seçimi

### a- Planlanan enerji kaynağı yeri

- 1)Aday yer veya yerin seçimi,
- 2)Seçilen bölgelerde mevcut rüzgar enerjisinin belirlenmesi,

### b- Rüzgar türbin sisteminin belirlenmesi

- 1) Sayısal olarak enerji gereksinimi tahmini,
- 2) Enerji çıkış değerlerinin sayısal tahmini,
- 3) Makine, depolama ve geri besleme sistemlerinin seçimi,
- 4) Maliyet tahmini ve diğer alternatiflerle karşılaştırılması.

### **2.3.4. Dünyada rüzgar enerjisinin kullanımı**

Enerjinin yeterli, zamanında, kaliteli, ekonomik, güvenilir ve temiz olarak sunumu günümüzde ülkelerin gelişmişlik düzeylerini belirleyen en önemli göstergelerden biridir. Nüfus ve sanayileşme arttıkça , enerji tüketimi de hızlı bir şekilde artmaktadır. Fosil yakıt rezervlerinin yakın gelecekte tükeneceği gerçeği ve enerji maliyeti, enerji üretim ve tüketiminde çok ciddi yaptırımları ve araştırmaları zorunlu kılmaktadır [10]. Son 30 yıl boyunca global ekonomi her yıl %3,3 gelişmiştir. Bu zaman içerisinde elektrik enerjisi arzı ise %3,6 artmıştır. 2004 yılında dünyadaki elektrik enerjisi üretimi 17.450 TWh ve dünyada 2030 yılındaki elektrik enerjisi tüketiminin 31657 TWh olacağı tahmin ediliyor[11]. Nükleer ve yenilenebilir enerjilerin katkılarına rağmen, dünya hala fosil enerji çağında bulunmaktadır. Fosil yakıtlar (kömür, petrol ve doğal gaz) birincil enerji kaynaklarıdır. Küresel bazda dünyanın birincil enerjisinin %75'ini fosil yakıtlar oluşturmaktadır.[10] Fosil kaynaklar gelecekte tükeneceği için, aynı zamanda hidrolik, solar, biyokütle, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi ve enerji tasarrufu çalışmaları devam etmektedir. Dünyadaki ülkelerin gelecekte için yenilenebilir enerji kaynakları çok önemli bir yere sahiptir.[11] Tablo 2.1'de 2008 yılına ait, Dünya'daki ülkeleri kurulu güçleri gösterilmektedir.

Bu tabloya göre, dünya üzerindeki en yüksek kurulu güç 56993 MW ile Avrupa'dadır. EWEA tarafından, 2008 yıl sonu itibariyle, dünyadaki kurulu güç 120121 MW olarak yayınlanmıştır.

**Çizelge 2.1:** Küresel kurulu rüzgar gücü kapasitesi (MW)[15]

	Toplam 2007 sonu	Yeni 2008	Toplam 2008 sonu
<b>Afrika ve Orta Doğu</b>			
Mısır	310	55	365
Fas	124	10	134
İran	67	17	85
Tunus	20	34	54
Diğer (1)	17	14	31
<b>Toplam</b>	<b>538</b>	<b>130</b>	<b>669</b>
<b>Asya</b>			
Hindistan	7845	1800	9645
Çin	5910	6300	12210
Japonya	1528	356	1884
Tayvan	281	81	362
Güney Kore	193	43	236
Filipinler	25	8	33
Diğer (2)	5	1	6
<b>Toplam</b>	<b>15787</b>	<b>8589</b>	<b>24376</b>
<b>Avrupa</b>			
Almanya	22247	1665	23912
İspanya	15145	1609	16754
Danimarka	3125	77	3202
İtalya	2726	1010	3736
İngiltere	2406	836	3242
Portekiz	2150	712	2862
Fransa	2454	950	3404
Hollanda	1747	500	2247
Avusturya	982	14	996
Yunanistan	871	114	985
İrlanda	795	208	1003
İsveç	788	236	1024
Norveç	326	102	428
Turkey	147	286	433
Polonya	276	196	472
Avrupa'nın geri kalanı (3)	955	362	556
<b>Toplam Avrupa</b>	<b>57140</b>	<b>8877</b>	<b>65256</b>
<b>AB-27 (4)</b>	<b>56993</b>	<b>8591</b>	<b>64823</b>
<b>Latin Amerika ve Karibler</b>			
Brezilya	247	94	341
Meksika	85	0	85
Kosta Rika	70	0	70

**Çizelge 2.1:** (devam) Küresel kurulu rüzgar gücü kapasitesi (MW)[15]

	<b>Toplam 2007 sonu</b>	<b>Yeni 2008</b>	<b>Toplam 2008 sonu</b>
Karaibler	55	0	55
Arjantin	29	0	29
Diğer (5)	45	0	45
<b>Toplam</b>	<b>531</b>	<b>94</b>	<b>625</b>
<b>Kuzey Amerika</b>			
ABD	16824	8358	25182
Kanada	1846	523	2369
<b>Toplam</b>	<b>18670</b>	<b>8881</b>	<b>27551</b>
<b>Pasifik Bölgesi</b>			
Avustralya	824	482	1306
Yeni Zelanda	322	4	326
Pasifik Adaları	12	0	12
<b>Toplam</b>	<b>1158</b>	<b>486</b>	<b>1644</b>
<b>Dünya toplamı</b>	<b>93824</b>	<b>27057</b>	<b>120121</b>

EWEA’da yayınlanan verilere göre, dünyada rüzgar enerjisi kurulu gücünün en fazla olduğu ilk on ülke ise Tablo2.2’de gösterilmektedir. Bu tabloya göre ilk sırada 25170 MW kurulu güce sahip ABD bulunmaktadır. Avrupa içerisinde sıralama yapıldığında ise Almanya ilk sırada gelmektedir.

**Çizelge 2.2:** Dünya’da en yüksek kurulu güce sahip ilk on ülke ve kuru güç değerleri

Ülke	MW	%
ABD	25170	20,8
Almanya	23903	19,8
İspanya	16754	13,9
Çin	12210	10,1
Hindistan	9645	8
İtalya	3736	3,1
Fransa	3404	2,8
İngiltere	3241	2,7
Danimarka	3180	2,6
Portekiz	2862	2,4
Diğer	16686	13,8
İlk 10 ülke	104105	86,2
Genel Toplam	224896	186,2

ABD’de, rüzgar gücünün enerji üretimine yönelik kullanımına ilgi giderek artmaktadır. ABD’nin toplam elektrik üretiminin % 0,1’i rüzgar enerjisinden karşılanmaktadır. Bu değer Danimarka’nın üretiminin %10’una eşdeğerdir. Danimarka Hükümeti 2030 yılına kadar enerjisinin %50’sini rüzgardan karşılamayı

hedeflemektedir. 1994-2000 yılları arasında Avrupa'da kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi %40 oranında artmıştır. Bugün Avrupa'daki rüzgar enerjisi projeleri ile 5 milyon civarında insanın yerel gereksinimlerini karşılayacak yeterlilikte elektrik üretmektedir. Dünyadaki çoğu ülke rüzgar enerjisi ile elektrik üretimlerinin %20'sini karşılayacak şekilde planlamalar yapmaktadır.[10] Gelişen teknoloji, azalan maliyetler, teşvikler vb. etkilerden dolayı rüzgar enerjisinin çok hızlı bir şekilde gelişeceği tahmin edilmektedir.

### **2.3.5. Türkiye'de rüzgar enerjisinin kullanımı**

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de enerji ihtiyacı büyük ölçüde fosil yakıtlarından sağlanmakta olup doğalgaz ve petrol kaynakları yeterli düzeyde değildir[16]. Ülkemizde 1940'lı yıllarda sulama ve öğütme amaçlı kullanılan rüzgar milleri 60'lı yılların başında sayı olarak 749'a ulaşmış ve bunlardan 41'i elektrik üretimi için kullanılmakta olup türbin güçleri 1 kW'tan daha düşüktür. Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalarla rüzgar türbini rotor verimliliği 90'lı yılların ortalarında %48 oranında arttırılmıştır. 21. yy başında gücü 500-2500 kW arasında değişen türbinler günümüzde yerini 5000kW gücünde türbinlere bırakmıştır[5].

Ülkemizde rüzgar enerjisi ile ilgili çalışmalar 1996 yılında başlamıştır. Üç türbinden oluşan ve 1,5 MW kurulu güce sahip olan ilk santral 1998 yılında Germeian'da kurulmuş ve "Oto Prodüktör" statüde üretime başlamıştır. Alaçatı'da toplam 7,2 MW(12x600kW) kurulu güce sahip ikinci santral yine aynı yıl kurulmuştur. 2000 yılında ise Çanakkale Bozcaada'da toplam kurulu gücü 10,2 MW(17x600kW) olan diğer bir santral kurulmuştur. Toplam kurulu gücü 17,4 MW olan son iki santral "Yap-İşlet-Devret" modeliyle üretim yapmaktadır[10]. Ülkemizin rüzgar santralleri ile ilgili teknik potansiyelinin 83000MW olduğu düşünülmektedir. Bu potansiyel, rüzgar enerjisi üretimi ve kullanımının % 30 kapasite ile yapıldığı dikkate alındığında yıllık 238 milyar kWh enerji üretimine denk gelmektedir. Bu duruma göre, Türkiye'nin şu anki enerji ihtiyacı bu santrallerden karşılanabilir durumdadır. Fakat maliyet olarak düşünüldüğünde Türkiye'nin sahip olabileceği kurulu güç en az 20000 MW olup, bu güçten üreteceği enerji miktarı ise 53 milyar kWh'dir[10].

Tablo 2.3'te 2009 yılı itibariyle Türkiye'deki toplam kurulu gücü göstermektedir. Bu tabloya göre Türkiye'deki toplam kurulu güç 791,25 MW olarak hesaplanmaktadır.

**Çizelge 2.3: Türkiye’de İşletmede Olan Rüzgar Enerji Santralleri [12]**

Şirket Adı	Tesis Yeri	Lisans Tarihi	İşletmedeki Kap.(MWe)
Teperes E. Ü. A.Ş.	İstanbul-Silivri	24.09.2008	0,85
Borasco San.Tic.A.Ş.	Balıkesir	31.12.2007	45
Yapısan E. Ü. A.Ş.	Erikli/Balıkesir	05.10.2007	30
Dares RES Sanayi ve Ticaret A.Ş.	Muğla-Datça	10.05.2007	28,8
Ütopya E. Ü.Sanayi ve Ticaret A.Ş.	Bergama-İzmir	03.05.2007	15
Alize Enerji E. Ü. A.Ş.	Üvecik-Çanakkale	18.04.2007	20,8
Alize Enerji E. Ü. A.Ş.	Şarköy-Tekirdağ	18.04.2007	28,8
Bares E. Ü. A.Ş.	Kepsut-Balıkesir	18.04.2007	30
Soma Enerji Ü. San. ve Tic. A.Ş.	Soma-Manisa	04.04.2007	45
Ayen Enerji A.Ş.	-Didim-Aydın	18.01.2007	31,5
Belen E. Ü.A.Ş.	Belen Hatay	09.11.2006	18
Akenerji Elektrik Üretim A.Ş.	Balıkesir-Bandırma	09.11.2006	15
Kores Kocadağ RES Ü. A.Ş.	İzmir	15.06.2006	15
Mazı-3 RES E. Ü. A.Ş.	İzmir	15.06.2006	22,5
Alize Enerji E. Ü. A.Ş.	İzmir	16.05.2006	1,5
Mare RES San. ve Tic. A.Ş.	İzmir	20.10.2005	39,2
İnnores E. Ü. Ltd. Şti.	Aliğa-İzmir	04.06.2004	42,5
Deniz E. Ü. Ltd. Ş.	Samandağ-Hatay	04.06.2004	20
Doğal Enerji E.Ü. A.Ş.	Sayalar-Manisa	13.04.2004	34,2
Baki E. Ü. Ltd. Şti.	Merkez-Balıkesir	06.04.2004	90
Ertürk E. Ü. A.Ş.	İnceğiz-İstanbul	08.01.2004	60
Rotor E. Ü. A.Ş.	Osmaniye	19.12.2003	77,5
Deniz E. Ü. Ltd. Ş.	Çakaltepe-Manisa	05.12.2003	10,8
Anemon Enerji E. Ü. A.Ş.	İntepe-Çanakkale	24.11.2003	30,4
Lodos E. Ü. A.Ş.	Gaziosmanpaşa -İstanbul	30.10.2003	24
Doğal Enerji E. Ü. A.Ş.	Gelibolu-Çanakkale	11.09.2003	14,9

Bu tablodaki santraller dışında, Türkiye’de şu anda projesi devam eden, lisans alınmayı bekleyen santrallerde bulunmaktadır.

Türkiye’de rüzgar enerjisi santrallerinin kurulumlarının artması artık santral kurulumu için gereken verilerin hem daha kolay ulaşılabilir olması, hem de yardımcı programlar yardımıyla fizibilite çalışmalarının kısa sürede yapılması önemli derecede etkilidir.

Bu çalışmaların başında EİE tarafından 2007 yılı başlarında Türkiye Rüzgar Atlası Potansiyeli Atlası (REPA) oluşturulması gelmektedir. REPA orta ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro ölçekli rüzgar akış modeli kullanılarak üretilen rüzgar hızı kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlasıdır. REPA ile denizlerde, kıyılarda ve yüksek rakımlı bölgelerde daha önce ölçülemeyen yüksek yoğunluklu potansiyeller görünür hale gelmiştir. Şekil 2.1’de Türkiye’nin rüzgar enerjisi potansiyel atlası bulunmaktadır. Bu haritada 30m yükseklikteki bölge bölge





### 3. VERİ ANALİZİ VE YÖNTEM

#### 3.1. Yöntem

##### 3.1.1. Matematiksel yöntem

Rüzgar, dünyanın eğriliği, dönme ekseninin eğimi ve dünya yüzeyinin homojen olmayan yapısı nedeniyle, güneşten gelen enerjiyle, yeryüzeyinin eşit olmayan ısınma ve soğuması sonucu ortaya çıkan basınç farklılıkları yüzünden oluşan hava hareketleridir. Hareket eden her cisim bir kinetik enerjiye sahip olacağından, bir hava hareketi olan rüzgarın da enerjisini hesaplamak için kinetik enerji formülü kullanılabilir.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

Buradaki kinetik enerji formülünde  $m$  kütleyi,  $v$  rüzgar hızını göstermektedir.

Enerji formülündeki kütle ise;

$$m = \rho V \quad (3.2)$$

ile ifade edilmektedir. Bu eşitlikte  $\rho$  havanın yoğunluğu,  $V$  ise Hacim olarak ifade edilmektedir.

“A” rüzgarın esme yönüne dik alan ve “L” rüzgar yönündeki uzunluk olmak üzere, hacim;

$$V = AL \quad (3.3)$$

olur. Yolun, hız ve zamanın çarpımına eşit olduğu bilindiğine göre, L mesafesini rüzgar hızına ve zamana bağlı olarak aşağıdaki gibi yazabiliriz ;

$$L = vt \quad (3.4)$$

L eşitliğini (3.1) denkleminde yerine koyup, bulduğumuz eşitliği de kütle denkleminde yerine koyacak olursak;

$$V = Avt \quad (3.5)$$

$$m = \rho Avt \quad (3.6)$$

Elde edilen kütle eşitliğini kinetik enerji denkleminde yerine koyacak olursak;

$$E = \left(\frac{1}{2}\right)\rho A t v^3 \quad (3.7)$$

Böylece birim zamanda birim alandaki enerji;

$$E = \left(\frac{1}{2}\right)\rho v^3 \quad (3.8)$$

olarak ifade edilebilir. Eşitlikte kullanılan  $\rho$ , deniz seviyesinde standart atmosfer şartlarında kabul edilen yoğunluk olup değeri  $1,223 \text{ kg/m}^3$ ,  $v$  ise 10 m yükseklikte ölçülen yatay rüzgar hızıdır ve birimi  $\text{m/sn}$ 'dir. Buna bağlı olarak  $E$ 'nin birimi  $\text{watt/m}^2$  olarak bulunur.

### 3.1.2. İstatistiksel yöntem

Bir istasyona ait rüzgar hızı verisi bağıl frekanslarının temsilinde en çok Weibull dağılım fonksiyonu kullanılmaktadır [17]. İki parametrelili Weibull dağılımının olasılık yoğunluk eşitliği aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$P(v)dv = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] dv \quad (3.9)$$

Bu eşitlikte,  $p(v)$  rüzgar hızı frekansı,  $v$   $\text{m/sn}$  cinsinden rüzgar hızı,  $c$  Weibull ölçek parametresi,  $k$  ise boyutsuz Weibull şekil parametresidir.

Ölçek parametresi rüzgar hızı ortalamasıyla doğru orantılıdır. Bu nedenle bir istasyonun rüzgar karakteristiğinin belirlenmesinde ölçek parametresi çok önemlidir. Weibull dağılımının şekil parametresi ise, rüzgarın ortalaması ile doğru, standart sapmasıyla ters orantılıdır. Dolayısıyla ortalama rüzgar hızı ve standart sapmanın bilinmesi durumunda  $k$  ve  $c$  değişkenleri bulunabilir.

$$\bar{v} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3.10)$$

Burada  $\Gamma$ , genel gamma fonksiyonu,  $\bar{v}$  ise ortalama rüzgar hızıdır.

$$\left(\frac{\sigma}{v}\right)^2 = \frac{\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right)\right]}{\Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)-1} \quad (3.11)$$

Bu eşitlikte ise,  $\sigma$  standart sapma ve  $k$  şekil parametresidir. Bu denklemler kullanılarak  $k$  ve  $c$  parametreleri bulunabilir.

$$k = \left(\frac{\sigma}{v}\right)^{-1.086} \quad (3.12)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (3.13)$$

olarak bulunur.  $n=1/k$  olmak üzere, gama fonksiyonunun değeri aşağıdaki matematiksel fonksiyonla hesaplanabilir.

$$\Gamma(n+1) = n! = n^n e^{-n} \sqrt{2\pi n} \left(1 + \frac{1}{12n} + \frac{1}{288n^2} + \dots\right) \quad (3.14)$$

Burada  $\Gamma(n+1)$  için yukarıdaki denklemin ilk terimi iyi bir yaklaşımdır. Ölçek ve şekil parametresi açısından noktadan noktaya büyük değişim gösteren rüzgar hızının temsilinde Weibull dağılımı önemli bir açığı kapatmaktadır. Weibull dağılımı  $k$ 'nın değişik değerlerine göre farklı dağılımları gösterir ve  $k=2$  için Rayleigh dağılımı şeklini alır,  $k=1$  için exp dağılım özelliği ortaya koyar,  $k=3,6$  için Gauss dağılımına (normal dağılım) çok benzer bir özellik gösterir.

Değişkenlerin tahmininde rüzgar hızının ortalaması ve standart sapma değerleri önem taşımaktadır. Özellikle standart sapma temeline dayalı olarak risk ve güvenilirlik hesapları da yapılabilmektedir.

Şekil parametresi doğrudan rüzgar hızı persistansı ile ilişkilidir. Böylece  $k$ 'nın yüksek değerleri yüksek rüzgar hızı persistansına, düşük değerleri ise düşük rüzgar hızı persistansına karşılık gelir.

### 3.1.3. Lambert formülü

Rüzgar hızı persistansını bulmanın diğer bir yolu ise Lambert formülünü kullanmaktır. Rüzgar hızı persistansı, herhangi bir istasyona verilen bir zaman periyodu içerisinde ortalama rüzgar hızının sürekliliğinin bir ölçüsüdür. Bu nedenle,

rüzgarı karakterize eden en önemli faktörlerden biri persistanstır. Dolayısıyla rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplanırken persistans da göz önünde bulundurulur. Uygulamalarda persistans hesaplamalarında Lambert formülü ve Weibull şekil parametresi yanında Lag-1 otokorelasyon katsayısı da kullanılır [18].

Lambert Formülü yönteminde persistans analizi, aşağıdaki hesaplamalar yapılarak bulunmaktadır;

$$R_x = \frac{\sum W - \sum E + \sum (NW + SW - SE - NE) \sin 2\alpha + \sum (SSW + NNW - SSE - NNE) \sin \alpha}{n} + \frac{\sum (WNW + WSW - ENE - ESE) \sin 3\alpha}{n} \quad (3.15)$$

$$R_y = \frac{\sum S - \sum N + \sum (WSW + ESE - WNW - ENE) \sin 2\alpha}{n} + \frac{\sum (SE + SW - NW - NE) \sin \alpha + \sum (SSE + SSW - NNE - NNW) \sin 3\alpha}{n} \quad (3.16)$$

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (3.17)$$

Bu denklemlerde,  $R_x$ : Bileşke rüzgarın doğu-batı doğrultusundaki bileşenlerinin ortalamasıdır.  $R_y$  ise bileşke rüzgarın kuzey-güney doğrultusundaki bileşenlerinin ortalaması. Bu iki bileşke rüzgarın kareleri toplamının karekökü ise bileşke rüzgar olan  $R$ 'yi verir. Bu eşitliklerde  $n$  ise sakinlerle birlikte rüzgarın toplam gözlem sayısıdır.

Bu hesaplamalardan yola çıkarak, rüzgar hızı ortalaması  $\bar{v}$  olarak kabul edilirse, buradan persistans ;

$$P = \frac{R}{\bar{v}} \quad (3.18)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Analiz için rüzgar hızı verileri 16 yöne göre verildiği için, hesaplamalarda iki yön arasındaki açı  $\alpha = 22.5$  olarak alınmıştır.

## 4. WAsP MODELİ

### 4.1. Rüzgar Atlas Analizi ve Program Uygulaması

Rüzgar enerjisi potansiyellerinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunların en önemlilerinden biranesi WAsP programıdır. Bu program Danimarka'da Riso Ulusal Laboratuvarının rüzgar enerjisi bölümünde hazırlanmış ve geliştirilmiştir. Rüzgar elektrik santrallerinden, rüzgar türbinlerinden enerji üretimi ve rüzgar iklimi tahmini için kullanılan bir bilgisayar programıdır. Ayrıca rüzgar türbinlerinden verimli sonuçlar alabilmek için bu türbinlerin kurulması gereken yerlerin belirlenmesinde yararlanılan bir programdır. Aynı zamanda, WAsP farklı pürüzlülük şartlarının etkilerini, yakın bina ve diğer engeller sebebiyle perdeleme etkilerini ve topografik şartlara bağlı olarak zorlanan rüzgarın değişimini temel alır. Böylece rüzgar türbinlerinin yerleşimini ayrıntılarıyla ortaya koymak için temel meteorolojik datayı düzelterek kullanımını sağlar. Rüzgar atlasıyla herhangi bir lokal yer ve yükseklikte temel yüzey istatistikleri gösterilir. Ayrıca rüzgar enerji uygulamalarına göre ortalama rüzgar istatistiklerinin ekstrapolasyonu, rüzgar enerji değerlendirmesine ilişkin istatistiksel ve mikrometeorolojik tekniklerle incelenmektedir. Bu işlemler rüzgar türbinlerinin yer seçimi için doğru bilgiye sahip olmamızı sağlar ve rüzgar enerjisi uygulamaları konusunda rüzgar iklim tahmini yapılmasını sağlar[19].

WAsP'in amaçları, ham datanın analizi, rüzgar atlasının oluşturulması, rüzgar iklim değerlendirilmesi ve rüzgar güç potansiyelinin tahminidir. Ham verinin analizi; histogram içerisindeki ham datayı toplayarak rüzgar ölçümlerinin bir zaman serisi şeklinde analizine olanak verir. Aynı zamanda Weibull parametreleri de bu veriden hesaplanır. Rüzgar atlas datasının oluşturulması için rüzgar hız histogramları, rüzgar atlas dizisine dönüştürülebilir. Rüzgar iklim değerlendirilmesi yapılırken; WAsP tarafından hesaplanan bir rüzgar atlası data dizisi veya başka bir kaynaktan sağlanan data dizisi kullanarak, herhangi bir lokal noktada rüzgar iklimi değerlendirilebilir. Rüzgar güç potansiyelinin tahmininde ise ortalama rüzgarın toplam enerji içeriği WAsP ile hesaplanır. Ayrıca bir rüzgar türbininin yıllık ortalama güç üretiminin

gerçek bir değerlendirmesi, söz konusu türbinin güç eğrisi ile WASP'ı kullanarak elde edilebilir[19].

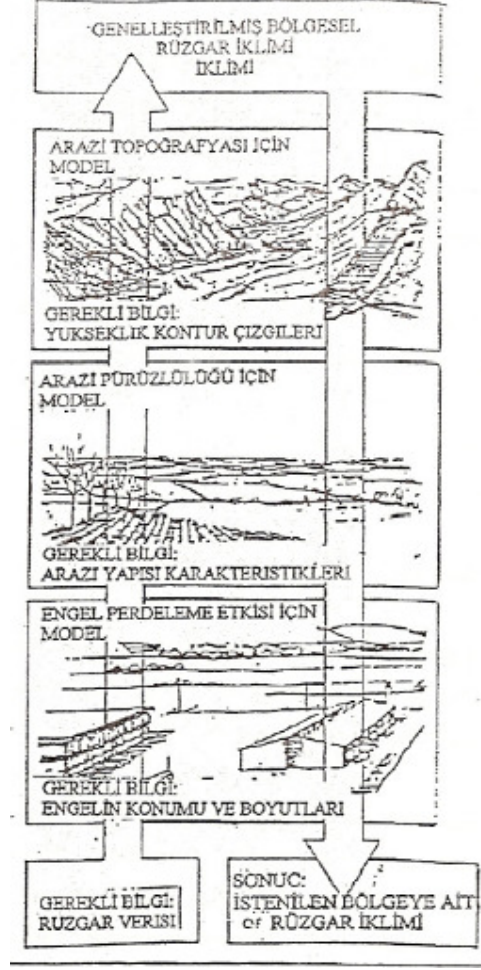
WASP, veri analizlerini yaparken rüzgar hız verilerinin iki parametrelili Weibull dağılımına uygun dağılım gösterdiğini varsayar. Ayrıca dört farklı girdi bilgisini değerlendirerek lokal rüzgar atlası istatistiklerini hesaplar (Şekil 4.1).

Bu temel dört girdi bilgisi aşağıdaki gibidir:

- ◆ Saatlik rüzgar verisi,
- ◆ Lokal pürüzlülük bilgileri,
- ◆ Perdeleme etkisi,
- ◆ Bölgenin topografyası.

WASP, yukarıdaki girdi bilgilerini değerlendirmek için dört tane alt model kullanır:

- ◆ Pürüzlülük değişim modeli,
- ◆ Engel perdeleme modeli,
- ◆ Topografik model.



Şekil 4.1: Rüzgar Atlas Modeli

#### 4.2. Pürüzlülük Değişim Etkisi

Pürüzlülük, rüzgar hızı profili üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu nedenle rüzgar enerjisi incelemelerinde alan pürüzlülüğü önemli bir parametredir. Bir bölgenin yüzey pürüzlülüğü, bu alan üzerindeki pürüzlülük elemanlarının boyutları ve alan içindeki dağılımına bağlıdır. Kara yüzeyleri için pürüzlülük elemanları olarak bitki örtüsü, yapılaşma alanları ve toprak yüzeylerini örnek verebiliriz. Rüzgar atlas uygulamalarında, farklı alanlar üzerindeki pürüzlülük elemanları tarafından karakterize edilen dört farklı tipe ayrılır. Her bir arazi tipi pürüzlülük sınıfı olarak tanımlanır[20].

Pürüzlülük sınıfları aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

- 1) Pürüzlülük sınıfı 0 olan araziler ( $z_0=0.0002m$ ): Su alanları, deniz ve göller (Şekil 4.2).
- 2) Pürüzlülük sınıfı 1 olan araziler ( $z_0=0.03m$ ): Açık, düz alanlar ve hafif eğimli arazi, ağaç ve çalılık gibi basit şekilleri de kapsar (Şekil 4.3).
- 3) Pürüzlülük sınıfı 2 olan araziler ( $z_0=0.10m$ ): Birbirinden yaklaşık 1000 m`den fazla uzakta rüzgar kırıcılara ve dağınık binalardan oluşan arazi (Şekil 4.4).
- 4) Pürüzlülük sınıfı 3 olan arazi ( $z_0=0.40m$ ): Ormanlık ve yerleşim alanları (Şekil 4.5)[20].

$z_0$  pürüzlülük uzunluğu olmak üzere pürüzlülük sınıflarının özelliklerini gösteren şekiller aşağıda gösterilmektedir:

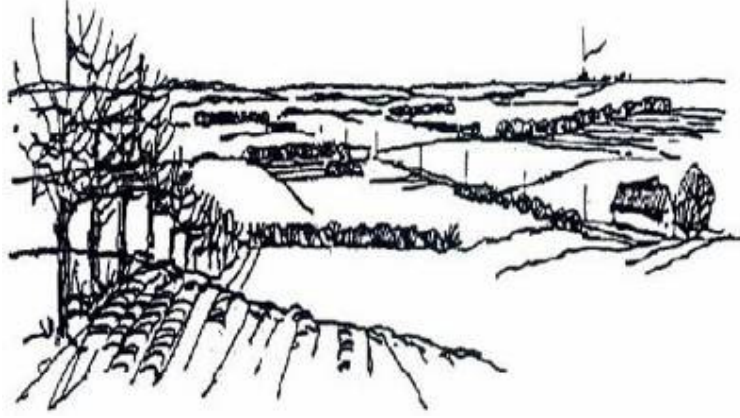


**Şekil 4.2:** Pürüzlülük sınıfı 0 olan arazi



**Şekil 4.3:** Pürüzlülük sınıfı 1 olan arazi





Şekil 4.4: Pürüzlülük sınıfı 2 olan arazi



Şekil 4.5: Pürüzlülük sınıfı 3 olan arazi

### 4.3. Pürüzlülük Uzunluğu

Bir arazini pürüzlülük uzunluğu  $z_0$  parametresi ile tanımlanır. Pürüzlülük elemanları ile pürüzlülük uzunluğu arasındaki ilişki, ilk defa Letau tarafından 1969 yılında ortaya çıkarılmıştır. Bu bağıntı aşağıdaki şekildedir:

$$z_0 = 0,5 \frac{h * S}{A_h} \quad (4.1)$$

Bu denklemdaki  $z_0$  pürüzlülük uzunluğu parametresi,  $h$  pürüzlülük elemanının yüksekliği,  $S$  rüzgara karşı gelen dikey kesit alanı,  $A_h$  ise arazi üzerindeki ortalama kesit alanıdır.

Bu matematiksel eşitlikte ortalama yatay kesit alanının, rüzgara karşı gelen dikey kesit alanından çok daha büyük olduğu durumlarda, daha gerçek pürüzlülük uzunluğu değerleri elde edilebilir (Şekil 4.6)[21].

Z <sub>0</sub> (m)	Yüzey Yapısı Karakteristikleri	Pürüzlülük Sınıfı
1.00		
0.50	Büyük şehirlerin varoşları, taşra kentleri	3
0.30	Siper kuşakları, orman, küçük binalı şehir	
0.20	Birçok ağaç ve/veya çalılar, tek ya da iki katlı seyrek binalar	2
0.10	Kapalı görünümlü çiftlik arazisi, seyrek ağaçlık	
0.05	Açık görünümlü çiftlik arazisi, seyrek ağaçlık	1
0.03	Çok seyrek bina ve ağaçlı çiftlik arazisi	
	Havaalanları (binaları ve ağaçları ile birlikte)	
0.01	Havaalanı pistleri	0
	Biçilmiş çim	
0.005	Pürüzsüz çıplak toprak	
0.001	Pürüzsüz kar yüzeyleri	
0.0003	Pürüzsüz kum yüzeyleri	0
0.0001	Su yüzeyleri (göller, fiyortlar, denizler)	

**Şekil 4.6:** Pürüzlülük uzunluğu ve yüzey yapısı özelliklerine göre pürüzlülük sınıfları

#### 4.4. Pürüzlülük Katsayısı

Yukarıda gösterilen pürüzlülük sınıflarına göre, belirli bir yükseklikte ölçülmüş rüzgar hızı kullanılarak, farklı yüksekliklerdeki hızları hesaplamak mümkündür. Bu işlem için kullanılacak eşitlik:

$$\frac{U}{U_{ref}} = \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^{k_1} \quad (4.2)$$

$k_1$  en genel halde 1/7 alınabilir. Fakat daha doğru belirlemek için başka yollarda kullanılabilir[21]. Bunlar;

- a) Pürüzlülük uzunluğu cinsinden
- b) Hız ve yükseklik cinsinden
- c) Pürüzlülük uzunluğu ve hız cinsindedir.

#### 4.4.1. Pürüzlülük uzunluğu cinsinden pürüzlülük katsayısının bulunması

Pürüzlülük katsayısı

$$k_1 = 0.096 \log_{10} z_0 + 0.016 (\log_{10} z_0)^2 + 0.24 \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilir.

#### 4.4.2. Hız ve yükseklik cinsinden pürüzlülük katsayısının bulunması

Pürüzlülük katsayısı

$$k_1 = \frac{0.37 - 0.088 \ln(U_{ref})}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{z_{ref}}{10}\right)} \quad (4.4)$$

olarak ifade edilir.

#### 4.4.3. Pürüzlülük uzunluğu ve hız cinsinden pürüzlülük katsayısının bulunması

Pürüzlülük katsayısı için NASA tarafından önerilen bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$k_1 = k_0 \left[ 1 - 0.55 \log(U_{ref}) \right] \quad (4.5)$$

#### 4.5. Engel Perdeleme Etkisi

Arazi üzerindeki bir engelden dolayı, rüzgar hızında ortaya çıkan azalmaya perdeleme denilmektedir. Engelin perdeleme etkisi aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- a) Hesaplama noktasının engelden olan uzaklığı (x)
- b) Engelin yüksekliği (h)

- c) Hesaplama noktasının yüksekliği (H)
- d) Engelin uzunluğu (L)
- e) Engelin geçirgenliği (p)

Perdeleme etkisinden dolayı, geçirgenliği sıfır olan bir engelin rüzgar hızında ortaya çıkan azalma Şekil 4.7 de görülmektedir. Engelin geçirgenliğindeki artış ve engel uzunluğunun azalması perdeleme etkisini azaltır. Perdeleme etkisinde engel geometrisinin de önemi vardır. Bunu, engellerin doruk noktalarında rüzgar hızındaki artıştan anlayabiliriz.

Genellikle, binalar için geçirgenlik “0”, ağaçlar için “0.5” alınmaktadır. İki bina arasındaki uzaklık, binaların birinin yüksekliğinin üçte birine eşitse, geçirgenlik “0.33” olarak alınabilir. Ayrıca, geçirgenlik ağaçların yoğunluklarına göre de değişebilmektedir. Rüzgar kırıncılarının engel türüne göre geçirgenlikleri Tablo 4.1`de gösterilmektedir [20].

**Çizelge 4.1:** Rüzgar kırıncılarının türüne göre geçirgenlik değerleri

Engel Türü	Geçirgenlik,p
Katı (Duvar)	0
Çok Yoğun	≤0,35
Yoğun	0,35-0,50
Açık	≥0,50

Perdeleme etkisi ile ortalama rüzgar hızındaki azalma ( $R_2$ ) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır [24].

$$R_2 = \begin{cases} \left(1 + 0.2 \frac{x}{L}\right)^{-1} & \text{for } \frac{L}{x} \geq 0.3 \\ 2 \frac{L}{x} & \text{for } \frac{L}{x} \leq 0.3 \end{cases} \quad (4.6)$$

$$u_{cor} = u(1 - R_2 R_1 (1 - P)) \quad (4.7)$$

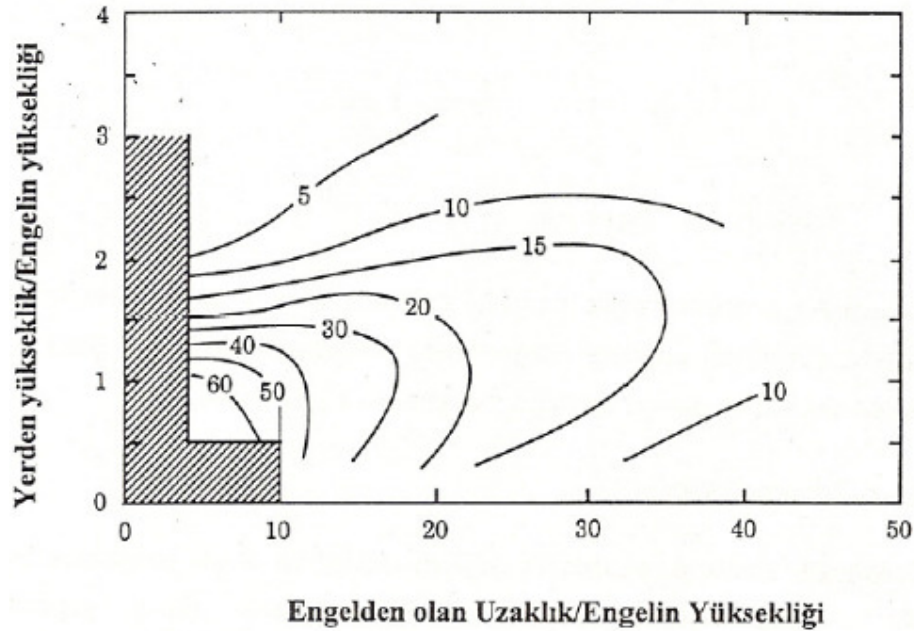
Bu eşitlikte,  $R_1$  Şekil 4.7'den elde edilen oransal rüzgar hızındaki azalma  $\left(R_1 = \frac{\Delta u}{u}\right)$ ,

$R_2$ , ortalama rüzgar hızındaki azalma,  $u$ , ortalama rüzgar hızı,  $u_{cor}$ , düzeltilmiş ortalama rüzgar hızı olarak gösterilmektedir.

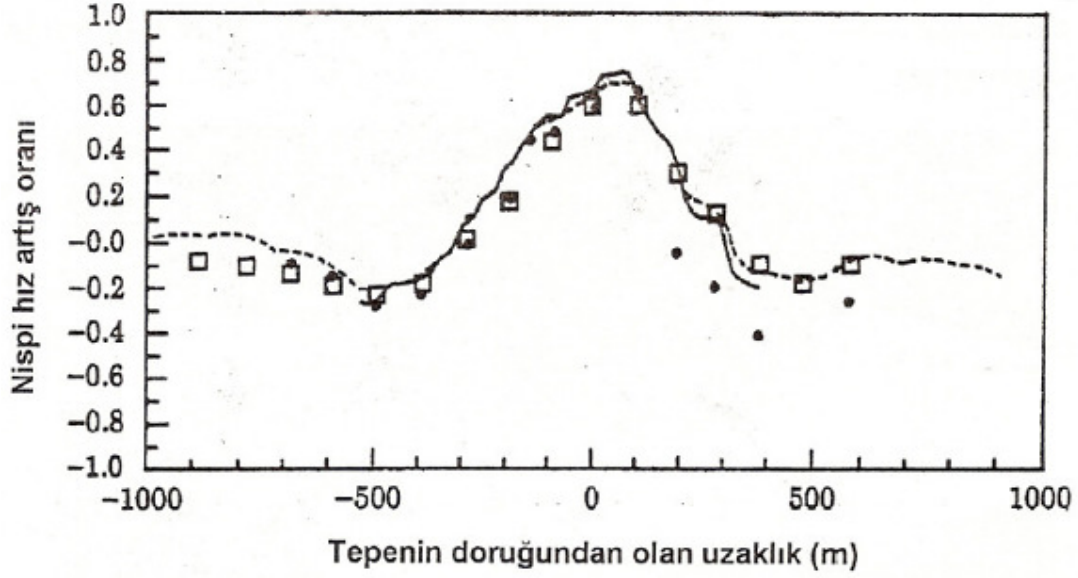
#### 4.6. Topografik Etki

Topografik modelin temel yapısını, rüzgar profili üzerinde arazideki yükseklik değişimlerinin etkisi oluşturmaktadır. Tepelerin akış üstünde ne kadar önemli bir etkisi olduğunu anlamak üzere Hebrides South Uist adası üzerindeki Askervein tepesinde uluslararası saha denemeleri yapılmıştır. Deney verileri, yamaçtan zirveye belli mesafelerde belirlenen noktalarda yerden 10m yükseklikteki bağıl hız artışı  $\Delta S$  ile, Şekil 4.8 de gösterilmektedir.

Yamaçtaki yukarıya doğru akım profili yükseklikle logaritmiktir, buna karşılık tepenin zirvesinde profil, bağıl hızının maksimum olduğu  $l$  yüksekliğinde bir kavis oluşturur. Profil bu seviyenin üzerinde yükseklikle sabittir.  $2L$  yüksekliğinde ise her iki profilde yükseklikle hız değişimi eşit olur. Burada,  $L$  tepenin karakteristik yüksekliğidir (Şekil 4.9).



Şekil 4.7: Bir engelin perdeleme etkisi



**Şekil 4.8:** Tepenin zirvesinden olan uzaklığa göre nispi hız artış oranları

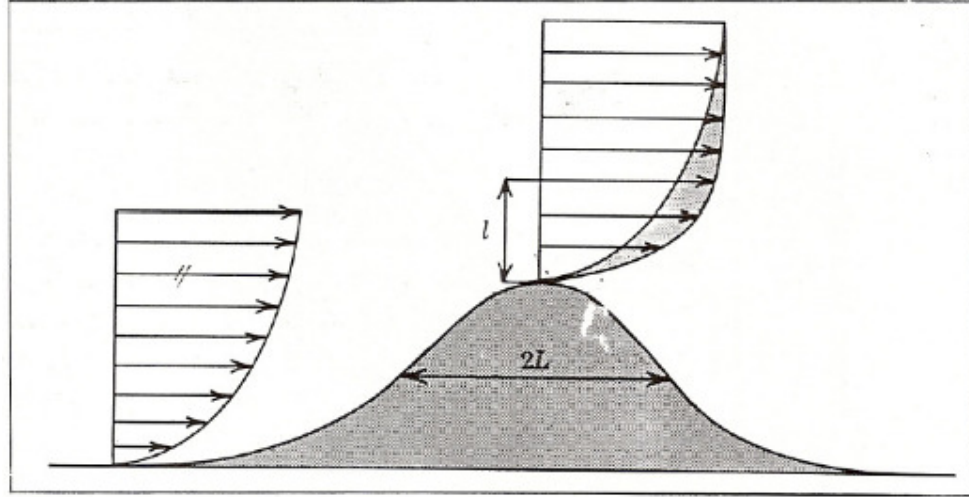
$\Delta S$  ve  $l$ , aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$\Delta S \cong \frac{h}{L} \quad (4.8)$$

$$l \cong 0.3z_0 \left( \frac{L}{z_0} \right)^{0.67} \quad (4.9)$$

Deneyden alınan sonuçlara göre;

- ◆ Yamaçtan tepeye doğru esen bozulmamış ortalama rüzgar hızı ile karşılaştırıldığında zirvedeki hız artışı %80 dir.
- ◆ Tepenin rüzgar alan ve almayan yamaçlarındaki aşağı doğru rüzgar hızı yukarı doğru bozulmamış ortalama rüzgar hızı ile karşılaştırıldığında rüzgar hızı düşüşleri %20 ve %40 tır [20].



Şekil 4.9: Yamaçta ve tepenin zirvesinde akım profili

#### 4.7. Rüzgar Atlasının Oluşturulması İçin Kullanılan Fiziksel ve İstatistiksel Modeller

##### 4.7.1. Yüze tabaka benzerlik yasası

Atmosferin yeryüzeyine en yakın olan tabakası “Atmosferik Sınır Tabaka” olarak adlandırılır. Bu tabakanın yüksekliği atmosferik şartlara bağlı olarak değişir. Açık yaz günlerinde atmosferik sınır tabaka 2 km yükseklikte olabilirken, rüzgarsız gece şartlarında 100m`ye kadar inebilir. Sınır tabakanın derinliğinin %10`luk en aşağıda kalan kısmına ise yüze tabaka denir. Düzgün ve hemen hemen homojen bir arazide, yüksek rüzgar hızlarında rüzgar profilini belirlemek için logaritmik yasa kullanılır.

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (4.10)$$

Bu bağıntıda,  $u(z)$  ortalama yer seviyesinden  $z$  kadar yukarıdaki rüzgar hızı,  $z_0$ , yüze pürüzlülük uzunluğu,  $k$ , Von Karman sabiti (  $k= 0.40$  ),  $u_*$  ise sürtünme hızıdır.

Sürtünme hızı yüze gerilmesine bağlıdır ve aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$|\tau| = \rho u_*^2 \quad (4.11)$$

Burada,  $\tau$ , yüze gerilmesi,  $\rho$ , havanın yoğunluğudur.

Z yüksekliğinin 30-40 km 'yi aşması durumunda, logaritmik profilden sapma olabilir. Bu durumda yüzey pürüzlülüğü yüzey karakteristiklerinde olduğu gibi yüzey ısı akısının da fonksiyonu olur. Gece boyunca yeryüzeyinin soğuması nedeniyle, rüzgar profili yükseklikle hızlı bir şekilde artar. Gündüz koşullarında ise, ısınan yeryüzeyi türbülansı artırır ve rüzgar profili yükseklikle yaklaşık olarak sabit olur. Benzerlik teorisine göre logaritmik hız profili daha genel olarak;

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) - \psi \left( \frac{z}{L} \right) \right] \quad (4.12)$$

şeklinde gösterilir[25, 26]. Buradaki L, Monin-Obukhov uzunluğudur ve aşağıdaki şekilde tanımlanır,

$$L = \frac{T_0 C_p u_*^3}{kgH_0} \quad (4.13)$$

Bu eşitlikte ise,  $T_0$ , mutlak yüzey sıcaklığı,  $H_0$ , yüzeydeki ısı akısını,  $C_p$ , sabit basınçta özgül ısıyı,  $g$  ise yer çekimi ivmesidir.

#### 4.7.2. Kararlılık modeli

Rüzgar enerjisi ile ilgili hesaplamalarda, logaritmik rüzgar profilinde kararlılık modifikasyonları genellikle ihmal edilir. Model, basit bir nötr tabakalaşma durumu için küçük pertürbasyonlarla ilgili kararlılık değişimlerini kapsamaktadır. Yüzey ısı akılarının klimatolojik ortalamasının karekökünün bilinmesi gerekir. Modeli kısaca jeostrofik rüzgar ifadesinin ve nötr koşullardaki yüzey ısı akısının bir mertebe genişletilmesine bağlı olarak ifade ederiz.

$$dG = 0 = \frac{du_*}{u_*} G - \frac{u_*^2}{k^2 G} \left[ \left( \ln \frac{u_*}{fz_0} - A(\mu) \right) \left( \frac{du_*}{u_*} - \frac{dA}{d\mu} d\mu \right) + B \frac{dB}{d\mu} d\mu \right] \quad (4.14)$$

(4.12), (4.13) eşitlikleri ve nötr koşullar gözönüne alınırsa,  $A(0) \cong 1,8$ ,  $B(0) \cong 4,5$  için

$$\frac{dA}{d\mu} \cong -0,2 \text{ ve } \frac{dB}{d\mu} \cong 0,2 \text{ olur.}$$

Küçük terimler ihmal edilirse,

$$\frac{du_*}{u_*} = \left[ \frac{Cg}{fT_0 C_p \rho G^2} \right] dH \quad (4.15)$$



bağıntısı elde edilir.

$C=sbt(\cong 2,5)$ , bu eşitlikte yüzey ısı akısı  $dH$ 'ın klimatolojik akısını alarak,  $u_*$ 'in nötr değerini değerlendirmek için kullanılır.

(4.12) eşitliğinde verilen rüzgar profilinin türevidi;

$$du(z) = \frac{du_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{z}{L}\right) \right] - \frac{u_*}{k} \frac{d\psi}{dL} \frac{dL}{dH} dH \quad (4.16)$$

şeklinde gösterilir.

Nötr koşullar için, yerden yüzey akısı etkisinin ihmal edilebildiği  $z_m$  kadar yükseklikteki ifade,

$$\frac{z_m}{\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right)} = \left(\frac{c}{ak}\right) \frac{u_*^3}{fG^2} \quad (4.17)$$

şeklinde yazılır. Rüzgar hızı varyansı minimum ( $dU(z_m)=0$ ) alınmaktadır. Eğim,  $a$  ile gösterilir ve atmosferin kararlı veya kararsız oluşuna göre ( $4 \leq a \leq 5$ ) arasında değer alabilir. Nötr durumda basitleştirilmiş sürtünme yasası[27],

$$\frac{u_{*0}}{G} = \frac{0.5}{\ln(R_0) - A(0)} \quad (4.18)$$

(4.17) ifadesi daha iyi bir gösterimle,

$$\frac{z_m}{\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right)} \cong \text{sabit} R_0 (\ln(R_0) - A(0))^{-3} \quad (4.19)$$

şeklinde de ifade edilebilir. Burada  $\text{sabit} = 0.1$  alınmaktadır. Rossby sayısı,

$$R_o = \frac{G}{fz_0} \quad (4.20)$$

eşitliği ile yazılır. Sonuç olarak bu ifade güç yasasına yaklaştırılabilir.

$$\frac{z_m}{z_0} \cong \alpha R_o^\beta \quad (4.21)$$

Bu bağıntıdaki sabitlerden,  $\alpha = 2,0 \times 10^{-3}$  ve  $\beta = 0,9$  dur.

(4.19) eşitliğinde verilen  $z_m$  minimum değişim yüksekliğidir ve geniş alanlarda sabit kabul edilir. (4.16) eşitliğindeki  $\psi(z/L)$  ise aşağıda tanımlanmaktadır.

$$\psi\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{bmatrix} \left(1 - 16\frac{z}{L}\right)^{1/4} - 1 \\ -4.7\frac{z}{L} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Ortalama rüzgar hızı ve standart sapmasının düşey değişimi;

$$\sigma u(z) = \sigma_{u_0}(z) \left[ 1 + \frac{\Delta u_{*off}}{u_{*0}} |f(z)| \right] \quad (4.23)$$

$$u(z) = u_0 \left[ 1 + \frac{\Delta u(z_m)}{u_0(z_m)} (1 - f(z)) + \frac{\Delta u_{*off}}{\Delta u_0} \right] \quad (4.24)$$

Burada,  $\Delta u_{*off}$ , ortalama türbülanslı gizli ısı akısına karşılık gelen sürtünme hızını,  $u_{*0}$ , deniz seviyesindeki sürtünme hızıdır.  $f(z)$  fonksiyonu ise aşağıdaki eşitlik 4.25'te ifade edilir.

$$f(z) = 1 - \frac{z}{z_m} \frac{\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (4.25)$$

Karalar üzerindeki rüzgar tahmini için deniz meteoroloji istasyonlarında ölçülmüş meteorolojik veriler kullanılabilir. Bu durumda kara ve deniz üzerindeki ısı akısı parametreleri değerlendirilir. Yukarı akış yönünde sahile olan uzaklık ( $x$ ) ve kara-deniz üzerindeki kararlılık düzetmelri ile ilgili  $w$  ağırlık faktörü için,

$$w = \frac{\min(x, c)}{c} \quad (4.26)$$

yazılabilir. Burada  $c$ , kıyı şeridinin genişliğidir.

### 4.7.3. Pürüzlülük değişim modeli

Logaritmik rüzgar profili sadece arazinin homojen olduğu koşulda geçerlidir. Basınç gradyan kuvvetinin sürtünme kuvvetine eşit olduğu seviyeye kadar, ortalama yüzey gerilmeleri ve yüzey rüzgar hızı yüzey şartlarına göre değişir. Bu seviye,  $G/f$  (Rossby yarıçapı) ile orantılıdır ve mertebesi 10-100 km civarındadır. Rüzgar frekansı dağılımında yüzey koşulları 10 km'nin yukarısında ihmal edilebilir. İki farklı yüzeye ait pürüzlülük uzunluğu değerleri için, sınır tabaka yükseklik değerindeki artış için aşağıdaki eşitlik yazılabilir;

$$\frac{h}{z_0} \left( \ln \frac{h}{z_0} - 1 \right) = \text{sabit} \frac{x}{z_0} \quad (4.27)$$

$$z_0' = \max(z_{01}, z_{02}) \quad (4.28)$$

Rüzgar profili  $h$  seviyesinin altında bozulur, sabit değer ise 0,9'dur. Eğer  $h$  yüksekliğinde nötr rüzgar profili kabulünü yaparsak, yüzey sürtünme hızındaki değişim ampirik olarak modellenilebilir, bu da aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$\frac{u_{*2}}{u_{*1}} = \frac{\ln \left( \frac{h}{z_{01}} \right)}{\ln \left( \frac{h}{z_{02}} \right)} \quad (4.29)$$

Bu eşitlikte  $u_{*2}$ , gözönüne alınan noktadaki sürtünme hızı,  $u_{*1}$ , yüzey sürtünme hızıdır.

Sınır tabakada pertürbasyona uğrayan rüzgar profili ve yüzey sürtünme hızı, logaritmik profili ve rüzgar gözlemleriyle hesaplanamaz. Bozulmaya uğrayan profil için,

$$u(z) = \begin{cases} u' \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(c_1 h/z_{01})} & z \geq c_1 h \\ u'' + (u' - u'') \frac{\ln(z/c_2 h)}{\ln(c_1/c_2)} & c_2 h \leq z \leq c_1 h \text{ için} \\ u'' \frac{\ln(z/z_{02})}{\ln(c_2 h/z_{02})} & z \leq c_2 h \end{cases} \quad (4.30)$$

Burada,

$$u' = \left( \frac{u_{*1}}{K} \right) \ln \left( \frac{c_1 h}{z_{01}} \right) \quad (4.31)$$

ve  $c_1=0.3$ ,  $c_2=0.09$  alınmaktadır. Böylece (4.31) yardımıyla, yüzey sürtüme hızı  $u_{*2}$ , ölçülen rüzgar hızına karşı gelen yüzey pürüzlülüğündeki değişim ile ilgilidir.

$$u' = \left( \frac{u_{*2}}{K} \right) \ln \left( \frac{c_2 h}{z_{02}} \right) \quad (4.32)$$

Daha çok pürüzlülük değişimi için ardışık olarak (4.31) eşitliği kullanılabilir, fakat ardışık pürürlülük değişimi birbirine yakın olmamalıdır. Bunun için  $x_n$  ve  $2x_n$  arasındaki azimut sektör için ortalama alan hesabı yapılır[21]. D denge mesafesi ve pürüzlülük değişimi  $W_n$  arasında aşağıdaki bağıntı kullanılır.

$$W_n = \exp \left( - \frac{x_n}{D} \right) \quad (4.33)$$

#### 4.7.4. Perdeleme (shelter) modeli

Rüzgar profili, engelle yakın mesafelerde özellikle de engelin rüzgaraltı akış kısmında bozuluma uğrar. Bunun için engel etkisi yaratan bu nesnelere ayrı ayrı incelenmesi gerekir. Genellikle engellerin rüzgar üstü kısmında iki nesne yüksekliği, rüzgar altı bölgesinde ise beş nesne yüksekliği kadar bir uzaklık bulunmalıdır. Meteoroloji istasyonları civardaki engellerden etkilendiği için, bu model engelin datada meydana getirdiği hatayı düzeltir. Basit iki boyutlu nesnelere için yapılan rüzgar tüneli incelemeleri sonucu aşağıdaki eşitlikler bulunmuştur.[24]

$$\frac{\Delta u}{u} = 9.8 \left( \frac{z_a}{h} \right)^{0.14} \frac{x}{h} (1-P) \eta \exp(-0.67 \eta^{1.5}) \quad (4.34)$$

Bu bağıntıda, P, açık alan/ toplam alanı, h, engelin yüksekliğini,  $z_a$ , anemometre yüksekliğini, x Rüzgaraltı bölgesi mesafesini,  $\eta$  ise aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\eta = \frac{z_a}{h} \left( \frac{0.32}{\ln(h/z_0)} \frac{x}{h} \right)^{-0.47} \quad (4.35)$$

Birden fazla nesne varsa,  $30^\circ$  lik açılarla oluşturulan sektörlerle değerlendirilir.

#### 4.7.5. Orografik model

Bu modelde, ölçülen rüzgar datası üzerinde topografik yapının neden olduğu lokal etkilerin hatası düzeltilir[22]. Bu etkilerin giderilmesi için 20-30 km`lik yatay ölçek gözönüne alınır. İlk olarak, arazinin topografyasının sebep olduğu potansiyel akım bozulmaları hesaplanır. Hız pertürbasyonu;

$$\bar{u} = \Delta X \quad (4.36)$$

dir.

Burada  $X$  , potansiyel;  $\bar{u}$  , üç boyutlu hız bozunum vektörüdür, ( $\bar{u}=(u,v,w)$ ). Verilen bir R yarıçapı için, kutupsal koordinatlardaki potansiyel akış için;

$$X_j = K_{nj} J_n \left( C_j^n \frac{r}{R} \right) \exp(\ln \Phi) \exp \left( -C_j^n \frac{z}{R} \right) \quad (4.37)$$

eşitliği yazılır. Burada,  $K_{nj}$  , rastgele katsayılar,  $J_n$  , n. Mertebe bessel fonksiyonu, r , yarıçap,  $\Phi$  azimut, z yükseklik,  $C_j^n = J_n$  `nin i. sıfırındır.

Özel problemler için yüzey kinematik sınır koşullarından katsayılar hesaplanır. Araziden etkilenen düşey hız ( $w_0$ ),

$$w_0 = \frac{\partial}{\partial z} X \Big|_{z=0} = \bar{u}_0 \nabla h(r, \Phi) \quad (4.38)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\bar{u}_0$  hız vektörü, h ise arazinin rakımıdır.

$$J_n \left( C_j^n \frac{r}{R} \right) \quad (4.39)$$

Fonksiyonları Fourier-Bessel serileri şeklindedir.  $K_{nj}$  katsayıları bağımsız olarak saptanabilir. Model, topografik harita üzerinde, kontur hatlarında gri verilerini oluşturur. Modelin hassasiyeti ise konturların yoğunluğuna bağlıdır.



## 5. DENİZLİ İLİNİN TAVAS İLÇESİNE AİT RÜZGAR VERİLERİNİN WASP MODELİ İLE ANALİZİNİN YAPILMASI

### 5.1. Çalışmada Seçilen Tavas İlçesinin Coğrafi Durumu

Denizli'nin güney batısına düşen Tavas, denizden yüksekliği 950 m. olan bir ilçedir. 1691 km. kare yüzölçümündedir. 1985 nüfus sayımına göre ilçe merkezinin 11200, ilçenin 58400 nüfusu vardır. Tavas'ı doğudan Acıpayam, batıdan Aydın - Karacasu, güneyden Kale, kuzeybatıdan Babadağ ilçeleri ile, kuzeyden Denizli ili çevrelemektedir. Tavas ilçesi yüzey şekilleri bakımından etrafı dağlarla çevrili düz bir ova görünümündedir. Kuzeyde Babadağ, Güneyde Bozdağ, Doğuda (Kızılhisar)Serinhisar dağları ile çevrilmiştir. Esasında Tavas ovası 950 metre rakımlı bir yayladır. Tavas ovası mezoik kalkerden olup ikinci zaman oluşumu karakterindedir. Tavas ilçesinin iklim durumu doğal olarak bitki örtüsüne ve ürünlerine etki eder. İlçede yazları sıcak ve kurak, kışları ılık ve soğuk geçer. İlçede çeşitli iklimler gözlenmesi nedeniyle yer yer dağlık alanlar ve doğal su kaynaklarına da rastlanmaktadır [28,29]. Şekil 5.1'de Tavas ilçesinin google earth'ten alınmış uydu görüntüsü gösterilmektedir. Yapılan çalışmada bu topografik engeller gözönünde bulundurulmuştur.



Şekil 5.1: Tavas ilçesinin uydudan görünümü

## 5.2. Tavas İlçesine Ait Verilerin Analizi ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

### 5.2.1. Rüzgar ölçüm verilerinin analizi

Rüzgar enerji gözlem istasyonlarından belli bir yükseklikten alınan en az bir yıllık rüzgar hızı ve rüzgar yönü ölçüm kayıtlarının bilgisayar ortamında düzenlenmiş hali ve bu istasyonlara ait 1/25 000 ölçekli harita üzerindeki UTM ile (derece - dakika cinsinden) belirlenmiş koordinatları, WAsP ortamına aktarılıp değerlendirilir. Çalışmaların, sadece 1/25000 ölçekli haritaya göre yapılmaması gerekir. Haritanın yanında araziye gidilip proje için uygun yer olarak seçilen arazinin keşfi yapılmalı ve çevresindeki pürüzlülük ve engel bilgileri de güncel olarak gözlenmelidir. WAsP'a girilen bilgiler ile ilk etapta ölçüm yüksekliğine ait frekans dağılım tablosu elde edilir. Bu tablo yardımıyla ölçüm yüksekliğindeki rüzgarın sektörlere (yönlere) göre esme sıklığı, hakim rüzgar yönü, ortalama rüzgar hızı, istatistiksel değerler belirlenmiş olur. Frekans dağılım tablosundaki bilgiler kullanılarak frekans histogramı ( rüzgar hızları - esme sıklıkları ) ve yön histogramı (rüzgar esme yönü - esme sıklığı ) da elde edilebilir. Frekans histogramı yardımıyla hangi rüzgar hızı değerlerinin sık gözleendiği, yön histogramı yardımıyla ise hangi yönlerde rüzgar hız değerlerinin yüksek olduğu tespit edilebilir. Rüzgar türbinleri seçilirken frekans histogramından, araziye konumlandırılırken ise yön histogramından yararlanılmaktadır [30].

Bu çalışmada, Tavas ilçesinin Aralık 2004 ile Aralık 2005 arasındaki aylara ait EİE'den 10m ve 30m yüksekliklerine ait 10 dk, 30dk ve 60 dk'lık rüzgar hızı ve rüzgar yönleri kullanılmıştır. Bu bilgilerin yanı sıra 1/25000 ölçekli dijitalleştirilmiş ve yükseklikleri tanımlanmış .map uzantılı harita WAsP'a yüklenerek çalışma yapılmıştır. Eldeki 54660 satırlık 10m ve 30m yükseklikteki rüzgar hızı ve rüzgar yönü verileri MS Office Excel programında düzeltilerek text dosyası olarak kaydedilmiştir. Hazırlanan text dosyası, WAsP programı içerisindeki OWC sihirbazı yardımıyla WAsP'a yüklenerek bölgenin hakim rüzgar yönü, Weibull dağılımı elde edilmiştir. Tüm verilerin WAsP içerisinde analizinin yapılmasının yanı sıra, MS Excel programı kullanılarak bu verilerin saatlik, aylık ve mevsimsel olarak ortalamaları bulunmuş, aynı zamanda k Helmann katsayısının da 10m ve 30m deki rüzgar hızı verileri kullanılarak zamansal değişimi elde edilmiştir.

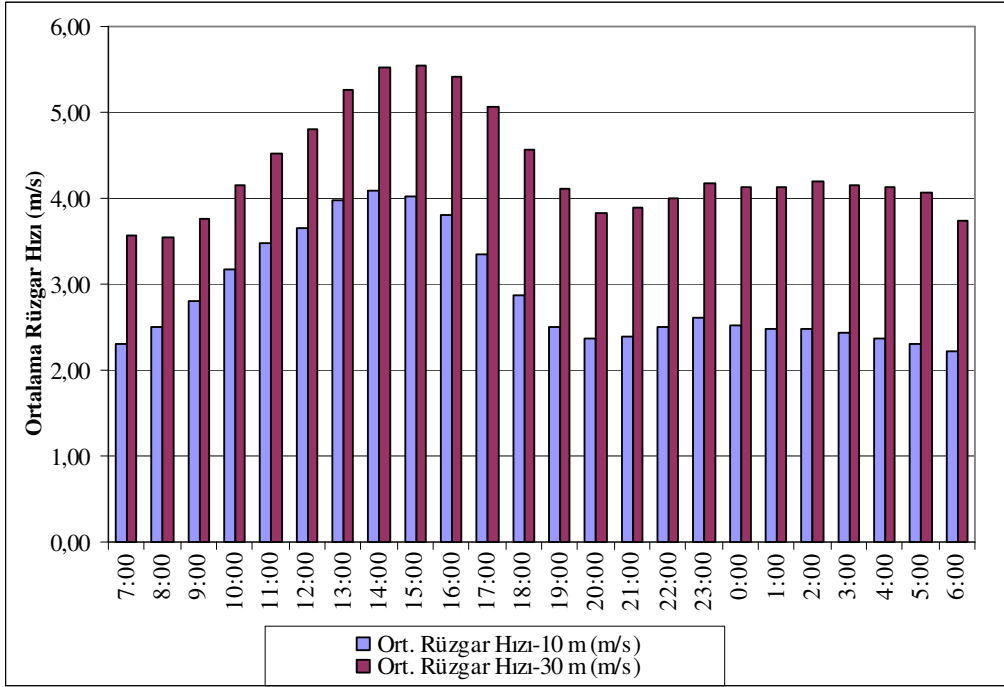


### 5.2.2. Saatlik, aylık ve mevsimsel olarak rüzgar hızlarının ve helmann katsayısının incelenmesi

Bu çalışmada ilk olarak, Aralık 2004-Aralık 2005 tarihleri arasında bulunan 10m ve 30m yüksekliklerde, 10dakika aralıklarla ölçülen ortalama rüzgar hızlarının zamansal olarak analizi yapılmıştır. Buna göre, rüzgar hızlarının gün içerisindeki, aylara göre ve mevsimsel olarak değişimlerini gösteren tablolar ve bu tablolara ait grafikler elde edilmiştir. Tablo 5.1’de verilen tarih aralığındaki saatlik değişimleri gösterilmektedir. Bu tabloda veriler sabahtan başlayarak 24 saatlik zaman dilimi içerisinde hesaplanmış ve gösterilmiştir. Şekil 5.2 ise bu tablodaki verilerin değişimini göstermektedir. Bu veriler incelendiğinde, gün içerisinde öğleden sonraki saatlerde diğer değerlere göre daha yüksek veriler elde edilmiştir. Buna göre, en yüksek ortalama rüzgar hızı 30m yükseklikte saat 15:00’da 5,53 m/s olarak ölçülmüştür, en düşük rüzgar hızı ise 10m yükseklikte sabah saat 06:00’da 2,21 m/s olarak ölçülmüştür. Grafikte bu verilerin değişimi daha rahat incelenmektedir.

**Çizelge 5.1:** 10m ve 30m’deki saatlik ortalama rüzgar hızları

Saat	Ort. Rüzgar Hızı 10m (m/s)	Ort. Rüzgar Hızı 30m (m/s)
7:00	2,30	3,56
8:00	2,49	3,54
9:00	2,81	3,77
10:00	3,17	4,15
11:00	3,47	4,52
12:00	3,65	4,81
13:00	3,97	5,27
14:00	4,10	5,52
15:00	4,03	5,53
16:00	3,81	5,41
17:00	3,35	5,06
18:00	2,86	4,56
19:00	2,50	4,11
20:00	2,37	3,83
21:00	2,40	3,89
22:00	2,50	3,99
23:00	2,60	4,17
0:00	2,52	4,12
1:00	2,48	4,12
2:00	2,47	4,19
3:00	2,44	4,15
4:00	2,36	4,12
5:00	2,30	4,08
6:00	2,21	3,75



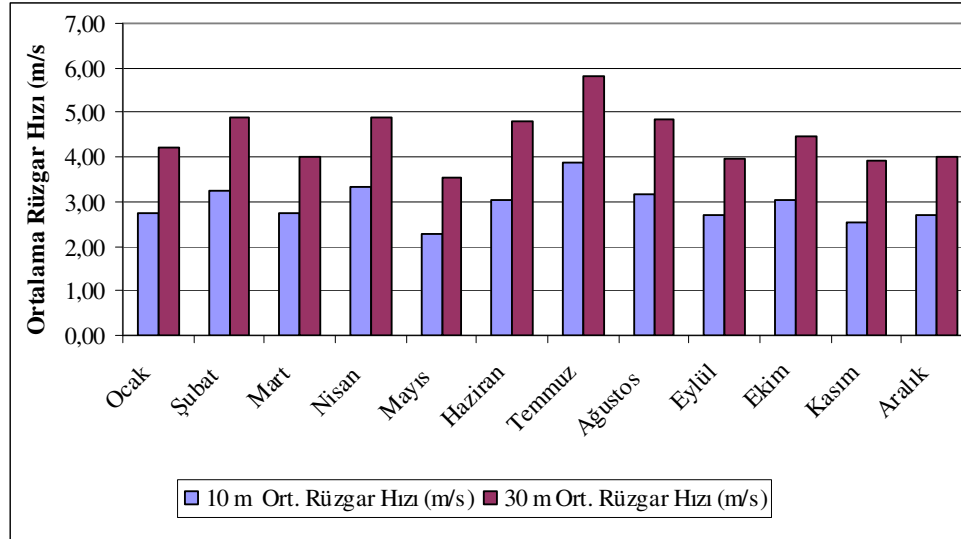
**Şekil 5.2:** 10m ve 30m'deki saatlik ortalama rüzgar hızlarının grafiksel gösterimi

Tablo 5.2'de ise aynı rüzgar verilerinin aylık değişimleri incelenmiş olup, bu verilere ait grafik, Şekil 5.3'te gösterilmektedir. Tablo incelendiğinde, en yüksek ortalama rüzgar hızı Temmuz ayında, 30m yükseklikte 5,82 m/s olarak elde edilmiştir, en düşük ortalama rüzgar hızı ise Mayıs ayında 10m yükseklik için elde edilmiştir.

**Çizelge 5.2:** 10m ve 30m'deki aylık ortalama rüzgar hızı değişimi

Aylar	Ort. Rüzgar Hızı 10m (m/s)	Ort. Rüzgar Hızı 30m (m/s)
Ocak	2,74	4,22
Şubat	3,24	4,87
Mart	2,76	4,01
Nisan	3,32	4,88
Mayıs	2,27	3,52
Haziran	3,03	4,81
Temmuz	3,89	5,82
Ağustos	3,18	4,85
Eylül	2,70	3,96
Ekim	3,02	4,46
Kasım	2,54	3,90
Aralık	2,68	4,00

Şekil 5.3'te, Tablo 5.2'deki aylık ortalama rüzgar değerleri gösterilmiştir. Bu bölgede, eldeki verilere göre kış aylarında ortalama rüzgar değerlerinin daha düşük olduğu gözlenmektedir. En yüksek değer her iki yükseklikteki veriler için Temmuz ayında elde edilmiştir.



**Şekil 5.3:** Aylık ortalama rüzgar hızlarının değişimi

10m ve 30m'de farklı zaman aralıklarıyla ölçülen rüzgar hızı verilerine ait güç yoğunluğu değişim tablosu ise Tablo 5.3 'te gösterilmektedir. Buna göre 30m'de ölçülen verileri kullanarak elde edilen güç yoğunluğu değerleri daha fazla çıkmıştır.

**Çizelge 5.3:** 10m ve 30m'deki farklı zaman aralıkları için ölçülen yıllık ortalama güç yoğunluğu değerleri

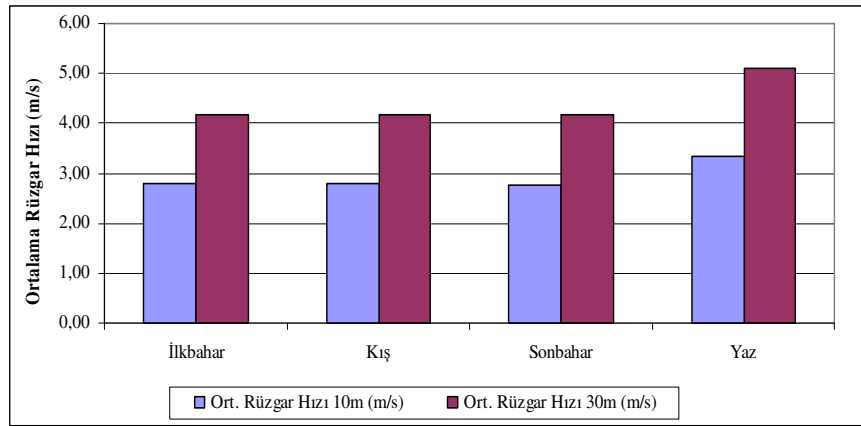
	Ort. Güç Yoğunluğu (10m)(W/m <sup>2</sup> )	Ort. Güç Yoğunluğu (30m)(W/m <sup>2</sup> )
10 dk	45	140
30 dk	43	135
60 dk	42	132

Bu verilerin mevsimsel olarak değişimleri de incelenebilir. Tablo 5.4'te ortalama rüzgar hızlarının mevsimsel değişimleri gösterilmektedir. Buna göre, en yüksek ortalama rüzgar hızının yaz mevsiminde 5,11m/s olduğu gözlenmektedir. En düşük rüzgar hızı ise sonbahar mevsiminde 2,77m/s olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 5.4:** 10m ve 30m'deki mevsimsel ortalama rüzgar hızı değerleri

Mevsim	Ort. Rüzgar Hızı	
	10m (m/s)	30m (m/s)
İlkbahar	2,79	4,16
Kış	2,78	4,18
Sonbahar	2,77	4,16
Yaz	3,33	5,11

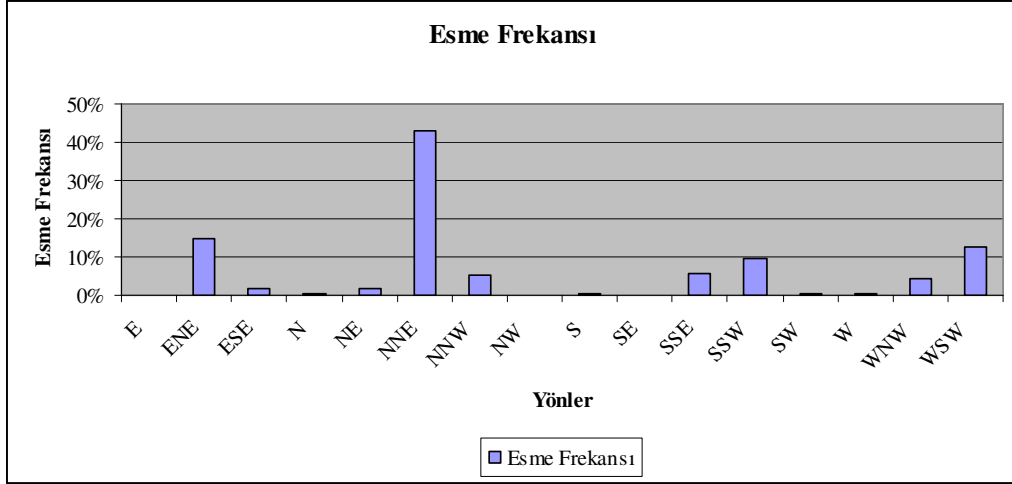
Mevsimsel olarak elde edilen ortalama rüzgar hızları Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde tablodaki değerler gibi, yaz mevsiminde her iki yükseklikte de daha yüksek değerler elde edilmiştir. Diğer mevsimlerdeki ortalama rüzgar hızlarının ise gözle görülür derecede birbirlerine yakın oldukları farkedilmektedir.



**Şekil 5.4:** 10m ve 30m'deki Ortalama Rüzgar Hızlarının Mevsimsel Değişimi

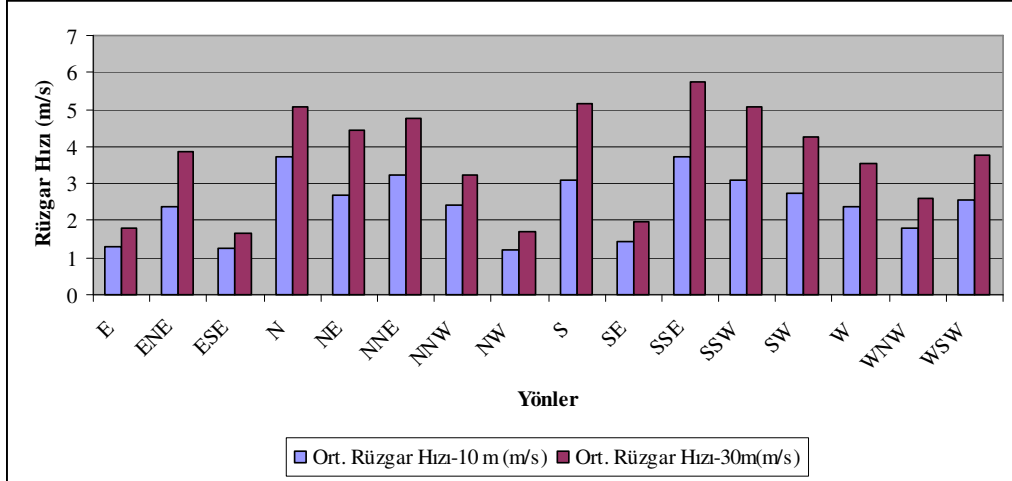
Yapılan bu saatlik, aylık ve mevsimsel ortalama rüzgar hızı analizinde, yaz aylarında ve günün öğleden sonraki en sıcak saatlerinde havanın kararlı olması ve bu bölgede sürekli rüzgarların olması ölçülen rüzgar hızı değerlerinin daha yüksek ve doğru olmasını sağladığı söylenebilir.

Rüzgar esme sıklıklarını incelemek için excelde yapılan hesaplardan elde edilen sonuçlara göre, rüzgar esme sıklığı en fazla NNE yönündendir. Şekil 5.5 rüzgar yönüne göre rüzgar frekansını % cinsinden göstermektedir. Buna göre, rüzgar en fazla NNE yönünden yaklaşık %43 sıklıkla esmektedir.



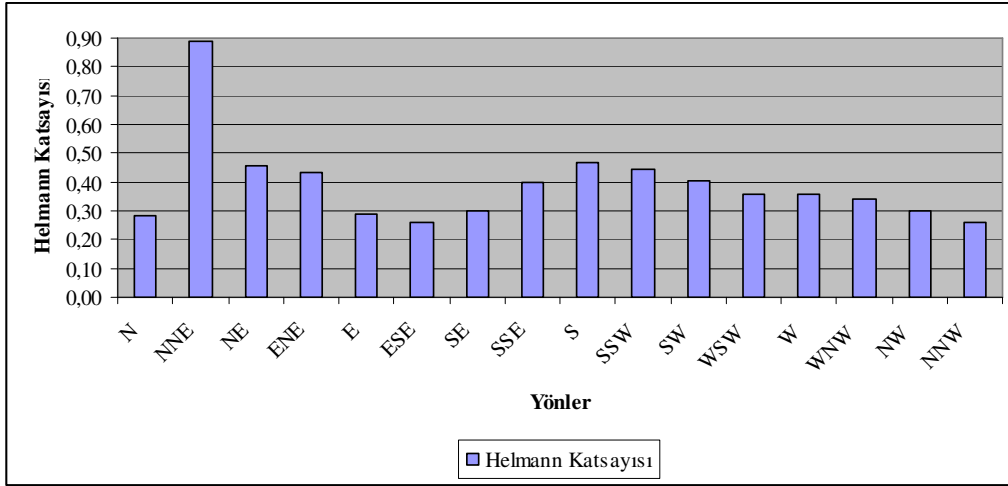
**Şekil 5.5:** Yönlere göre rüzgar esme sıklıkları

10m ve 30m yükseklikler için ortalama rüzgar hızının yönlere göre değişimi ise Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Buna göre tüm yönlerde ortalama rüzgar hızları, 30m yükseklikteki veriler 10m yükseklikteki verilere göre daha yüksektir. SSE yönünden esen rüzgarların ortalama hızları diğer yönlere göre daha yüksek çıkmıştır.



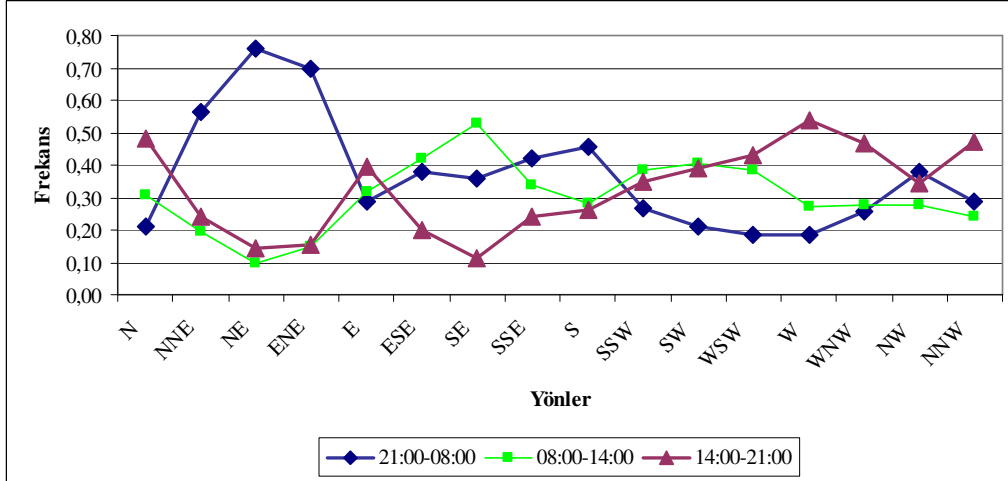
**Şekil 5.6:** Yönlere göre ortalama rüzgar hızlarının değişimi

Yönlere göre yapılan bu analizlere ek olarak elimizde bulunan verileri kullanarak, Helmann katsayılarının yönlere göre değişimi incelenmiştir. Şekil 5.7'de gösterildiği gibi en yüksek Helmann katsayısı hakim rüzgar yönümüz olan NNE yönü için bulunmuştur.



**Şekil 5.7:** Helmann katsayısının rüzgar yönlerine göre değişimi

Rüzgar yönlerinin esme frekansının günün saatlerine göre değişimi ise Şekil 5.8'de incelenebilir. Buna şekilde, tüm saatler için hakim rüzgar yönü NNE olduğu gözlenmektedir. En yüksek esme frekansı ise 0,80 civarında NE-NNE yönündendir. Saat grupları içerisinde tüm yönler için saat 21:00 ile 08:00 arasında rüzgarın esme sıklığı en fazladır.

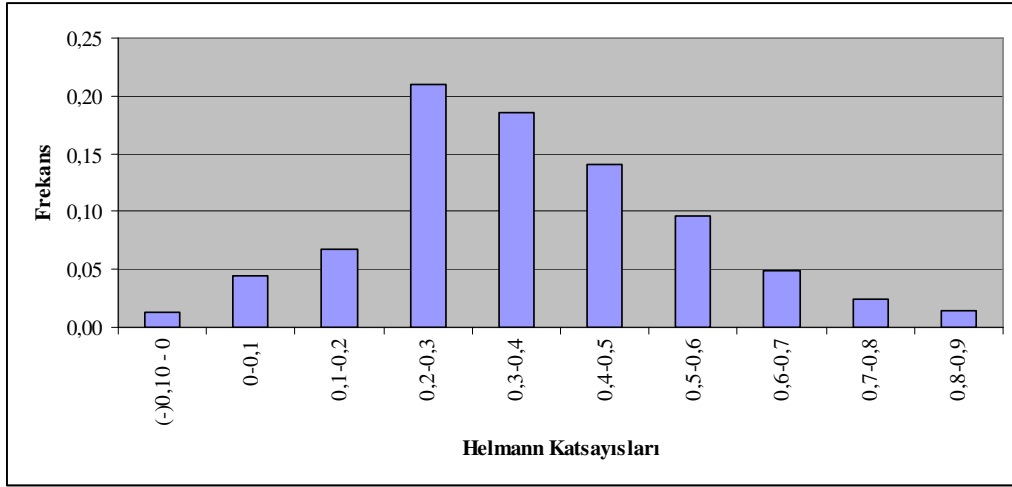


**Şekil 5.8:** Rüzgarın gün içerisindeki esme sıklıkları ve yönleri

Rüzgar hızı ölçümleri genel olarak, rüzgar türbinlerinin kule yüksekliklerinden tamamen farklı yüksekliklerde yapılır. Bu nedenle ölçülen bu rüzgar hızları, 1/7 rüzgar gücü yasası olarak bilinen formülü kullanarak türbinlerin kule yüksekliklerine ekstrapole edilir. Bu rüzgar hızlarının yükseklikle arttırılması güç faktörü olarak da bilinen Helmann katsayısı ile hesaplanmaktadır. Helmann katsayısı, rüzgar

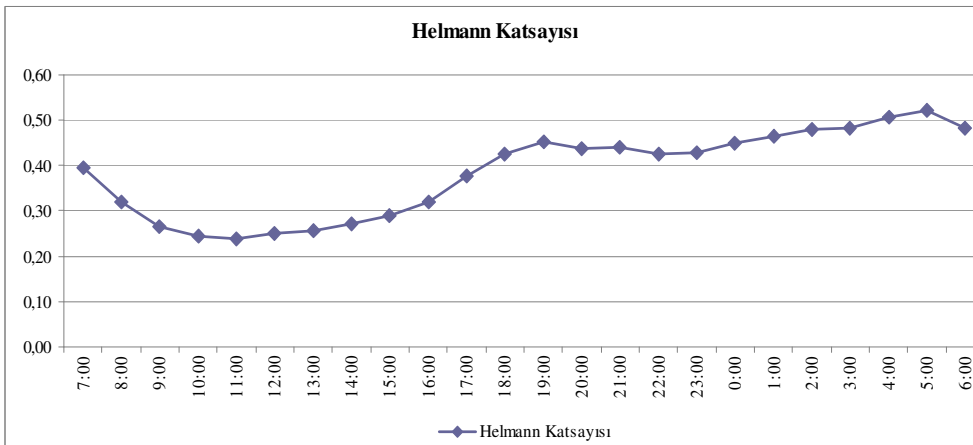
ölçümlerinin yapıldığı araziye bağlı olarak değişmektedir [31]. Elimizde bulunan 10m'deki rüzgar hızı verileri 30m'ye Helmann katsayısı kullanarak extrapole edilmiştir. Her 10 dakikalık veri için Helmann katsayıları bulunmuş ve daha sonra bu katsayıların zamansal olarak nasıl değiştiği ve 0,1 aralıklarla oluşturulan Helmann katsayı gruplarının frekansları incelenmiştir.

Genel olarak Helmann katsayılarının frekans grafiği Şekil 5.9'da gösterilmektedir. Buna göre 0,2-0,3 arasındaki Helmann katsayılarının frekansı en yüksek çıkmıştır.



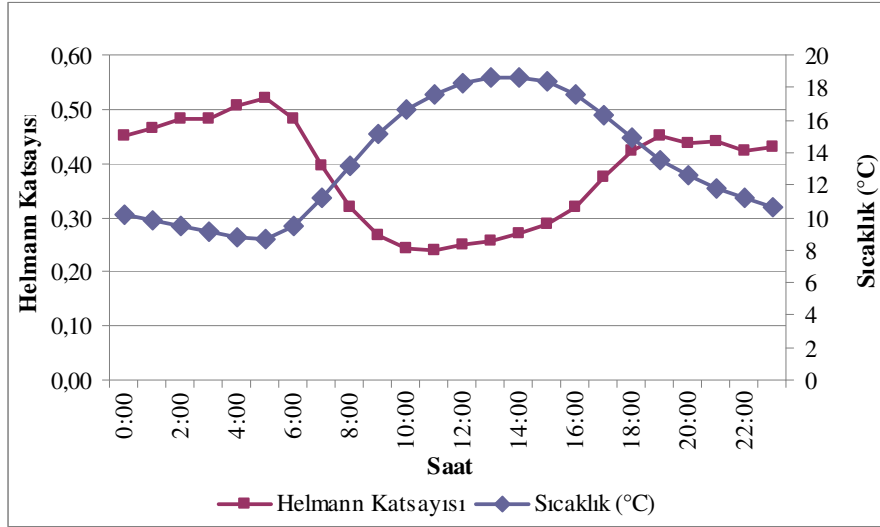
**Şekil 5.9:** Helmann katsayılarının frekans değerleri

Elimizdeki verilerden ortalama Helmann katsayısı 0,37 olarak elde edilmiştir. Tüm Helmann katsayılarının saatlik olarak değişimi Şekil 5.10 'da gösterilmektedir. Bu grafiğe göre sabahın ilk saatlerinde Helmann katsayısının düşük olduğu, en yüksek Helmann katsayısının 05:00 'da olduğu gözlenmektedir.



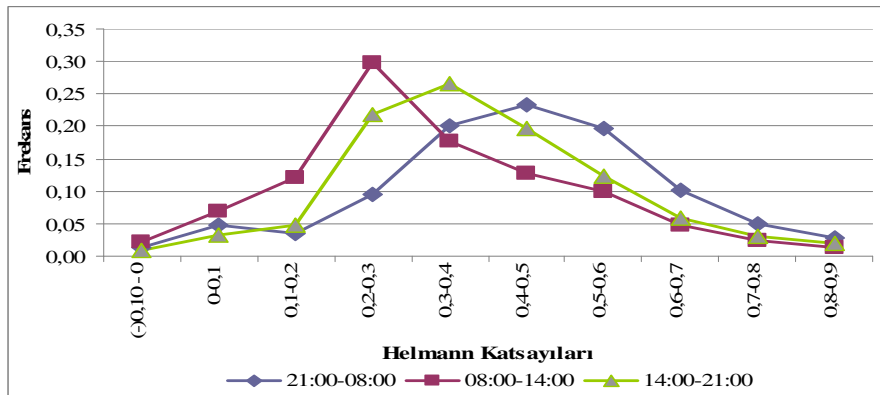
**Şekil 5.10:** Helmann katsayısının saatlik değişimi

Helmann katsayılarının gün içerisinde sıcaklık ile ilişkisini incelemek için Şekil 5.11 oluşturulmuştur. Buna göre, sıcaklığın düşük olduğu yerlerde Helmann katsayılarının yüksek olduğu, sıcaklığın yüksek olduğu zamanlarda ise Helmann katsayılarının düşük olduğu gözlenmektedir. Bu farklılıklarda arazinin, engellerin olması bu değişimleri etkileyeceği söylenebilir.



Şekil 5.11: Gün içerisinde sıcaklık ile helmann katsayılarının değişimleri

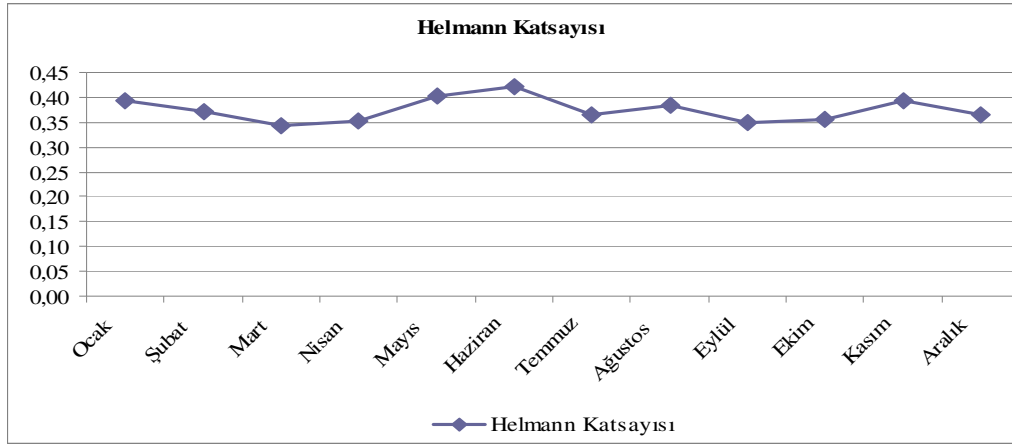
Yapılan saatlik incelemelerde, gün içerisinde 0,1 aralıklarla gruplanan Helmann katsayılarının frekanslarının farklı saat aralıklarında değiştiği gözlenmiştir. Şekil 5.12'de bu değişimler gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde, 0,2-0,3 aralığındaki Helmann katsayılarının frekansı saat 08:00 ile 14:00 arasında en yüksektir. Gün içerisinde akşama ve sabaha doğru artan Helmann katsayılarının frekanslarının düşmekte olduğu gözlenmektedir.



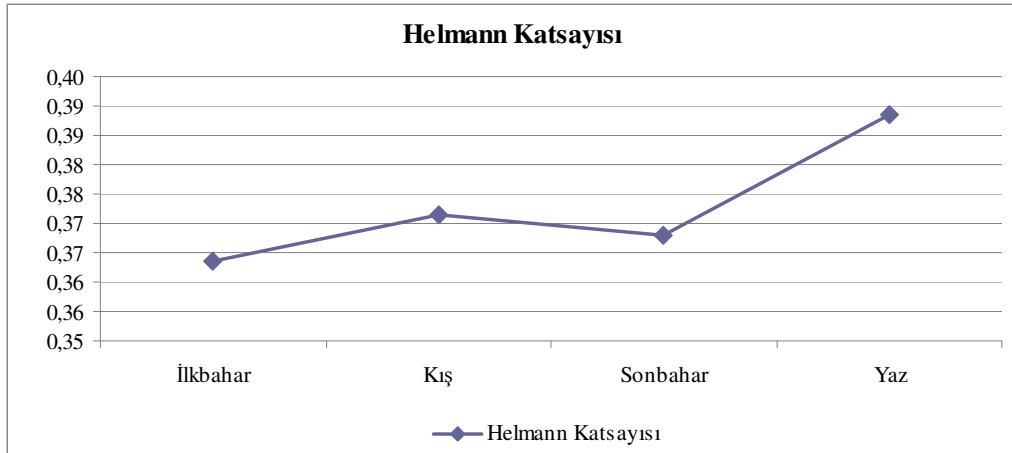
Şekil 5.12: Helmann katsayılarının gün içerisindeki frekans değerleri



Saatlik değişimlerinin yanısıra Helmann katsayılarının aylık ve mevsimsel değişimleri sırasıyla Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 'te gösterilmektedir. Bu grafikler incelendiğinde, yaz aylarında dolayısıyla yaz mevsiminde Helmann katsayısı diğer aylara göre daha yüksek çıkmaktadır. Rehman ve Al-Abbadi'nin çalışmasında, buradan elde edilen çalışmanın tam tersine yaz aylarında Helmann katsayısı daha düşük çıkmıştır, bunun nedeni ise yaz aylarının sıcak olması ve havanın daha homojen olması gösterilmektedir[31]. Bizim çalışmamızda ise yaz aylarında yüksek çıkmasının sebebi kullanılan arazinin dağlık olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

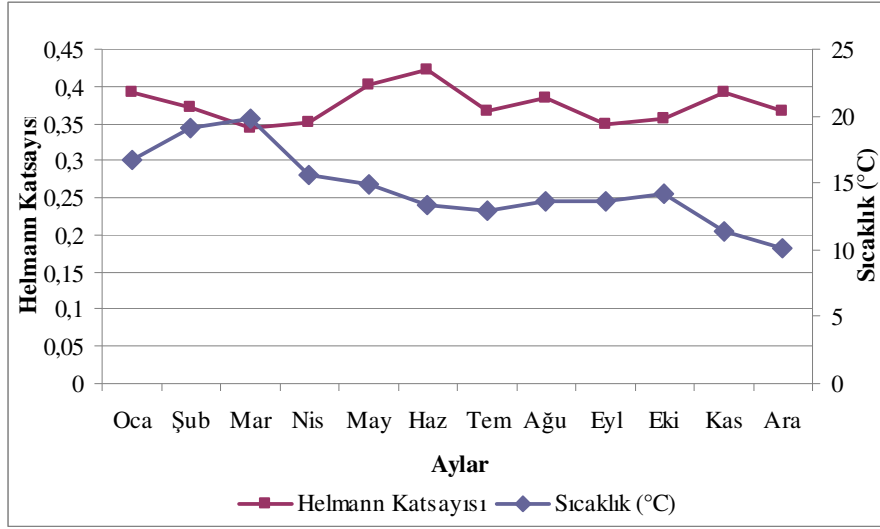


Şekil 5.13: Helmann katsayılarının aylık değişimleri



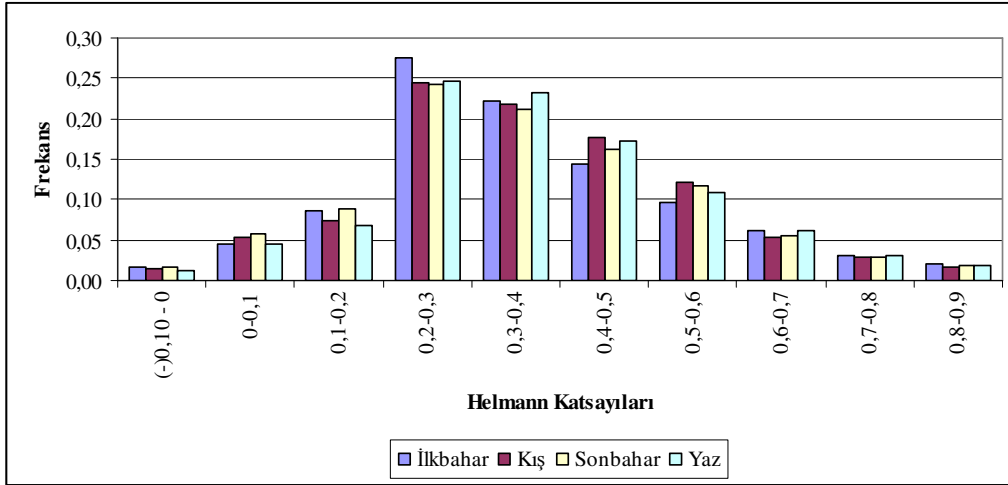
Şekil 5.14: Helmann katsayısının mevsimsel değişimi

Aylara göre sıcaklık ve Helmann katsayılarının değişimleri Şekil 5.15'te gösterilmektedir. Buna göre, sıcaklık ile Helmann katsayıları ters olarak değişmektedir, sıcaklığın yüksek olduğu yerde Helmann katsayısının düşük, sıcaklığın düşük olduğu yerde Helmann katsayısının yüksek olduğu gözlenmektedir.



**Şekil 5.15:** Aylara göre sıcaklık ve helmann katsayılarının değişimi

Mevsimsel olarak Helmann Katsayıları incelendiğinde, tüm mevsimlerde 0,2-0,3 arasındaki Helmann katsayılarının frekanslarının en yüksek olduğu Şekil 5.16'da gözlenmektedir.



**Şekil 5.16:** Mevsimlere göre helmann katsayılarının frekans değişimleri

### 5.2.3. WASP sonuçları

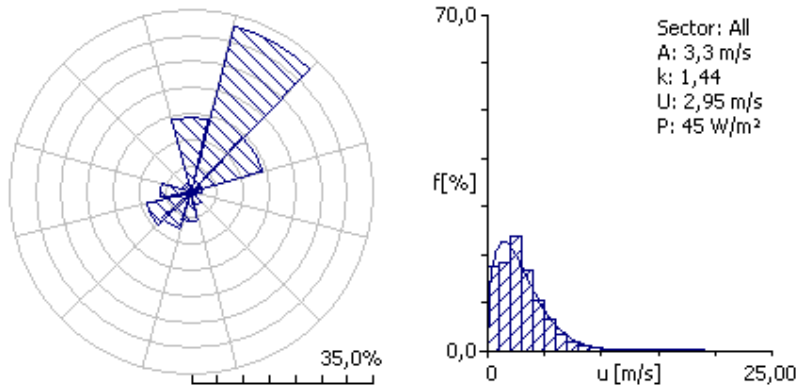
10m ve 30m'deki ortalama rüzgar hızlarının farklı zaman aralıklarındaki ortalama değerlerini bulabilmek için MS Office Excel programı kullanılmıştır. Bu zaman aralıkları 10dk, 30dk ve 60dk olarak belirlenmiştir. Daha sonra bu veriler düzenlenerek, WASP içerisinde kullanılır hale getirilmiştir. WASP'ta kullanılan bu zaman aralıklarına ait ortalama rüzgar hızları iki ayrı türbin için kullanılmıştır. Bu

farklı durumlar verilerin incelenmesini kolaylaştırmak için adlandırılmıştır. Bu durumlar Tablo 5.5'te gösterilmektedir. Tabloda da görüldüğü gibi çalışmada kullanılan verilere ait 12 farklı durum tanımlanmaktadır.

**Çizelge 5.5:** Verilere ait durum tanımları

Durum	Ölçüm Yüksekliği(m)	Süre (dk)	Türbin Tipi
Durum 1	10	10	V63
Durum 2	10	30	V63
Durum 3	10	60	V63
Durum 4	10	10	V80
Durum 5	10	30	V80
Durum 6	10	60	V80
Durum 7	30	10	V63
Durum 8	30	30	V63
Durum 9	30	60	V63
Durum 10	30	10	V80
Durum 11	30	30	V80
Durum 12	30	60	V80

Şekil 5.17'de Tavas ilçesine ait 10m'lik rüzgar verileri kullanılarak oluşturulan hakim rüzgar yönünü içeren rüzgar gülü ve Weibull dağılımı gösterilmektedir. Elde edilen rüzgar gülünde 12 sektör kullanılmıştır ve hakim rüzgar yönü  $30^\circ$  sektöründe NNE olarak gözlenmiştir. Weibull dağılımına göre 10m'de elde edilen ortalama rüzgar hızı 2,95m/s, ortalama güç yoğunluğu 45 W/m<sup>2</sup> , şekil parametresi 1,44, ölçek parametresi ise 3,3 m/s olarak bulunmuştur.



**Şekil 5.17:** Tavas ilçesine ait 10m'lik veriler kullanılarak elde edilen rüzgar gülü ve Weibull dağılımı

Rüzgar verilerinin Weibull parametrelerinin ve rüzgar gülündeki 12 sektördeki rüzgar esme frekansının sektörlere göre dağılımını Tablo 5.6'da incelemek mümkündür. Buna göre Rüzgar esme sıklığı %32,9 oranla  $30^\circ$  sektöründe olduğu gözlenmektedir.

**Çizelge 5.6:** 10m yükseklikteki rüzgar verilerine ait rüzgar frekans bilgileri ve weibull parametreleri

	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	All
c	4,3	3,3	3,0	1,2	1,2	3,6	3,9	3,4	3,0	2,8	1,6	1,7	3,3
k	2,20	1,60	2,40	1,19	0,87	1,05	1,28	1,20	1,44	1,54	1,38	1,28	1,44
U	3,83	2,94	2,65	1,11	1,28	3,57	3,64	3,23	2,72	2,56	1,44	1,59	2,95
E	60	39	18	3	11	149	104	82	36	27	6	9	45
f	14,4	32,9	14,3	1,8	1,4	2,9	5,5	7,4	9,0	6,1	2,2	2,2	100

Tablo 5.7 'de WAsP'tan elde edilen çeşitli pürüzlülük yükseklikleri ve sınıflarına göre Weibull parametreleri bulunmaktadır. Buna göre 100m yükseklikteki 0.00m pürüzlülük sınıfındaki Weibull değerleri en yüksek çıkmıştır.

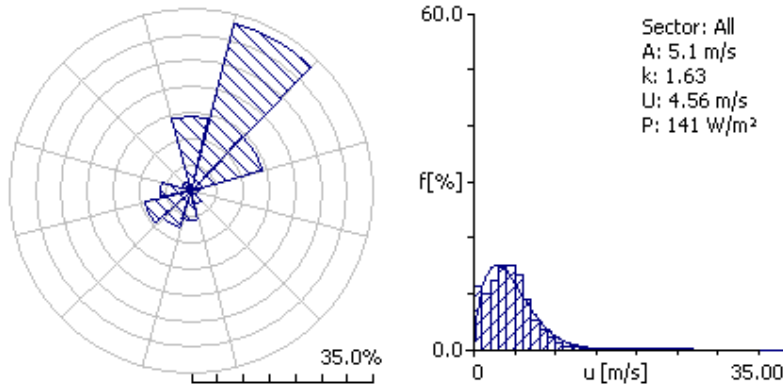
**Çizelge 5.7:** Pürüzlülük sınıfları ve yüksekliklerine göre weibull parametreleri

Yükseklik	Parameter	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m
10,0 m	Weibull c [m/s]	5,1	3,5	3,0	2,4
	Weibull k	1,62	1,40	1,40	1,41
	Ort. Hız [m/s]	4,53	3,16	2,76	2,17
	Güç Yoğ. [W/m <sup>2</sup> ]	139	59	39	19
25,0 m	Weibull c [m/s]	5,5	4,2	3,8	3,2
	Weibull k	1,65	1,49	1,49	1,48
	Ort. Hız [m/s]	4,95	3,77	3,40	2,85
	Güç Yoğ. [W/m <sup>2</sup> ]	177	91	66	39
50,0 m	Weibull c [m/s]	6,0	4,9	4,4	3,8
	Weibull k	1,69	1,63	1,62	1,59
	Ort. Hız [m/s]	5,32	4,35	3,98	3,43
	Güç Yoğ. [W/m <sup>2</sup> ]	212	122	94	62
100,0 m	Weibull c [m/s]	6,4	5,8	5,3	4,6
	Weibull k	1,66	1,75	1,77	1,78
	Ort. Hız [m/s]	5,76	5,15	4,73	4,14
	Güç Yoğ. [W/m <sup>2</sup> ]	276	185	141	94

WAsP programında yapılan 10m yükseklikte ölçülen 10 dk 'lık rüzgar verileri için yapılan tüm bu hesaplamalar, 30dk ve 60dk'lık rüzgar hızı ve yön verileri için de hesaplanmıştır. 30 dk'lık rüzgar verileri için ortalama rüzgar hızı 2,93m/s, ortalama güç yoğunluğu 44W/m<sup>2</sup>, k şekil parametresi 1,46, c ölçek parametresi ise 3,2 m/s olarak gözlenmiştir. Bu değerler 60 dk'lık rüzgar verileri için hesaplandığında, ortalama rüzgar hızı 2,92m/s, ortalama güç yoğunluğu 43 W/m<sup>2</sup>, k şekil parametresi 1,47, c ölçek parametresi ise 3,2 m/s olarak elde edilmiştir. Buna göre, WAsP sonuçları arasında en yüksek ortalama rüzgar hızı ve ortalama güç yoğunluğu değerleri 10dk aralıklarda ölçülen verilerde daha fazla çıkmıştır. Hakim rüzgar yönlerine bakıldığında ise tüm zaman aralıklarında hakim rüzgar yönü NNE yönünde

yani 30 derece sektöründe çıktığı gözlenmiştir. Ölçülen zaman aralıklarını arttırmanın hakim rüzgar yönünün değişmesinde bir etkisi olmadığı gözlenmiştir.

Yukarıda 10m yükseklikte ölçülen rüzgar verileri için yapılan tüm bu hesaplamalar, 30m yükseklikte ölçülen rüzgar verileri kullanılarak da yapılmıştır. Bunun sonucunda, Şekil 5.18'deki rüzgar gülü ve Weibull dağılımı elde edilmiştir. Buna göre, ortalama rüzgar hızı 4,56m/s, ortalama güç yoğunluğu 141 W/m<sup>2</sup>, Weibull A ölçek parametresi(c) 5,1 m/s, k şekil parametresi ise 1,63 olarak elde edilmiştir. Bu değerlere bakıldığında 30m yükseklikteki veriler kullanılarak yapılan hesaplamalar 10m 'de ölçülenlere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. 30m rüzgar verileri kullanılarak yapılan hesaplamalarda hakim rüzgar yönü, 10m de ölçülenlerle aynı doğrultuda 30° sektöründe NNE yönünde bulunmuştur. Tüm bu veriler doğrultusunda, ölçüm yüksekliğini değiştirmenin hakim rüzgar yönüne etki etmediği gözlenmiştir.



**Şekil 5.18:** Tavas ilçesine ait 30m'lik veriler kullanılarak elde edilen rüzgar gülü ve Weibull dağılımı

Tablo 5.8'de 30m yükseklikte ölçülen rüzgar verilerine ait, her sektör için Weibull parametreleri ve rügar esme sıklığını gösteren frekans bilgileri bulunmaktadır. Buna göre, rüzgar esme frekansı en fazla 30° sektöründe olduğu gözlenmektedir. Buna göre türbinler yerleştirilirken bu bilginin gözönünde bulundurulması gerektiği söylenebilir.

**Çizelge 5.8:** 30m yükseklikteki rüzgar verilerine ait weibull parametreleri ve rüzgar frekansı

	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	All
c	6,0	5,2	4,8	1,6	1,5	5,9	6,5	5,6	4,3	4,1	2,2	2,0	5,1
k	2,57	2,06	2,82	1,06	0,81	1,14	1,41	1,26	1,44	1,67	1,36	1,10	1,63
U	5,36	4,59	4,31	1,54	1,72	5,66	5,94	5,16	3,93	3,70	2,04	1,94	4,56
E	146	110	71	12	34	490	384	308	107	73	16	21	141
f	14,4	33,1	14,3	1,8	1,3	2,8	5,5	7,4	9,1	6,1	2,1	2,1	100

WASP programında hesaplanan Weibull parametreleri tüm pürüzlülük sınıfları içinde ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda, farklı yükseklikler ve farklı pürüzlülük sınıfları için elde edilen tüm değerler Tablo 5.9 'da gösterilmektedir. Bu tabloya göre yükseklik arttıkça tüm değerler her pürüzlülük sınıfında artmaktadır. 0.00m pürüzlülük sınıfında ise her yükseklikte diğer sınıflara göre daha yüksek değerler olduğu gözlenmektedir.

**Çizelge 5.9:** Pürüzlülük sınıfları ve yüksekliklerine göre weibull parametreleri

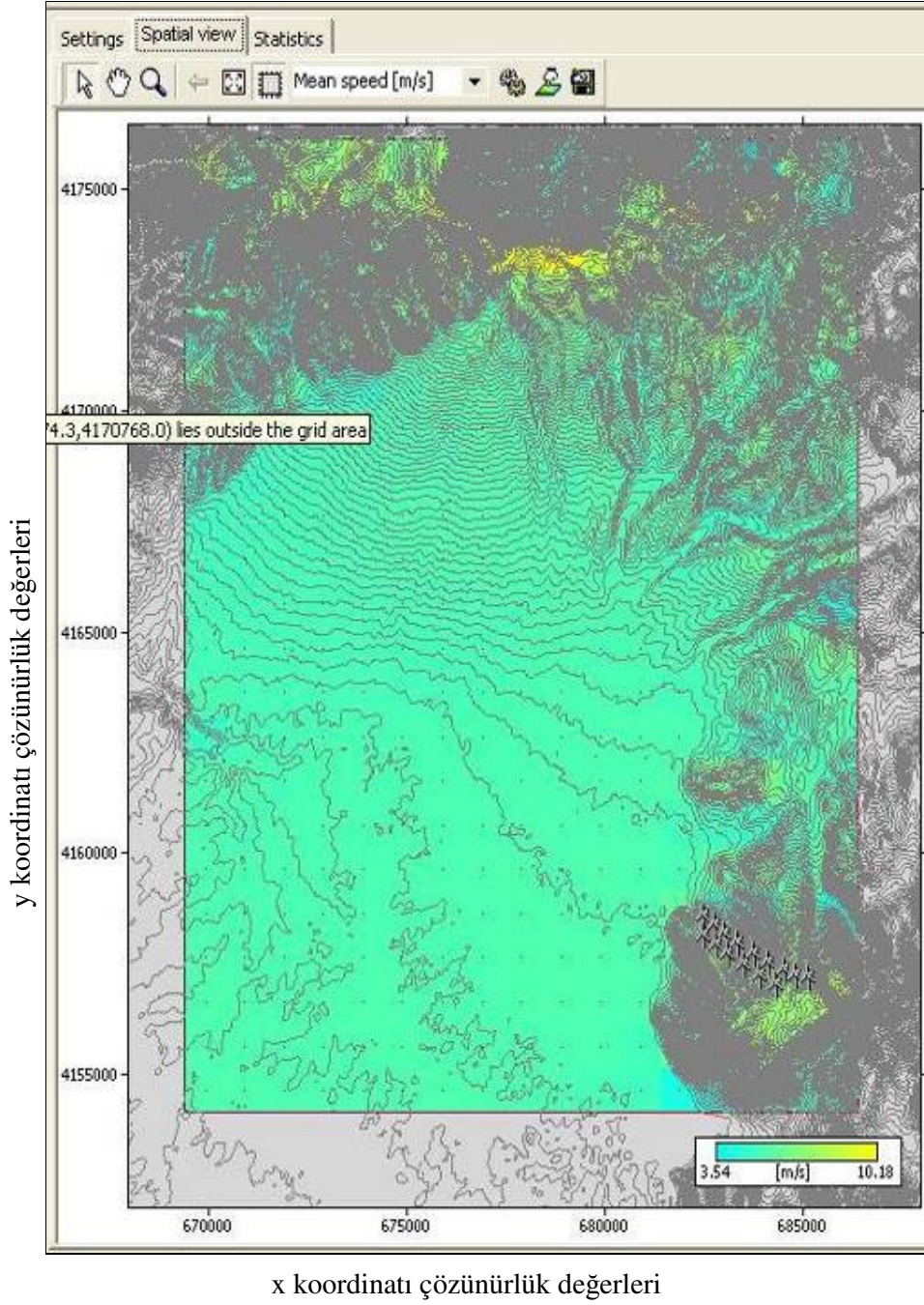
Yükseklik	Parameter	0,00 m	0,03 m	0,10 m	0,40 m
10,0 m	Weibull c [m/s]	6,2	4,2	3,7	2,9
	Weibull k	1,61	1,42	1,42	1,42
	Ort. Hız [m/s]	5,52	3,84	3,35	2,63
	Güç Yoğ. [W/m <sup>2</sup> ]	253	103	68	33
25,0 m	Weibull c [m/s]	6,7	5,1	4,6	3,8
	Weibull k	1,65	1,49	1,49	1,49
	Ort. Hız [m/s]	6,03	4,58	4,12	3,45
	Güç Yoğ.[W/m <sup>2</sup> ]	321	161	117	69
50,0 m	Weibull c [m/s]	7,2	5,9	5,4	4,6
	Weibull k	1,69	1,62	1,61	1,58
	Ort. Hız[m/s]	6,47	5,26	4,81	4,14
	Güç Yoğ. [W/m <sup>2</sup> ]	384	217	168	110
100,0 m	Weibull c [m/s]	7,8	7,0	6,4	5,6
	Weibull k	1,67	1,76	1,77	1,74
	Ort. Hız[m/s]	6,99	6,19	5,68	4,97
	Güç Yoğ.[W/m <sup>2</sup> ]	489	319	246	167
200,0 m	Weibull c [m/s]	8,6	8,5	7,8	6,8
	Weibull k	1,64	1,77	1,77	1,77
	Ort. Hız[m/s]	7,69	7,58	6,92	6,01
	GüçYoğ. [W/m <sup>2</sup> ]	668	583	442	291

Yapılan çalışmalarda bulunan ortalama değerler doğrultusunda 10m ve 30m yükseklikteki farklı zaman aralıkları olan 10dk, 30dk, 60dk verilerini kullanarak elimizdeki 20x20 km 'lik harita alanı içerisinde, belirlenen zaman aralıkları ve iki farklı tip türbin için on iki ayrı türbin yerleştirme işlemleri yapılarak, enerji üretimlerinin analiz edilmesi sağlanmıştır.

#### 5.2.4. Rüzgar enerji türbinleri ve enerji üretim miktarının belirlenmesi

Yeni kurulacak olan rüzgar enerji santralinden üretilecek enerjinin mevcut enerji nakil sistemine entegrasyonunun sağlanması gereklidir. Bu entegrasyonun yapılacağı hat kapasitesi, kısa devre gücü, gerilim oynamaları, harmonikler, reaktif güç vb. gibi bir takım kriterler dikkate alınarak yatırımcı kurmayı düşündüğü rüzgar enerji santralinin kurulu güç kapasitesini belirlemelidir. Kaç tane rüzgar türbini kurulacak, bunların birim gücü ne olacak ve arazi üzerine nasıl konumlandırılacak gibi sorulara cevap bulunmalıdır. Piyasada çeşitli model ve büyüklükte rüzgar türbinleri bulunmaktadır. Yatırımcı amacını da gözönünde bulundurarak fiyat, teknik özellikler, bölgeye ait frekans dağılım tablosu, verim, garanti, hazırda bulunma ve türbin referansları gibi kriterleri dikkate alarak en uygun rüzgar türbinini seçmelidir. Yatırımcı, rüzgar türbini seçimini yaptıktan ve arazi üzerindeki konumlandırmayı (micrositting) frekans dağılım tablosu, ilgili renk dağılımları ve rüzgar türbinine ait teknik kriterleri göz önüne alarak planlandıktan sonra her bir rüzgar türbin yerine ait 1/25 000 ölçekli harita üzerinde UTM koordinatlarını tespit etmelidir. Bu aşamaya kadar elde edilen rüzgar atlas istatistik bilgileri, rüzgar türbinine ait karakteristik değerler ve rüzgar türbinlerinin UTM koordinatlarına ilişkin veriler birlikte kullanılarak rüzgar türbinlerinin tek tek veya birarada üretebilecekleri yıllık enerji miktarları WAsP bilgisayar programı ile hesap edilir. [30]

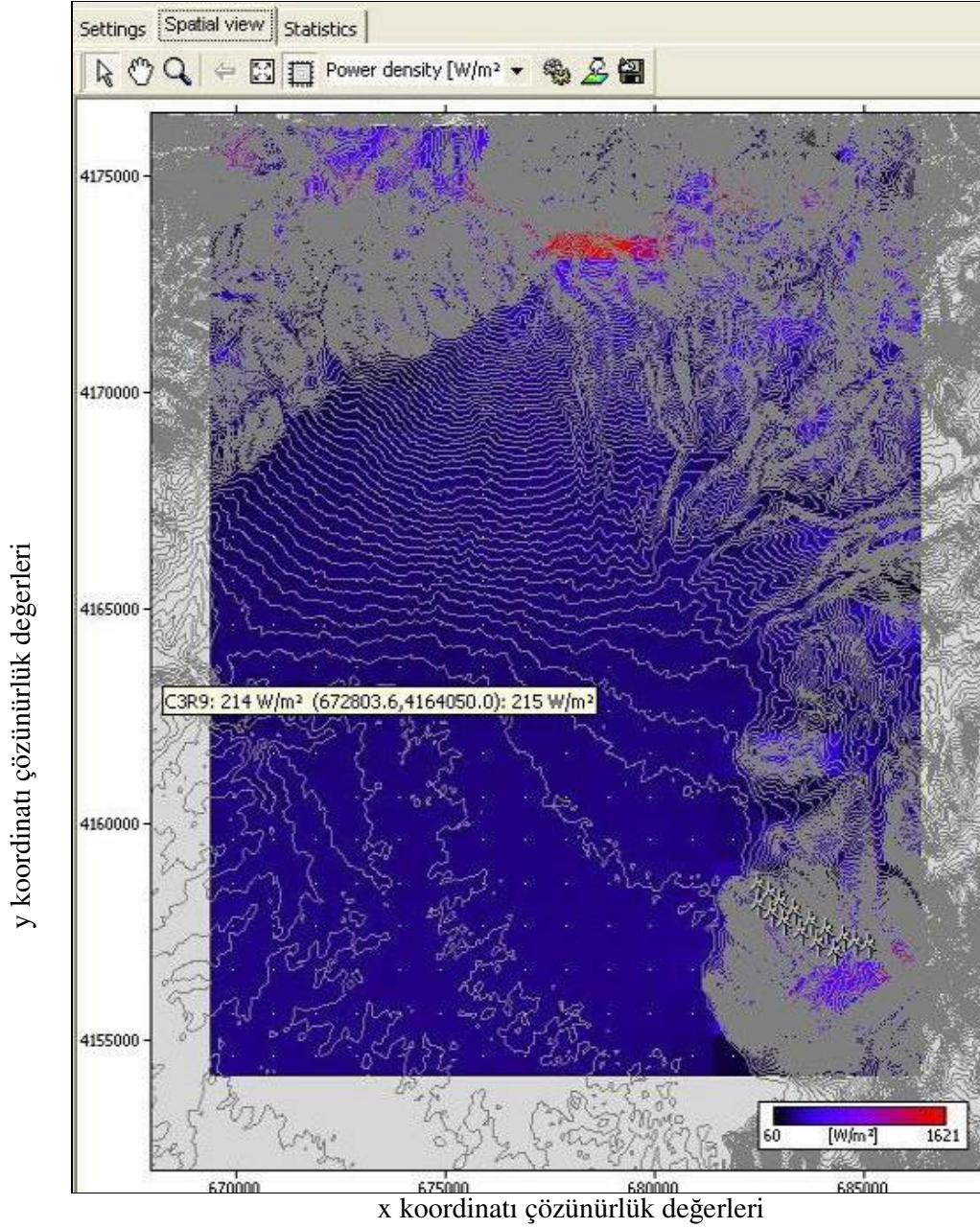
WAsP içerisine alınan .map uzantılı 20x20km lik eş yükseklik eğrisi içeren harita kullanılarak, güç yoğunluğu değerlerinin, ortalama rüzgar hızlarının vs. harita üzerinde alansal dağılımları görsel olarak elde edilmiştir. Bu alansal dağılımlar gözönünde bulundurularak türbinlerin doğru olarak konumlandırılması işlemi uygulanmıştır. Bu yapılan türbin konumlandırma işlemleri 10dk, 30dk ve 60 dk'lık rüzgar verileri için ayrı ayrı incelenmiş olup, karşılaştırma yapma fırsatı bulunmuştur. Şekil 5.19'da ortalama 10 dk'lık rüzgar hızı değerlerinin belirlenen alan içerisindeki rüzgar hızı dağılımı gösterilmektedir. Haritaya göre, mavi renk ile gösterilen alanlarda rüzgar hızının sarı renkli alanlara kıyasla daha düşük olduğu gösterilir.



**Şekil 5.19:** Rüzgar hızı değerlerinin alansal dağılımı

Şekil 5.20 'de Tavas ilçesine ait güç yoğunluğu değerlerinin alansal dağılımları gösterilmektedir. Haritada kırmızı renkle gösterilen alanlar güç yoğunluklarının en yüksek olduğu alanlardır. Bu bölgeler dağlık arazi olduğu için, güç yoğunluğu çok yüksek olsa da, türbin kurulumu için uygun yer olarak düşünülmemiştir.



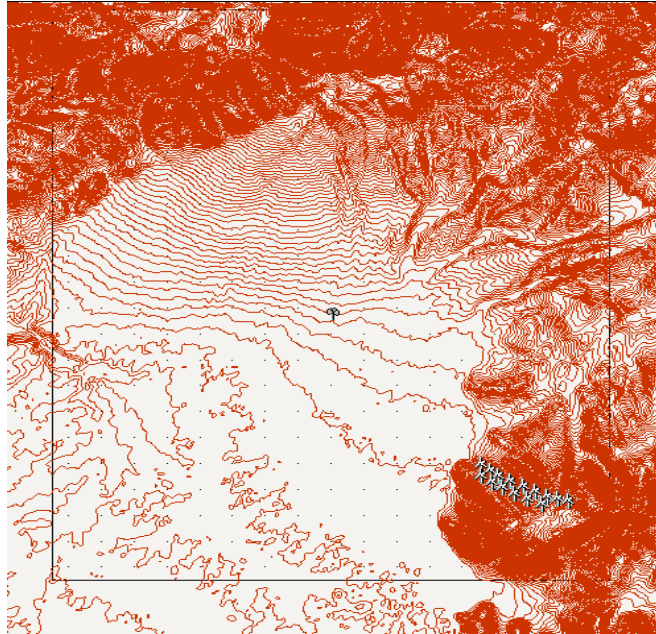


**Şekil 5.20:** Güç yoğunluğu değerlerinin alansal dağılımı

### 5.3. Türbinlerin Konumlandırılması

Yapılan çalışmada, 30MW'lık santral kurulumu planlanmıştır. Bu kurulum için WAsP içerisinde tanımlı, 60m kule yüksekliğine sahip 1500 kW'lık V63 tipi 20 tane Vestas türbin ile 67m kule yüksekliğine sahip 2000kW'lık V80 tipi 15 tane türbin kullanımı planlanmıştır. Bu türbinleri kullanarak, 10dk, 30dk ve 60 dk'lık verilerden ayrı ayrı enerji üretim değerleri elde edilmiş ve daha sonra karşılaştırma yapılmıştır. Seçilen türbinler harita içerisindeki alanda öncelikle rüzgar hızı ve güç yoğunluğu

yüksek olan kuzey bölgelere yerleştirilmiştir. Sonuç olarak yıllık enerji üretim değeri yüksek çıkmıştır. Fakat bu bölgede bir sorun ile karşılaşmıştır. Türbin yerleştirilen yerin google earth'teki görüntüsüne bakıldığında, bölgenin dağlık arazi olduğu, enerji üretiminin fazla olmasına rağmen, ulaşım ve bağlantı giderlerinin düz alanlara göre daha fazla olması ve buradaki pürüzlülük değerlerinin de yüksek olması beklendiğinden, türbinlerin güneyde bulunan diğer dağlık araziye nazaran daha az engebeli olan, ortalama rüzgar hızı ovaya göre daha yüksek olan araziye yerleştirilmesi uygun görülmüştür. Şekil 5.21 üzerinde 10dk'lık rüzgar verileri kullanılarak, 15 tane 2000kW'lık V80 türbinleri haritaya yerleştirilerek oluşturulan rüzgar santrali gözlenmektedir.



**Şekil 5.21:** Vestas V80 türbinleri kullanılarak oluşturulan 30 MW kurulu güce sahip rüzgar santrali

Bu santrale ait üç ayrı zaman aralığı için yıllık üretim değerleri ise Tablo 5.10 'da gösterilmektedir. Kurulan bu santral için tüm türbinlerin toplam yıllık net enerji üretim miktarı 10dk için 74648 MWh, 30dk için 68373 MWh ve 60dk için 66467 MWh olarak gösterilmektedir. Buna göre, zaman aralığı kısa tutularak alınan ayrıntılı rüzgar ölçümlerinden elde edilen yıllık enerji üretiminin daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır. Santral kurulumunda kullanılan türbin başına elde edilen ortalama yıllık net güç miktarı ise 10dk için 3732 MWh ile diğerlerine göre en yüksektir. Aynı

zamanda bu tabloda türbinler içerisindeki en düşük net enerji üretimi ve en yüksek net enerji üretimi de gösterilmektedir.

**Çizelge 5.10:** Farklı zaman aralıkları için, 20 tane Vestas V63 türbinleri kullanılarak oluşturulan yıllık enerji üretim değerleri

Türbin	Parametre	Toplam	Ortalama	En düşük	En yüksek
Durum 7	NetAEP[MWh]	74648	3732	2031	5349
	BrütAEP[MWh]	77092	3855	2083	5407
	Kayıp [%]	3,17	-	-	-
Durum 8	NetAEP [MWh]	68373	3419	1879	4129
	BrütAEP[MWh]	72092	3605	1964	4438
	Kayıp [%]	5,16	-	-	-
Durum 9	NetAEP [MWh]	66467	3323	1813	4056
	BrütAEP[MWh]	68926	3446	1881	4228
	Kayıp [%]	3,57	-	-	-

WASP içerisinde 30m yükseklikteki rüzgar verileri kullanılarak, V63 tipi türbin kullanılan santral için 10dk aralıklarla ölçülen verilerden daha yüksek enerji üretimi bulunmuştur. Buna göre, V63 tipi 20 tane türbinin yerleştirildiği arazide tek tek enerji üretimlerinin hangi değerlerde olacağı hesaplanmıştır. Tablo 5.11’de her bir V63 tipi türbinlerin yıllık net enerji üretim değerleri ve kapasite faktörleri bulunmuştur. Bu tabloda, türbin başına düşen yıllık net enerji üretimi ortalama 3732 MWh, kayıp %3, türbin verimliliği %97, kapasite faktörü ise %28 civarında gösterilmektedir..

**Çizelge 5.11:** Durum 7 için yıllık enerji üretim değerleri, kayıplar ve kapasite faktörleri

Türbin	Türbin (60m)	Brüt AEP [MWh]	Net AEP [MWh]	Kayıp [%]	$C_f$ [%]
T1	V63(1500kW)	3231	3210	0,64	24,43
T2	V63(1500kW)	3551	3491	1,67	26,57
T3	V63(1500kW)	3180	3114	2,07	23,70
T4	V63(1500kW)	3702	3538	4,43	26,93
T5	V63(1500kW)	2083	2031	2,46	15,46
T6	V63(1500kW)	3760	3691	1,82	28,09
T7	V63(1500kW)	4489	4417	1,61	33,61
T8	V63(1500kW)	3801	3743	1,52	28,49
T9	V63(1500kW)	3155	3111	1,41	23,67
T10	V63(1500kW)	4424	4368	1,25	33,24
T11	V63(1500kW)	5407	5349	1,08	40,71
T12	V63(1500kW)	4394	4174	5,01	31,76
T13	V63(1500kW)	4228	3931	7,03	29,92
T14	V63(1500kW)	3571	3373	5,55	25,67
T15	V63(1500kW)	3925	3910	0,37	29,76
T16	V63(1500kW)	4431	4166	5,98	31,71
T17	V63(1500kW)	4117	3930	4,55	29,91
T18	V63(1500kW)	4000	3841	3,98	29,23
T19	V63(1500kW)	4057	3848	5,16	29,28
T20	V63(1500kW)	3584	3409	4,87	25,95
Santral	V63(30MW)	77092	74648	3,12	28,40

Tablo 5.12’de ise V63 türbin tipi kullanılan santraldeki tüm türbinlere ait Weibull parametreleri bulunmaktadır. Buradaki Weibull parametrelerine göre türbinlerin ortalama rüzgar hızı 7,3 m/s’dir.

**Çizelge 5.12:** Durum 7 için Weibull parametreleri

Türbin	Kule Yük.	c [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]
T1	60m	7,5	1,72	6,66	411
T2	60m	7,8	1,72	6,98	469
T3	60m	7,5	1,68	6,65	419
T4	60m	8,0	1,39	7,32	737
T5	60m	6,2	1,60	5,55	261
T6	60m	8,1	1,67	7,24	544
T7	60m	8,9	1,63	7,99	752
T8	60m	8,1	1,54	7,31	627
T9	60m	7,3	1,51	6,58	470
T10	60m	8,9	1,49	8,02	868
T11	60m	10,1	1,58	9,09	1159
T12	60m	8,7	1,69	7,79	668
T13	60m	8,6	1,73	7,62	609
T14	60m	7,8	1,60	6,98	514
T15	60m	8,2	1,54	7,41	649
T16	60m	8,9	1,60	7,94	759
T17	60m	8,5	1,62	7,62	662
T18	60m	8,4	1,58	7,51	658
T19	60m	8,4	1,54	7,55	688
T20	60m	7,8	1,47	7,09	615

Aynı bölgede ikinci rüzgar santralinin oluşumu, 2000 kW’lık 67m kule yüksekliğinde V80 tipi türbinlerden 15 tane kullanılarak sağlanmıştır. Böylece ikinci 30MW kurulu güç kapasitesine sahip rüzgar santrali kurulmuştur. Bu santralde, 10dk, 30dk ve 60dk ‘lık aralıklarla ayrı ayrı olarak ölçülen rüzgar hızı verileri ve rüzgar yönü verileri kullanılmıştır. Tüm bu veriler ışığında Tablo 5.13’te, bu santrale ait WAsP’tan elde edilen, yıllık enerji üretim değerleri, türbinlerin en düşük enerji üretimi değerleri ve en yüksek enerji üretim değerleri gösterilmektedir. Tabloda’da görüldüğü üzere, yıllık net en fazla enerji üretim değeri, 83012 MWh değeri ile, 10dk ‘lık aralıklarla ölçülen rüzgar verilerine aittir. Bu nedenle, eğer bir rüzgar santrali kurulumu planlanıyorsa rüzgar verilerinin daha az zaman aralıklarıyla ölçülmesi tavsiye edilir. İkinci santraldeki türbinler, V63 tipi türbinleriyle karşılaştırıldığında, bu bölgede kurulan santralde V80 tipi vestas türbinlerinin kurulumundan, daha fazla yıllık net enerji üretimi elde edileceği söylenebilir.

**Çizelge 5.13:** Farklı zaman aralıkları için, 15 tane Vestas V80 türbinleri kullanılarak oluşturulan yıllık enerji üretim değerleri

Türbin	Parametre	Toplam	Ortalama	En düşük	En yüksek
Durum10	NetAEP[MWh]	83012	5534	4465	6605
	BrütAEP[MWh]	85360	5691	4803	6932
	Kayıp [%]	2,75	-	-	-
Durum 11	NetAEP [MWh]	82649	5510	4676	6492
	BrütAEP[MWh]	85712	5714	4761	6865
	Kayıp [%]	3,57	-	-	-
Durum 12	NetAEP [MWh]	76123	5075	3080	6443
	BrütAEP[MWh]	78496	5233	3169	6742
	Kayıp [%]	3,02	-	-	-

WAsP programında elde edilen bu sonuçlara göre 10dk aralıklarla ölçülen rüzgar hızı ve rüzgar yönü değerleri ile daha hassas hesaplama yapılabileceği gözlenmiştir. Aynı zamanda, iki türbin çeşidi kullanılarak oluşturulan iki ayrı santralden en fazla yıllık net enerji üretimi olan santralin, 15 adet 2000 kW'lık 67m kule yüksekliğine sahip Vestas V80 tipi türbinlerin bulunduğu santral olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bölgenin dağlık arazilerle çevrili olmasının, bu bölgeden daha fazla verim alınmasını engellediği düşünülmektedir. Tablo 5.14'te en yüksek yıllık net enerji üretimine sahip 10dk aralıklarla ölçülen verilere ait olan ikinci santralde bulunan tüm türbinlerin ayrı ayrı türbin tipleri, yıllık brüt ve net enerji üretim değerleri, türbinlerin birbirlerinden etkilenmeleri ile oluşacak kayıpların yüzde olarak değerleri, herbir türbin için verimlilik ve kapasite faktörleri gösterilmektedir. Genel olarak bakıldığında türbinlerin ortalama yıllık net enerji üretimleri yaklaşık 5000 MWh civarındadır. Her bir türbinin yıl içerisinde verimlilikleri ise % 90'ın altına düşmemiştir. Santralin ortalama verimi ise %97,49 olarak bulunmuştur. Santralin yıllık brüt enerji üretimi 85360 MWh, yıllık net enerji üretimi ise 83012 MWh olarak elde edilmiştir. Kayıplar ise ortalama yaklaşık %3 civarında olduğu gözlenmektedir. Kayıpların fazla olduğu türbinler gözlenirse, harita üzerindeki yerleşimleri değiştirilip kayıplar daha az değerlere indirilebilir.

**Çizelge 5.14:** Durum 10 türbinleri kullanılarak elde edilen yıllık enerji üretim değerleri, kayıplar, verimlilik ve kapasite faktörleri

Türbin	Türbin (67m)	Brüt AEP [MWh]	Net AEP [MWh]	Kayıp [%]	Cf [%]
T1	V80(2000kW)	4902	4880	0,45	27,85
T2	V80(2000kW)	5651	5598	0,93	31,95
T3	V80(2000kW)	5899	5777	2,07	32,97
T4	V80(2000kW)	4878	4785	1,9	27,31
T5	V80(2000kW)	5838	5723	1,97	32,67
T6	V80(2000kW)	6369	6251	1,84	35,68
T7	V80(2000kW)	5495	5412	1,51	30,89
T8	V80(2000kW)	5790	5723	1,15	32,67
T9	V80(2000kW)	5695	5660	0,61	32,31
T10	V80(2000kW)	6839	6522	4,65	37,22
T11	V80(2000kW)	6932	6605	4,72	37,70
T12	V80(2000kW)	4803	4465	7,04	25,48
T13	V80(2000kW)	5174	4951	4,32	28,26
T14	V80(2000kW)	5641	5417	3,98	30,92
T15	V80(2000kW)	5454	5244	3,86	29,93
Santral	V80(30MW)	85360	83012	2,73	31,59

Tablo 5.15'te ise 10dk'lık rüzgar verileri ile kullanılan ve V80 tipi türbinler kullanılarak kurulan santralin içerisindeki her bir türbin için Weibull parametreleri gösterilmektedir. Bu tabloya göre her bir türbine ait ortalama rüzgar hızı yaklaşık 7,3 m/s'dir. En yüksek rüzgar hızı türbin 10 ve türbin 11 için gösterilmektedir.

**Çizelge 5.15:** Durum 10 için Weibull parametreleri

Türbin	Kule Yük.	c [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]
T1	67	7,5	1,72	6,69	414
T2	67	8,1	1,73	7,24	520
T3	67	8,3	1,74	7,42	557
T4	67	7,5	1,63	6,68	442
T5	67	8,3	1,61	7,48	632
T6	67	8,8	1,62	7,92	741
T7	67	8	1,6	7,17	561
T8	67	8,3	1,54	7,48	672
T9	67	8,3	1,38	7,57	826
T10	67	9,1	1,73	8,13	740
T11	67	9,2	1,75	8,19	744
T12	67	7,5	1,61	6,69	451
T13	67	7,8	1,57	7,04	543
T14	67	8,1	1,63	7,29	574
T15	67	8	1,55	7,21	595

Tablo 5.16'da 30m yükseklikte 30dk aralıklarla ölçülen rüzgar hızları ve yönleri kullanılarak elde edilen santrale ait V63 tipi türbinlerin ayrıntılı analizinin yapılabileceği yıllık enerji üretim değerleri, türbin kayıpları, verimlilikleri ve kapasite faktörleri gösterilmektedir. Rüzgar verilerinin WASP'ta hesaplanarak yıllık enerji üretimlerinin bulunmasıyla elde edilen ortalama kapasite faktörü yaklaşık olarak %26 olarak bulunmuştur.

**Çizelge 5.16:** Durum 8 ayrıntılı üretim değerleri

Türbin	Türbin (60m)	BrütAEP [MWh]	NetAEP [MWh]	Kayıp [%]	C <sub>f</sub> [%]
T1	V63(1500kW)	3355	3325	0,90	25,30
T2	V63(1500kW)	3597	3326	7,54	25,31
T3	V63(1500kW)	3519	3434	2,42	26,13
T4	V63(1500kW)	3765	3652	3,00	27,79
T5	V63(1500kW)	3043	2929	3,74	22,29
T6	V63(1500kW)	1964	1879	4,33	14,30
T7	V63(1500kW)	2975	2857	3,99	21,74
T8	V63(1500kW)	3991	3862	3,24	29,39
T9	V63(1500kW)	4093	3977	2,83	30,26
T10	V63(1500kW)	3468	3371	2,79	25,65
T11	V63(1500kW)	3301	3233	2,07	24,60
T12	V63(1500kW)	3144	3130	0,45	23,82
T13	V63(1500kW)	4087	3709	9,24	28,23
T14	V63(1500kW)	4412	4033	8,58	30,70
T15	V63(1500kW)	4096	3741	8,67	28,47
T16	V63(1500kW)	3330	3096	7,04	23,56
T17	V63(1500kW)	4011	3780	5,74	28,77
T18	V63(1500kW)	4012	3679	8,31	28,00
T19	V63(1500kW)	4438	4129	6,98	31,42
T20	V63(1500kW)	3493	3234	7,40	24,61
Santral	V63(30MW)	72092	68373	4,96	26,02

30m deki 30dk lık rüzgar verileri ve V63 tipi türbin kullanılarak elde edilen Weibull parametreleri Tablo 5.17’de gösterilmiştir. Bu verilere göre türbinler için ortalama rüzgar hızının 7m/s civarında olduğu söylenebilir.

**Çizelge 5.17:** Durum 8 için Weibull parametreleri

Türbin	Kule Yük.	c [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]
T1	60m	7,5	1,67	6,74	440
T2	60m	7,9	1,53	7,08	574
T3	60m	7,8	1,71	6,94	465
T4	60m	8,1	1,72	7,18	511
T5	60m	7,2	1,65	6,48	397
T6	60m	6	1,57	5,41	247
T7	60m	7,3	1,61	6,52	418
T8	60m	8,4	1,65	7,48	613
T9	60m	8,5	1,58	7,63	684
T10	60m	7,7	1,57	6,92	518
T11	60m	7,5	1,53	6,75	498
T12	60m	7,2	1,36	6,6	559
T13	60m	8,4	1,65	7,48	608
T14	60m	8,8	1,71	7,81	664
T15	60m	8,4	1,73	7,48	574
T16	60m	7,5	1,58	6,72	469
T17	60m	8,4	1,58	7,5	649
T18	60m	8,4	1,6	7,51	641
T19	60m	8,9	1,59	8,02	791
T20	60m	7,7	1,6	6,95	511

Tablo 5.18’de ise yine 30 dakika aralıklarla ölçülen veriler kullanılarak V80 tipi türbinlerin bulunduğu santrale ait her bir türbinin konumuna göre ürettikleri yıllık enerji üretimleri, kayıpları ve kapasite faktörleri gösterilmektedir. Bu tablo incelendiğinde ortalama kapasite faktörünün %31,5 civarında olduğu gözlenmektedir.

**Çizelge 5.18:** Durum 11 ayrıntılı üretim değerleri

Türbin	Türbin (67m)	BrütAEP [MWh]	NetAEP [MWh]	Kayıp [%]	Cf [%]
T1	V80(2000kW)	5923	5860	1,07	33,45
T2	V80(2000kW)	5218	5029	3,63	28,70
T3	V80(2000kW)	6216	6042	2,80	34,48
T4	V80(2000kW)	5463	5294	3,10	30,22
T5	V80(2000kW)	5718	5473	4,27	31,24
T6	V80(2000kW)	6074	5909	2,72	33,73
T7	V80(2000kW)	6071	5892	2,95	33,63
T8	V80(2000kW)	5360	5222	2,57	29,81
T9	V80(2000kW)	5638	5515	2,19	31,48
T10	V80(2000kW)	4761	4676	1,78	26,69
T11	V80(2000kW)	6145	5664	7,83	32,33
T12	V80(2000kW)	6865	6492	5,44	37,05
T13	V80(2000kW)	5336	5085	4,70	29,02
T14	V80(2000kW)	5095	4857	4,68	27,72
T15	V80(2000kW)	5829	5639	3,26	32,19
Santral	V80(30MW)	85712	82649	3,53	31,45

Bu değerlere ek olarak Tablo 5.19’da V80 tipi türbinine ait Weibull parametreleri gösterilmektedir.

**Çizelge 5.19:** Durum 11 için Weibull parametreleri

Türbin	Kule Yük.	c [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]
T1	67m	8,30	1,71	7,42	572
T2	67m	7,80	1,54	7,02	553
T3	67m	8,60	1,73	7,65	616
T4	67m	7,90	1,69	7,09	506
T5	67m	8,30	1,47	7,49	720
T6	67m	8,50	1,61	7,64	670
T7	67m	8,50	1,64	7,65	658
T8	67m	7,90	1,60	7,07	535
T9	67m	8,20	1,52	7,35	649
T10	67m	7,40	1,40	6,72	559
T11	67m	8,50	1,69	7,60	620
T12	67m	9,10	1,75	8,12	724
T13	67m	7,90	1,67	7,04	499
T14	67m	7,70	1,61	6,94	505
T15	67m	8,30	1,64	7,44	605

Tablo 5.20, 60 dakikalık aralıklarla ölçülen veriler ve V63 türbinine ait yıllık enerji üretim değerlerini göstermektedir. Bu veriler incelendiğinde kapasite faktörü yaklaşık olarak % 25 olarak hesaplanmıştır.



**Çizelge 5.20:** Durum 9 ayrıntılı üretim değerleri

Türbin	Türbin (60m)	Brüt AEP [MWh]	Net AEP [MWh]	Kayıp [%]	C <sub>f</sub> [%]
T1	V63(1500kW)	2213	2187	1,18	16,64
T2	V63(1500kW)	2887	2813	2,54	21,41
T3	V63(1500kW)	3376	3277	2,92	24,94
T4	V63(1500kW)	3122	3032	2,89	23,07
T5	V63(1500kW)	1881	1813	3,58	13,80
T6	V63(1500kW)	3574	3453	3,39	26,28
T7	V63(1500kW)	4186	4056	3,12	30,86
T8	V63(1500kW)	3881	3759	3,14	28,61
T9	V63(1500kW)	3317	3231	2,59	24,59
T10	V63(1500kW)	2910	2869	1,41	21,84
T11	V63(1500kW)	3371	3187	5,47	24,25
T12	V63(1500kW)	4016	3874	3,55	29,48
T13	V63(1500kW)	4178	4023	3,71	30,62
T14	V63(1500kW)	3335	3243	2,76	24,68
T15	V63(1500kW)	4019	3879	3,48	29,52
T16	V63(1500kW)	3834	3589	6,40	27,31
T17	V63(1500kW)	4228	3985	5,74	30,33
T18	V63(1500kW)	3456	3230	6,53	24,59
T19	V63(1500kW)	3372	3354	0,55	25,52
T20	V63(1500kW)	3767	3611	4,14	27,48
Santral	V63(30MW)	68926	66467	3,45	25,29

Yıllık enerji üretimlerinin yanı sıra 60 dakikalık aralıklarla ölçülen rüzgar verileri kullanılarak Weibull parametreleri de hesaplanmıştır. Tablo 5.21’de V63 türbinine ait Weibull parametreleri gösterilmektedir.

**Çizelge 5.21:** Durum 9 için Weibull parametreleri

Türbin	Kule Yük.	c [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]
T1	60m	7,5	1,67	6,74	440
T2	60m	7,9	1,53	7,08	574
T3	60m	7,8	1,71	6,94	465
T4	60m	8,1	1,72	7,18	511
T5	60m	7,2	1,65	6,48	397
T6	60m	6,0	1,57	5,41	247
T7	60m	7,3	1,61	6,52	418
T8	60m	8,4	1,65	7,48	613
T9	60m	8,5	1,58	7,63	684
T10	60m	7,7	1,57	6,92	518
T11	60m	7,5	1,53	6,75	498
T12	60m	7,2	1,36	6,6	559
T13	60m	8,4	1,65	7,48	608
T14	60m	8,8	1,71	7,81	664
T15	60m	8,4	1,73	7,48	574
T16	60m	7,5	1,58	6,72	469
T17	60m	8,4	1,58	7,5	649
T18	60m	8,4	1,6	7,51	641
T19	60m	8,9	1,59	8,02	791
T20	60m	7,7	1,6	6,95	511

V63 türbini için, 60 dakika aralıklarla ölçülen tüm ayrıntılı hesaplar V80 türbini için de yapılmıştır. Tablo 5.22’de, santralde bulunan V80 türbinlerine ait ayrı ayrı yıllık enerji üretimleri, kayıplar, verimlilikler ve kapasite faktörleri bulunmaktadır.

**Çizelge 5.22: Durum 12 ayrıntılı üretim değerleri**

Türbin	Türbin (67m)	BrütAEP [MWh]	NetAEP [MWh]	Kayıp [%]	Cf [%]
T1	V80(2000kW)	5078,68	5040,7	0,75	28,77
T2	V80(2000kW)	5105,85	5014,5	1,79	28,62
T3	V80(2000kW)	4651,48	4524,1	2,74	25,82
T4	V80(2000kW)	3169,09	3079,9	2,82	17,58
T5	V80(2000kW)	5601,77	5467,3	2,4	31,21
T6	V80(2000kW)	6454,21	6328,8	1,94	36,12
T7	V80(2000kW)	5814,13	5710,4	1,78	32,59
T8	V80(2000kW)	4935,39	4876,2	1,2	27,83
T9	V80(2000kW)	5174,58	5149,9	0,48	29,39
T10	V80(2000kW)	4762,15	4554,3	4,36	25,99
T11	V80(2000kW)	6742,43	6443,2	4,44	36,78
T12	V80(2000kW)	5947,39	5641,9	5,14	32,20
T13	V80(2000kW)	4372,81	4090,6	6,45	23,35
T14	V80(2000kW)	5243,58	4950,7	5,59	28,26
T15	V80(2000kW)	5442,94	5250,1	3,54	29,97
Santral	V80(30MW)	78496,48	76123	3,03	28,97

**Çizelge 5.23: Durum 12 için Weibull parametreleri**

Türbin	Kule Yük.	c [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]
T1	67m	8,30	1,71	7,42	572
T2	67m	7,80	1,54	7,02	553
T3	67m	8,60	1,73	7,65	616
T4	67m	7,90	1,69	7,09	506
T5	67m	8,30	1,47	7,49	720
T6	67m	8,50	1,61	7,64	670
T7	67m	8,50	1,64	7,65	658
T8	67m	7,90	1,60	7,07	535
T9	67m	8,20	1,52	7,35	649
T10	67m	7,40	1,40	6,72	559
T11	67m	8,50	1,69	7,60	620
T12	67m	9,10	1,75	8,12	724
T13	67m	7,90	1,67	7,04	499
T14	67m	7,70	1,61	6,94	505
T15	67m	8,30	1,64	7,44	605

30m rüzgar verileri ve iki çeşit türbin için yapılan tüm bu hesaplar, 10m yükseklik için ölçülen rüzgar verileri ile yapılmış, enerji üretim değerleri, kayıplar, verimlilik değerleri, kapasite faktörleri ve Weibull dağılım parametreleri elde edilmiştir. Tablo 5.24'te 10 dakikalık aralıklarla ölçülen rüzgar verilerine ve V63 türbinlerine ait enerji üretim değerleri gösterilmektedir. Bu tabloya göre, tüm türbinlerin birbirlerinden etkilendikleri zaman oluşacak kayıp ortalama olarak %3,67 olarak bulunmuştur, kapasite faktörü ise ortalama %17,54 olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 5.24:** Durum 1 ayrıntılı üretim değerleri

Türbin	Türbin (60m)	BrütAEP [MWh]	Net AEP [MWh]	Kayıp [%]	C <sub>f</sub> [%]
T1	V63(1500kW)	1216	1189	2,27	9,05
T2	V63(1500kW)	1187	1152	3,01	8,76
T3	V63(1500kW)	857	830	3,23	6,31
T4	V63(1500kW)	1186	1155	2,60	8,79
T5	V63(1500kW)	2561	2510	2,00	19,10
T6	V63(1500kW)	3062	3010	1,71	22,90
T7	V63(1500kW)	3077	3016	1,98	22,95
T8	V63(1500kW)	2801	2737	2,30	20,83
T9	V63(1500kW)	2318	2259	2,52	17,19
T10	V63(1500kW)	2396	2354	1,73	17,92
T11	V63(1500kW)	2872	2764	3,76	21,03
T12	V63(1500kW)	2770	2671	3,54	20,33
T13	V63(1500kW)	2770	2690	2,89	20,47
T14	V63(1500kW)	2322	2228	4,02	16,96
T15	V63(1500kW)	2901	2755	5,03	20,97
T16	V63(1500kW)	2814	2599	7,64	19,78
T17	V63(1500kW)	3015	2815	6,65	21,42
T18	V63(1500kW)	2461	2263	8,05	17,22
T19	V63(1500kW)	2531	2421	4,34	18,43
T20	V63(1500kW)	2792	2675	4,19	20,35
Santral	V63(30MW)	47907	46091	3,67	17,54

Bu verilerin Weibull parametreleri ise Tablo 5.25'te gösterilmektedir.

**Çizelge 5.25:** Durum 1 için Weibull parametreleri

Türbin	Kule Yük.	c [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]
T1	60m	5,20	1,77	4,62	132
T2	60m	5,20	1,76	4,60	131
T3	60m	4,60	1,62	4,08	102
T4	60m	5,00	1,62	4,47	134
T5	60m	6,70	1,76	6,00	291
T6	60m	7,30	1,69	6,50	387
T7	60m	7,30	1,64	6,51	406
T8	60m	6,90	1,50	6,21	398
T9	60m	6,30	1,58	5,67	282
T10	60m	6,20	1,40	5,67	336
T11	60m	6,50	1,67	5,81	282
T12	60m	6,90	1,70	6,18	330
T13	60m	7,00	1,72	6,20	329
T14	60m	6,30	1,61	5,66	274
T15	60m	7,00	1,59	6,29	381
T16	60m	7,00	1,61	6,25	368
T17	60m	7,20	1,57	6,47	421
T18	60m	6,50	1,56	5,81	308
T19	60m	6,60	1,53	5,91	335
T20	60m	6,80	1,47	6,18	405

10m yükseklikteki 10 dakikalık verilerle V63 türbini için yapılan bu hesaplar, V80 türbini için de yapılmıştır. Tablo 5.26, V80 türbinine ait enerji üretim değerlerini içermektedir. Bu tabloya göre, aynı zaman aralıklarıyla yapılan hesaplarda V80 türbinin kullanılması sonucunda değerlerin V63 türbinine göre daha yüksek çıktığı gözlenmiştir. Tablo 5.27'de de bu verilere ait Weibull parametreleri gösterilmektedir.

**Çizelge 5.26:** Durum 4 ayrıntılı üretim değerleri

Türbin	Türbin (67m)	Brüt AEP [MWh]	Net AEP [MWh]	Kayıp [%]	Cf [%]
T1	V80(2000kW)	3661	3592	1,88	20,50
T2	V80(2000kW)	3964	3865	2,48	22,06
T3	V80(2000kW)	3444	3368	2,18	19,23
T4	V80(2000kW)	4944	4506	8,85	25,72
T5	V80(2000kW)	3041	2963	2,58	16,91
T6	V80(2000kW)	4668	4359	6,62	24,88
T7	V80(2000kW)	3072	2988	2,73	17,06
T8	V80(2000kW)	3224	3059	5,11	17,46
T9	V80(2000kW)	4477	4382	2,12	25,01
T10	V80(2000kW)	3710	3470	6,48	19,81
T11	V80(2000kW)	3986	3903	2,08	22,28
T12	V80(2000kW)	4073	3810	6,47	21,74
T13	V80(2000kW)	4330	4269	1,42	24,37
T14	V80(2000kW)	3957	3712	6,20	21,19
T15	V80(2000kW)	4539	4515	0,51	25,77
Santral	V80(30MW)	59091	56764	3,85	21,60

**Çizelge 5.27:** Durum 4 için weibull parametreleri

Türbin	Kule Yük.	c [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]
T1	67m	6,50	1,73	5,78	265
T2	67m	6,70	1,74	6,01	296
T3	67m	6,20	1,64	5,56	253
T4	67m	7,50	1,72	6,70	416
T5	67m	5,90	1,63	5,27	218
T6	67m	7,30	1,74	6,50	375
T7	67m	6,00	1,63	5,37	229
T8	67m	6,10	1,55	5,47	259
T9	67m	7,20	1,65	6,42	384
T10	67m	6,50	1,56	5,87	317
T11	67m	6,70	1,60	5,99	326
T12	67m	6,80	1,63	6,08	332
T13	67m	7,00	1,53	6,27	397
T14	67m	6,70	1,54	6,00	346
T15	67m	7,10	1,39	6,47	507

Bu değerlerin yanı sıra, 10dakikalık ölçüm aralıkları kullanılarak elde edilen veriler ile ölçüm aralıkları 30dk olduğunda elde edilen verileri karşılaştırılmıştır. Bunu yapmak için bu 30 dk verileri her iki türbin çeşidi kullanılarak kurulan santral için her türbinin enerji üretim değerleri bulunmuştur. Bu hesaplardan elde edilen enerji üretim değerleri, kayıplar ve kapasite faktörleri V63 türbini için Tablo 5.28'de gösterilmektedir.

**Çizelge 5.28:** Durum 2 ayrıntılı üretim değerleri

Türbin	Türbin(60m)	BrütAEP [MWh]	Net AEP [MWh]	Kayıp [%]	C <sub>f</sub> [%]
T1	V63(1500kW)	1231	1194	3,00	9,09
T2	V63(1500kW)	1663	1614	2,96	12,28
T3	V63(1500kW)	1679	1627	3,09	12,38
T4	V63(1500kW)	1163	1128	3,06	8,58
T5	V63(1500kW)	2767	2700	2,42	20,55
T6	V63(1500kW)	2996	2924	2,40	22,26
T7	V63(1500kW)	2590	2516	2,86	19,15
T8	V63(1500kW)	2082	2015	3,24	15,33
T9	V63(1500kW)	2177	2126	2,32	16,18
T10	V63(1500kW)	2677	2653	0,91	20,19
T11	V63(1500kW)	2849	2731	4,14	20,79
T12	V63(1500kW)	2157	2145	0,56	16,33
T13	V63(1500kW)	2292	2206	3,73	16,79
T14	V63(1500kW)	2765	2675	3,23	20,36
T15	V63(1500kW)	2332	2215	5,00	16,86
T16	V63(1500kW)	2844	2702	4,98	20,57
T17	V63(1500kW)	2843	2664	6,30	20,27
T18	V63(1500kW)	2435	2263	7,09	17,22
T19	V63(1500kW)	2359	2207	6,44	16,80
T20	V63(1500kW)	2407	2246	6,69	17,09
Santral	V63(30MW)	46310	44553	3,72	16,95

30 dakikalık verilerden aynı zamanda WAsP içerisinde Weibull parametreleri de bulunmuştur. Tablo 5.29’da bu veriler için Weibull parametreleri gösterilmiştir.

**Çizelge 5.29:** Durum 2 için Weibull parametreleri

Türbin	Kule Yük.	c [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]
T1	60m	5,20	1,72	4,61	135
T2	60m	5,70	1,75	5,10	180
T3	60m	5,80	1,72	5,13	187
T4	60m	4,90	1,56	4,39	133
T5	60m	7,00	1,72	6,22	334
T6	60m	7,20	1,65	6,45	392
T7	60m	6,70	1,53	6,01	352
T8	60m	6,00	1,54	5,42	254
T9	60m	6,00	1,39	5,44	302
T10	60m	6,70	1,37	6,08	431
T11	60m	6,90	1,43	6,27	442
T12	60m	6,10	1,62	5,49	248
T13	60m	6,30	1,67	5,67	261
T14	60m	6,90	1,72	6,20	329
T15	60m	6,40	1,67	5,73	271
T16	60m	7,00	1,60	6,27	374
T17	60m	7,00	1,62	6,31	374
T18	60m	6,50	1,61	5,85	302
T19	60m	6,40	1,53	5,73	303
T20	60m	6,40	1,51	5,81	323

Tablo 5.30, 30dk veriler ve V80 türbinine ait enerji üretim değerlerini göstermektedir. Tablo 5.31 ise bu verilere ait Weibull parametrelerini göstermektedir. Ölçüm zaman aralıkları arttıkça yıllık enerji üretim değerleri azalmaktadır. Fakat aynı ölçüm değerleri baz alındığında türbinin V80 olması yıllık enerji üretimini arttırmaktadır.

**Çizelge 5.30: Durum 5 ayrıntılı üretim değerleri**

Türbin	Türbin (67m)	Brüt AEP [MWh]	Net AEP [MWh]	Kayıp [%]	Cf [%]
T1	V80(2000kW)	2720	2659	2,25	15,18
T2	V80(2000kW)	3023	2909	3,78	16,60
T3	V80(2000kW)	2571	2473	3,82	14,11
T4	V80(2000kW)	2317	2227	3,91	12,71
T5	V80(2000kW)	3844	3721	3,18	21,24
T6	V80(2000kW)	4356	4228	2,92	24,13
T7	V80(2000kW)	3911	3807	2,66	21,73
T8	V80(2000kW)	4188	4116	1,72	23,49
T9	V80(2000kW)	4089	3882	5,06	22,16
T10	V80(2000kW)	4558	4339	4,80	24,77
T11	V80(2000kW)	4108	3944	3,99	22,51
T12	V80(2000kW)	3797	3539	6,79	20,20
T13	V80(2000kW)	3110	2894	6,95	16,52
T14	V80(2000kW)	3521	3248	7,76	18,54
T15	V80(2000kW)	3827	3557	7,06	20,30
Santral	V80(30MW)	53940	51543	4,44	19,61

**Çizelge 5.31: Durum 5 için Weibull parametreleri**

Türbin	Kule Yük.	c [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]
T1	67m	5,70	1,77	5,12	179
T2	67m	6,00	1,78	5,35	203
T3	67m	5,50	1,63	4,95	179
T4	67m	5,30	1,63	4,75	159
T5	67m	6,70	1,67	5,96	303
T6	67m	7,10	1,66	6,34	370
T7	67m	6,60	1,60	5,95	321
T8	67m	6,90	1,55	6,17	371
T9	67m	6,80	1,71	6,07	313
T10	67m	7,20	1,74	6,44	364
T11	67m	6,80	1,72	6,10	315
T12	67m	6,60	1,60	5,90	311
T13	67m	6,00	1,57	5,38	243
T14	67m	6,40	1,57	5,73	293
T15	67m	6,60	1,61	5,92	313

Hesaplamaların, 10m yükseklikteki 60 dakikalık verilerle yapılması sonucunda elde edilen V63 türbini için enerji üretim değerleri ve Weibull değerleri Tablo 5.32 ve 5.33'te gösterilmektedir.

**Çizelge 5.32: Durum 3 ayrıntılı üretim değerleri**

Türbin	Türbin(60m)	Brüt AEP [MWh]	Net AEP [MWh]	Kayıp [%]	C <sub>f</sub> [%]
T1	V63(1500kW)	1050	1018	3,02	7,75
T2	V63(1500kW)	1821	1777	2,43	13,52
T3	V63(1500kW)	2242	2195	2,09	16,71
T4	V63(1500kW)	1580	1549	2,01	11,78
T5	V63(1500kW)	1467	1428	2,64	10,87
T6	V63(1500kW)	2556	2499	2,24	19,02
T7	V63(1500kW)	2790	2730	2,13	20,78
T8	V63(1500kW)	2310	2259	2,18	17,19
T9	V63(1500kW)	2527	2477	1,97	18,85
T10	V63(1500kW)	2749	2720	1,06	20,70
T11	V63(1500kW)	1806	1710	5,27	13,02
T12	V63(1500kW)	2560	2439	4,71	18,56
T13	V63(1500kW)	2998	2917	2,70	22,20
T14	V63(1500kW)	3084	3013	2,31	22,93
T15	V63(1500kW)	2126	2054	3,38	15,63
T16	V63(1500kW)	2430	2318	4,58	17,64
T17	V63(1500kW)	2281	2160	5,30	16,44
T18	V63(1500kW)	2480	2367	4,56	18,02
T19	V63(1500kW)	2804	2696	3,83	20,52
T20	V63(1500kW)	1662	1652	0,62	12,57
Santral	V63(30MW)	45322	43980	2,95	16,74

**Çizelge 5.33: Durum 3 için Weibull parametreleri**

Türbin	Kule Yük.	c [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]
T1	60m	4,90	1,69	4,34	115
T2	60m	5,90	1,74	5,25	196
T3	60m	6,40	1,75	5,68	249
T4	60m	5,40	1,59	4,86	176
T5	60m	5,40	1,62	4,84	169
T6	60m	6,70	1,65	6,02	317
T7	60m	7,00	1,58	6,26	380
T8	60m	6,30	1,58	5,64	279
T9	60m	6,60	1,53	5,91	336
T10	60m	6,80	1,43	6,15	417
T11	60m	5,70	1,61	5,09	199
T12	60m	6,60	1,63	5,91	304
T13	60m	7,20	1,74	6,39	357
T14	60m	7,30	1,74	6,48	371
T15	60m	6,30	1,66	5,59	253
T16	60m	6,50	1,48	5,88	345
T17	60m	6,30	1,62	5,68	275
T18	60m	6,60	1,56	5,91	323
T19	60m	6,90	1,46	6,26	426
T20	60m	5,60	1,66	5,00	180

Bu hesaplamalar. V80 türbini kullanılarak yapıldığında Tablo 5.34 ve 5.35 elde edilmiştir.

**Çizelge 5.34:** Durum 6 ayrıntılı üretim değerleri

Türbin	Türbin (67m)	Brüt AEP [MWh]	Net AEP [MWh]	Kayıp [%]	Cf [%]
T1	V80(2000kW)	3186	3134	1,61	17,89
T2	V80(2000kW)	3791	3702	2,36	21,13
T3	V80(2000kW)	2540	2469	2,83	14,09
T4	V80(2000kW)	3365	3248	3,49	18,54
T5	V80(2000kW)	4367	4248	2,73	24,25
T6	V80(2000kW)	3679	3571	2,93	20,38
T7	V80(2000kW)	3981	3876	2,64	22,13
T8	V80(2000kW)	4233	4043	4,48	23,08
T9	V80(2000kW)	4050	4007	1,05	22,87
T10	V80(2000kW)	4030	3847	4,53	21,96
T11	V80(2000kW)	4874	4726	3,02	26,98
T12	V80(2000kW)	3333	3191	4,25	18,21
T13	V80(2000kW)	3470	3295	5,07	18,80
T14	V80(2000kW)	3775	3557	5,77	20,30
T15	V80(2000kW)	3693	3500	5,21	19,98
Santral	V80(30MW)	56366	54414	3,46	20,71

**Çizelge 5.35:** Durum 6 için Weibull parametreleri

Türbin	Kule Yük.	c [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]
T1	67m	6,10	1,72	5,42	220
T2	67m	6,60	1,76	5,88	274
T3	67m	5,40	1,60	4,85	174
T4	67m	6,30	1,64	5,60	258
T5	67m	7,10	1,63	6,35	378
T6	67m	6,40	1,60	5,74	288
T7	67m	6,70	1,53	6,02	352
T8	67m	6,90	1,42	6,25	439
T9	67m	6,70	1,38	6,08	428
T10	67m	6,70	1,65	5,99	314
T11	67m	7,40	1,77	6,63	390
T12	67m	6,20	1,65	5,55	248
T13	67m	6,30	1,62	5,69	276
T14	67m	6,50	1,63	5,86	297
T15	67m	6,50	1,57	5,81	306

Sonuç olarak. ölçüm aralıkları ve türbin tipleri değiştirilerek hesaplamalar yapılmıştır. Tanımlanan farklı durumlar için verilerin enerji üretim değerleri Tablo 5.36'da karşılaştırmalı olarak incelenebilmektedir. Bu tabloda, aynı türbin için. ölçüm aralıkları arttıkça enerji üretim değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Her bir türbinin kayıp değerlerinin artması veya azalması, türbinlerin araziye yerleşiminin değiştirilmesiyle mümkündür. Genel olarak her santral kurulumunda türbinlerin yaklaşık olarak aynı koordinatlara yerleştirilmesi sağlanmıştır. Çalışmada. türbin yerleşiminin en küçük bir değişimi tüm hesapları az da olsa değiştirdiği gözlenmiştir.

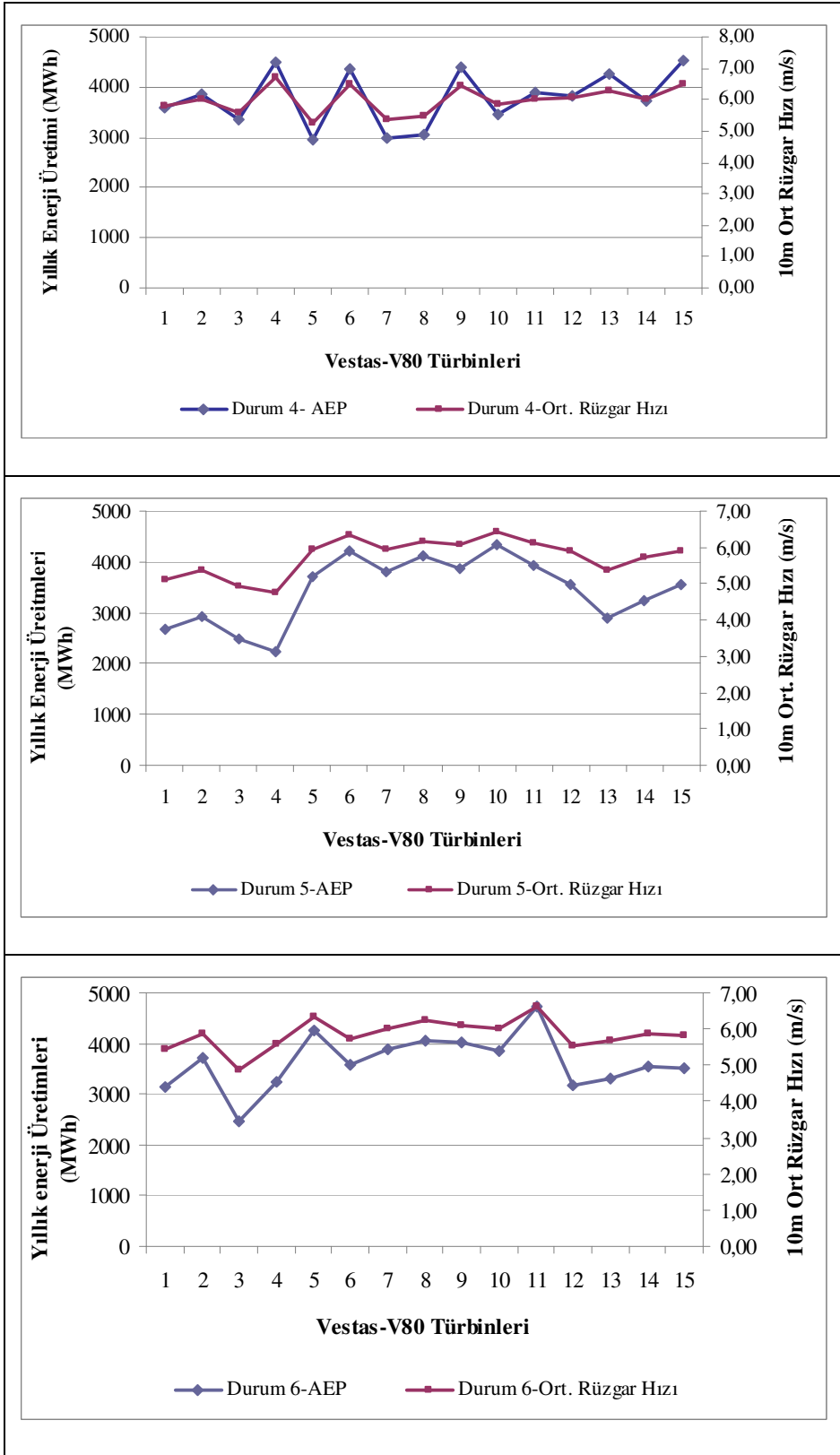


**Çizelge 5.36:** V63 ve V80 türbinleri için tanımlanan durumların karşılaştırmalı enerji üretim değerleri

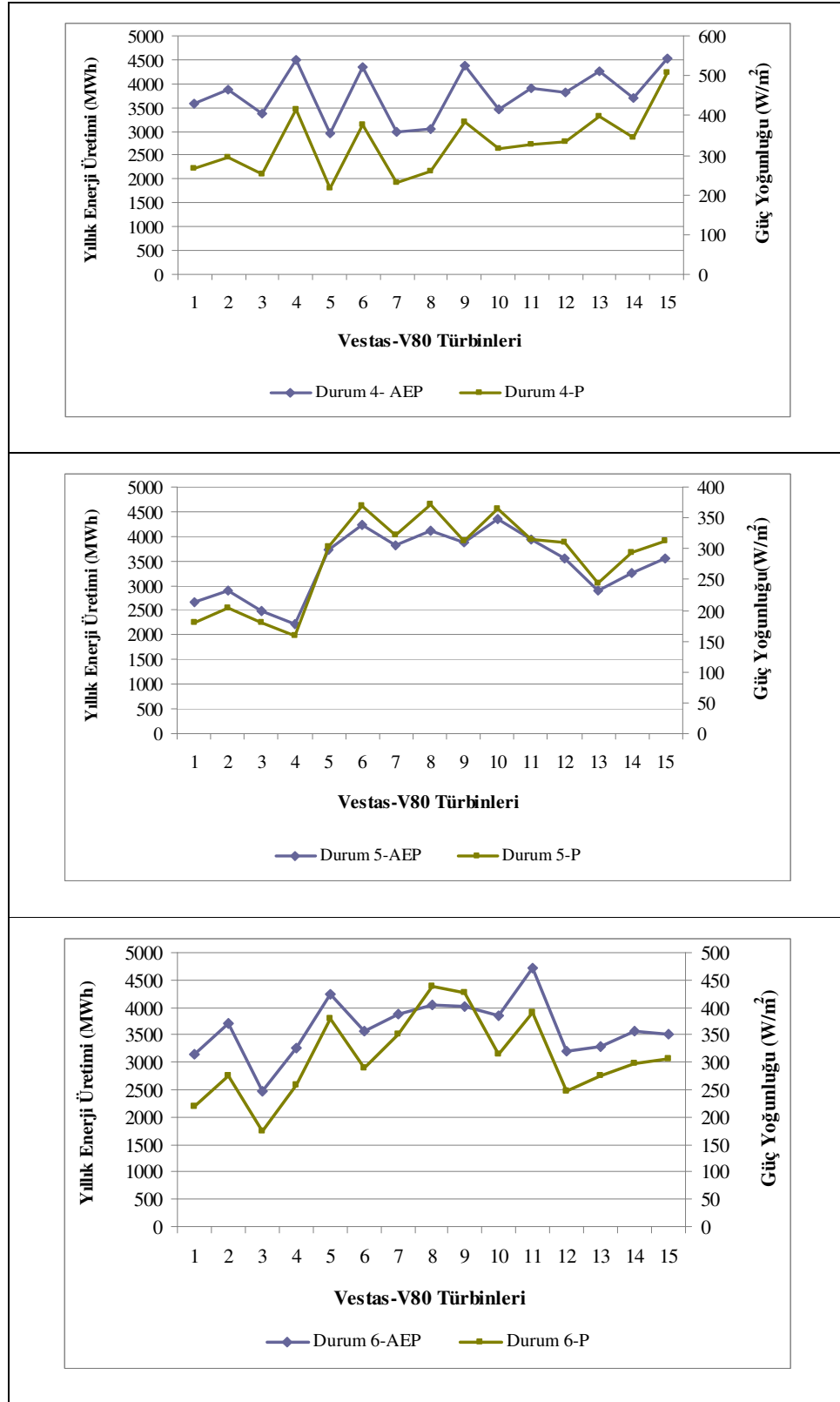
Durumlar	BrütAEP[MWh]	NetAEP[MWh]	Kayıp [%]
Durum 1	47907	46091	3,67
Durum 2	46310	44553	3,72
Durum 3	45322	43980	2,95
Durum 4	59091	56764	3,85
Durum 5	53940	51543	4,44
Durum 6	56366	54414	3,46
Durum 7	77092	74648	3,17
Durum 8	72,092	68373	5,16
Durum 9	68926	66467	3,57
Durum 10	85360	83012	2,73
Durum 11	85712	82649	3,53
Durum 12	78496	76123	3,03

Elde edilen enerji üretim değerleri, her durumdaki ayrı ayrı her türbin için bulunmuştur ve aynı zamanda rüzgar hızı ve güç yoğunluğu ile değişimleri ayrı ayrı grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil 5.22 'de bu hesaplamalar sonucunda elde edilen 10m rüzgar verileri kullanılarak V80 türbinlerine ait farklı zaman aralıklarında ortalama rüzgar hızı ve buna bağlı olarak yıllık üretilen enerji değerleri gösterilmektedir. Grafikte de gösterildiği gibi her ölçüm aralığına ait ortalama hızlar kırmızı ve enerji üretimleri ise mavi renkte gösterilmektedir. Buna göre, yıllık enerji üretimlerinin hızlarla aynı doğrultuda değiştiği söylenebilir. Şekil 5.23 ise aynı durumlara ait güç yoğunlukları ile yıllık net enerji üretimlerini göstermektedir.

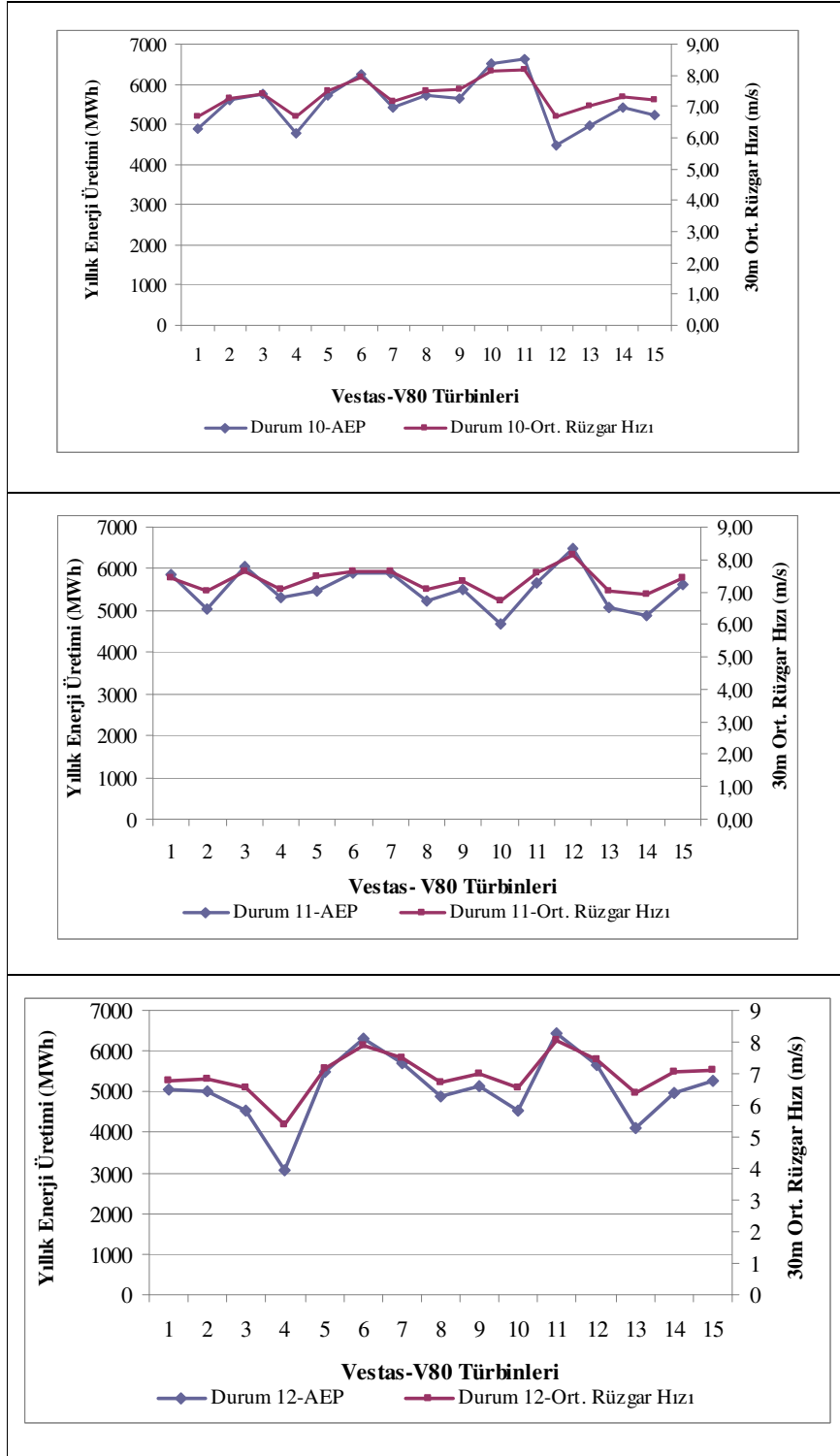


Şekil 5.22: Durum 4-5-6 için ortalama rüzgar hızı ve yıllık enerji üretim değerleri



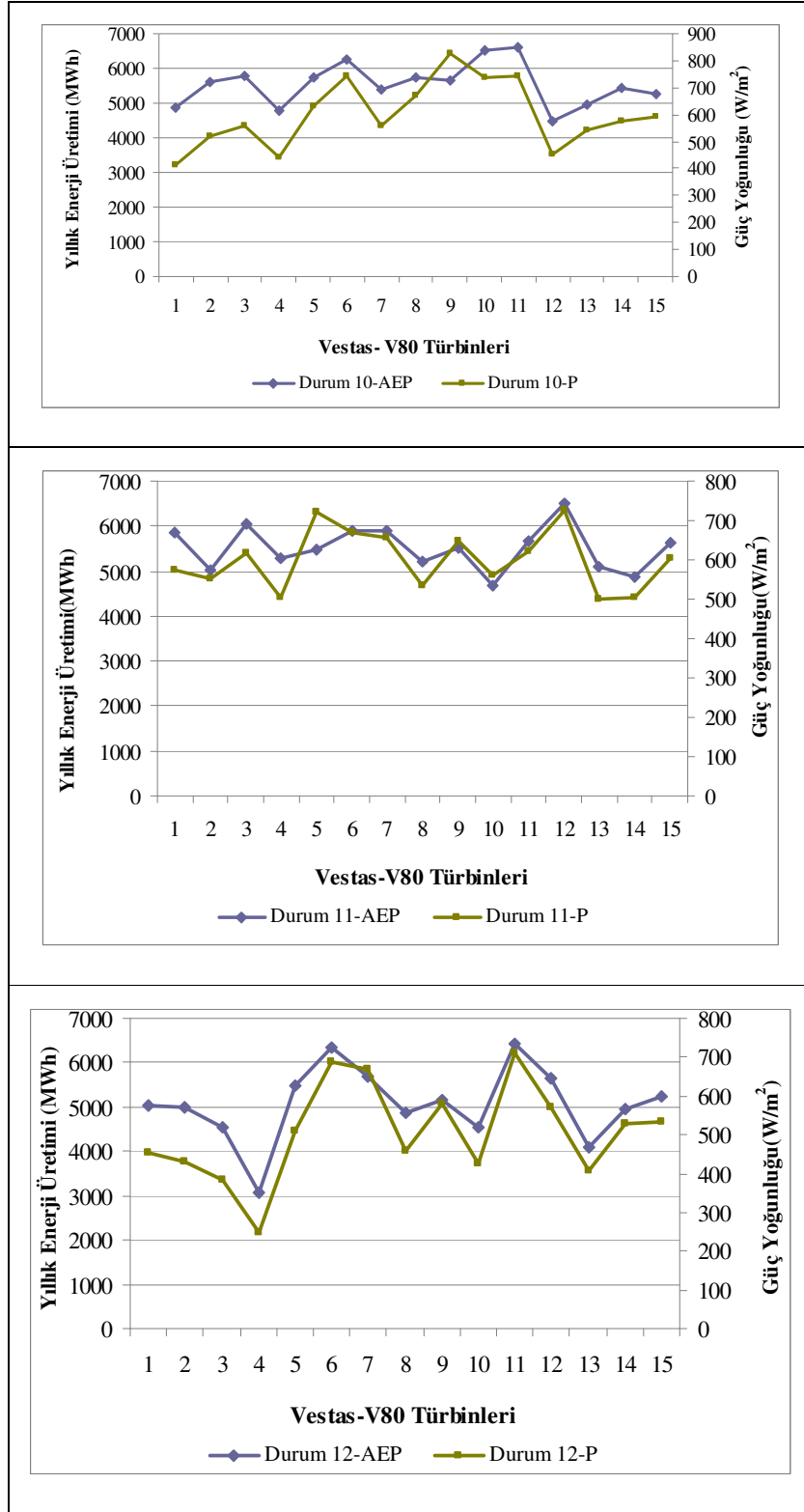
Şekil 5.23: Durum 4-5-6 için güç yoğunlukları ve yıllık enerji üretim değerleri

30m yükseklikteki veriler kullanılarak oluşturulan santrallerden V80 türbini olan için ayrıntılı ortalama rüzgar hızı ve enerji üretimleri Şekil 5.24'te gösterilmektedir.



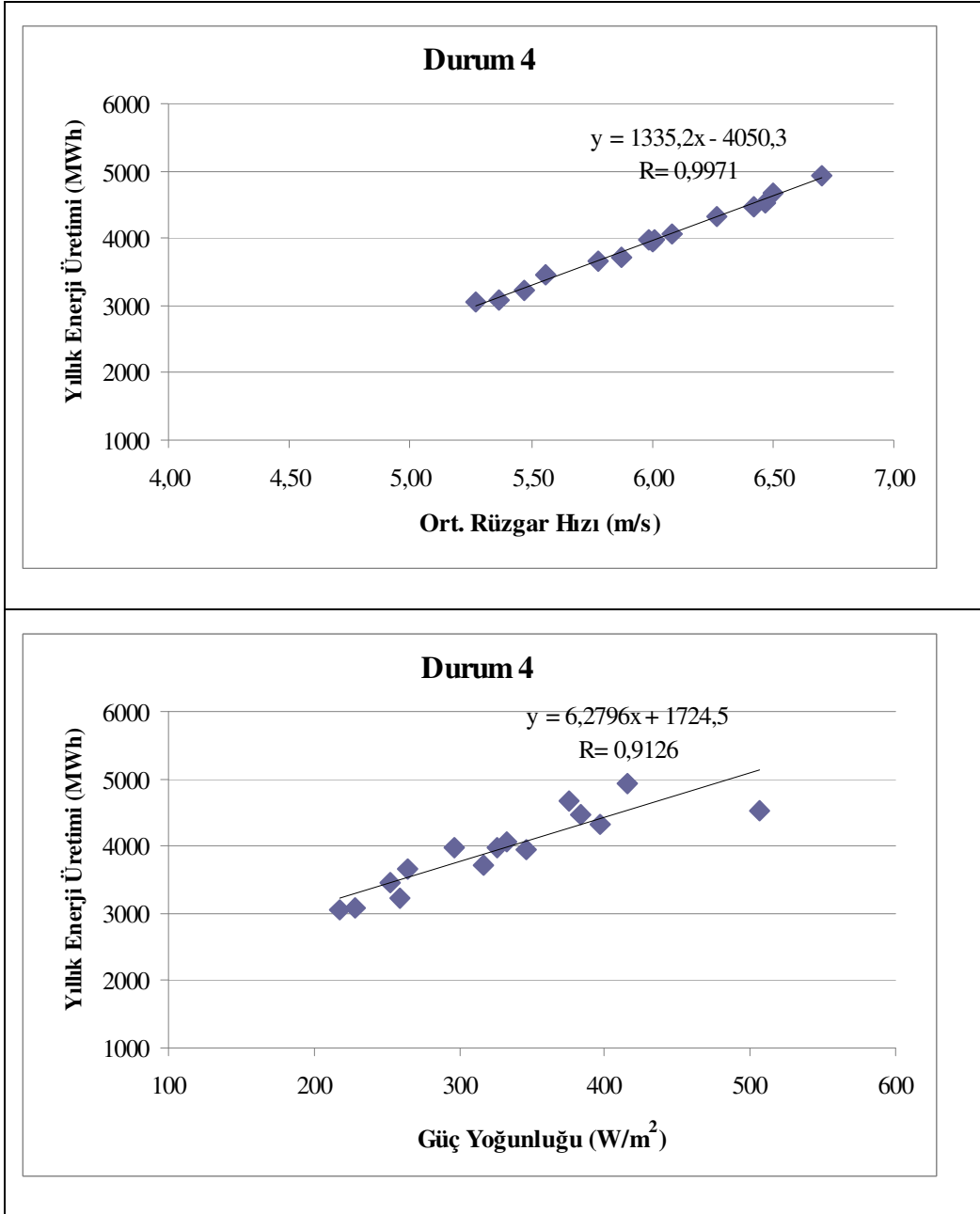
Şekil 5.24: Durum 10-11-12 için ortalama rüzgar hızı ve yıllık enerji üretim değerleri

Durum 10-11-12 için her bir türbine ait güç yoğunluklarına göre yıllık enerji üretimlerinin değişimleri Şekil 5.25'te gösterilmektedir.



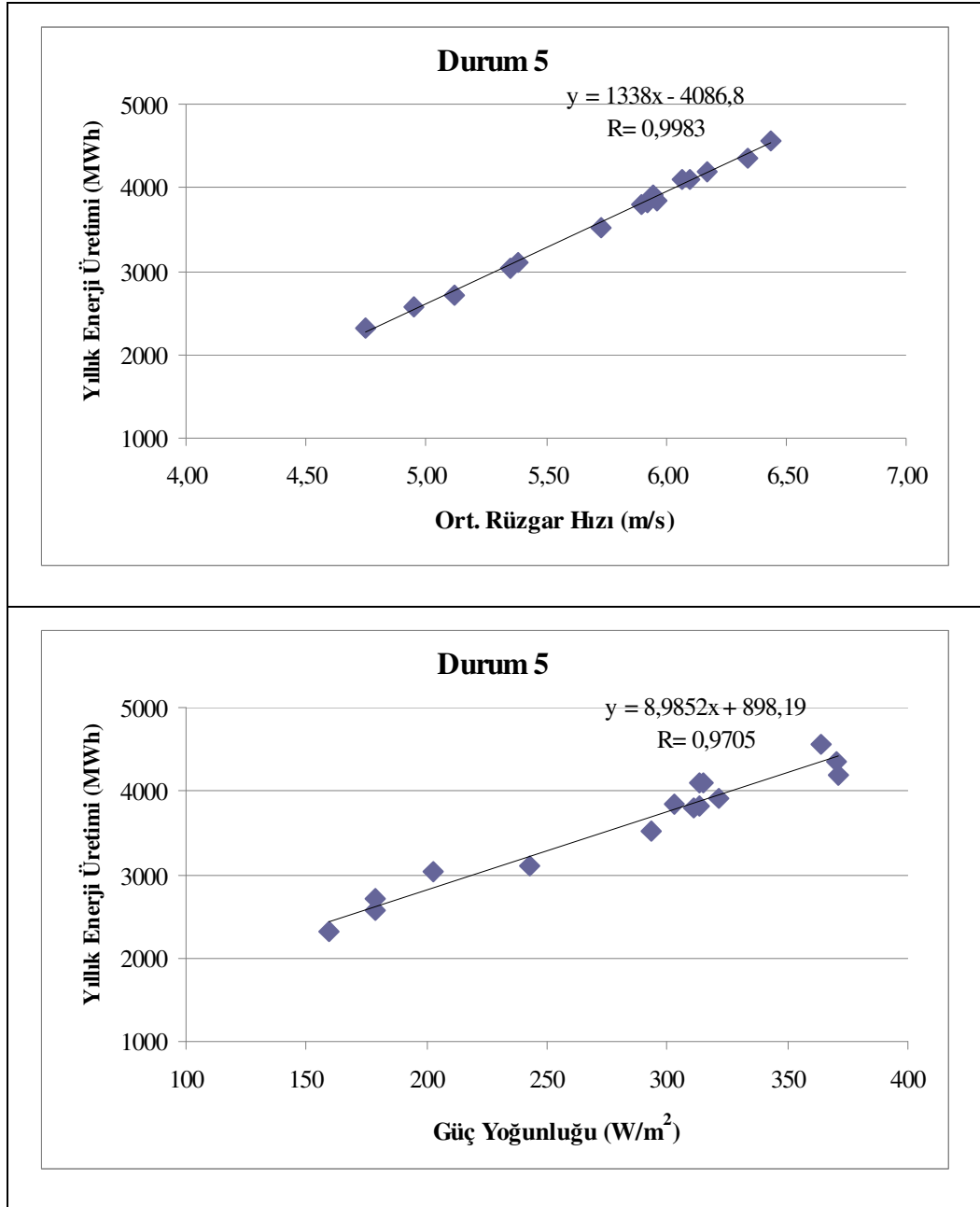
Şekil 5.25: Durum 10-11-12 için güç yoğunlukları ve yıllık enerji üretim değişimleri

Türbinler ve rüzgar verilerinin farklı zaman aralıklarına ait ortalama rüzgar hızı- yıllık enerji üretimleri ve güç yoğunluğu- yıllık enerji üretimleri Durum 4-5-6 ve 10-11-12 için ayrı ayrı grafikselleştirilmiştir. Durum 4 için ortalama rüzgar hızı-yıllık enerji üretimi grafiği ile güç yoğunluğu- yıllık enerji üretim grafikleri Şekil 5.26'da gösterilmektedir.



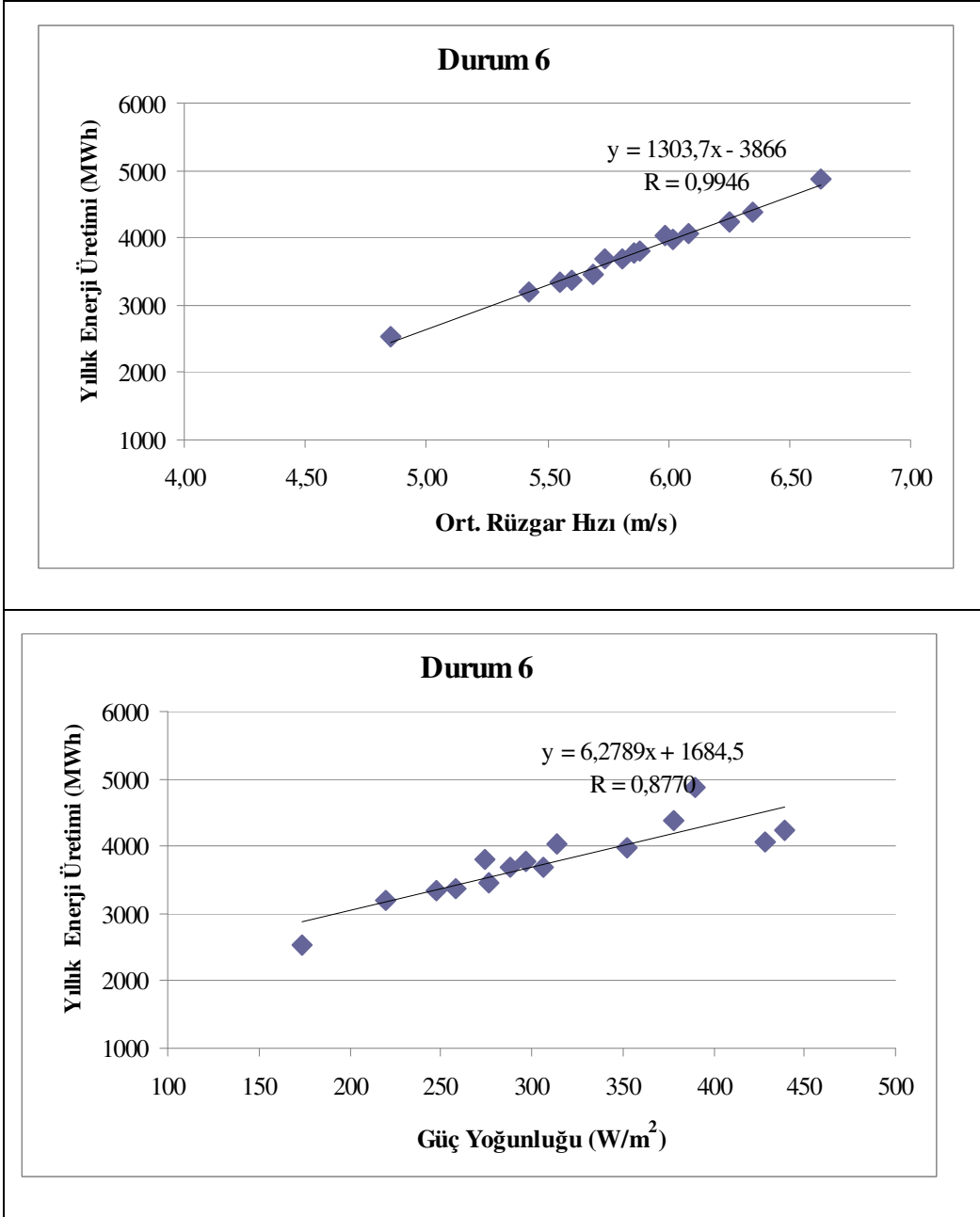
Şekil 5.26: Durum 4 için yıllık enerji üretim değişimleri

Durum 5 için yıllık enerji grafikleri ise Şekil 5.27’de gösterilmektedir.



Şekil 5.27: Durum 5 için yıllık enerji üretimleri

Durum 6 için yıllık enerji üretimleri ise Şekil 5.28’de gösterilmektedir.



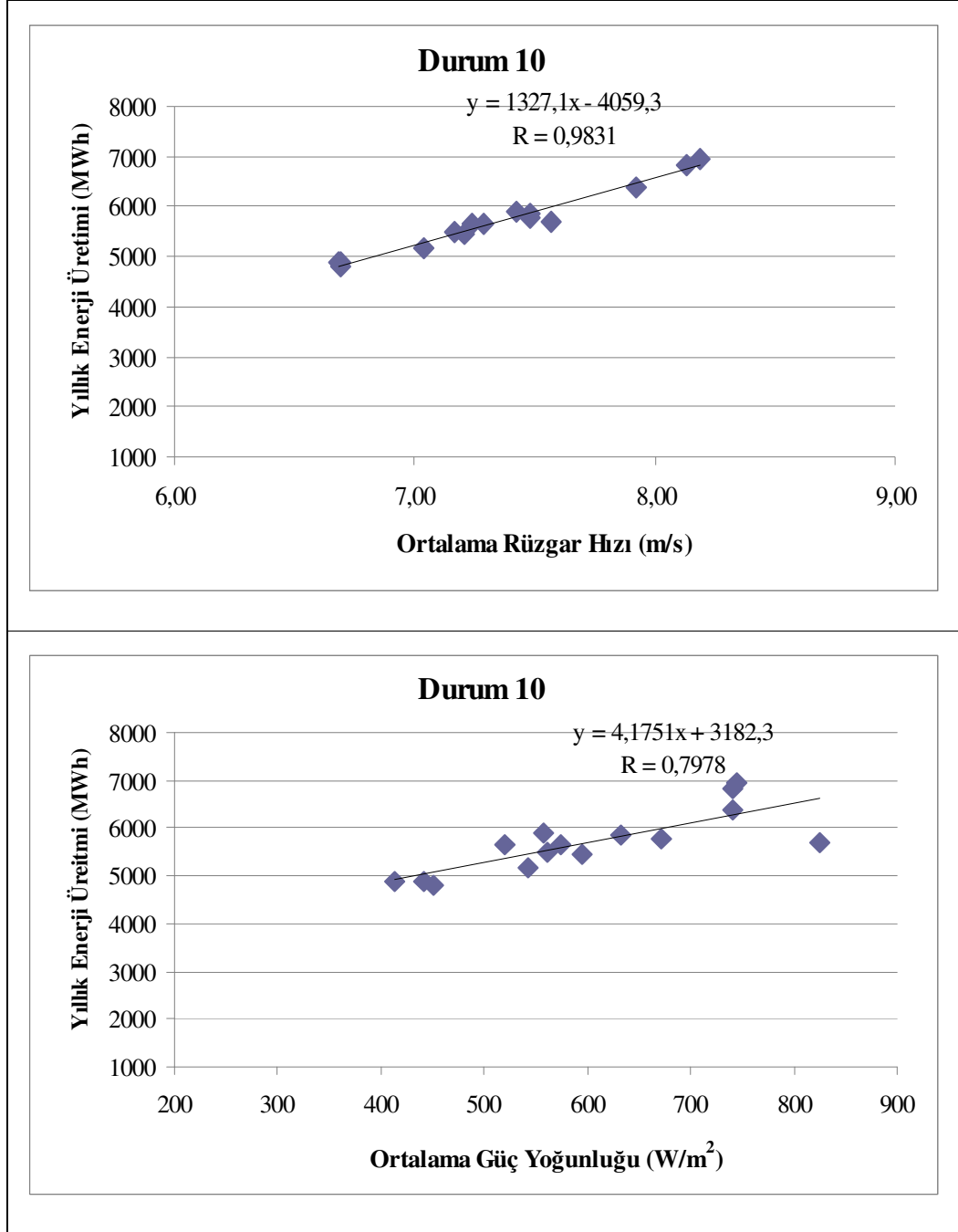
**Şekil 5.28:** Durum 6 için yıllık enerji üretimleri

10m yükseklikteki rüzgar hızı verilerinin farklı zaman aralıklarındaki V80 türbini için belirlenen durumlar incelendiğinde, bu durumlarda ortalama rüzgar hızının 4,5m/s ‘nin altına düşmediği gözlenmiştir. Her bir dağılım için R eğilim çizgisi uygulanmıştır. Ortalama hız grafiklerindeki eğilim çizgisi uygunluğunun güç yoğunluğu grafiklerine göre daha fazla çıktığı gözlenmiştir. V80 türbini için



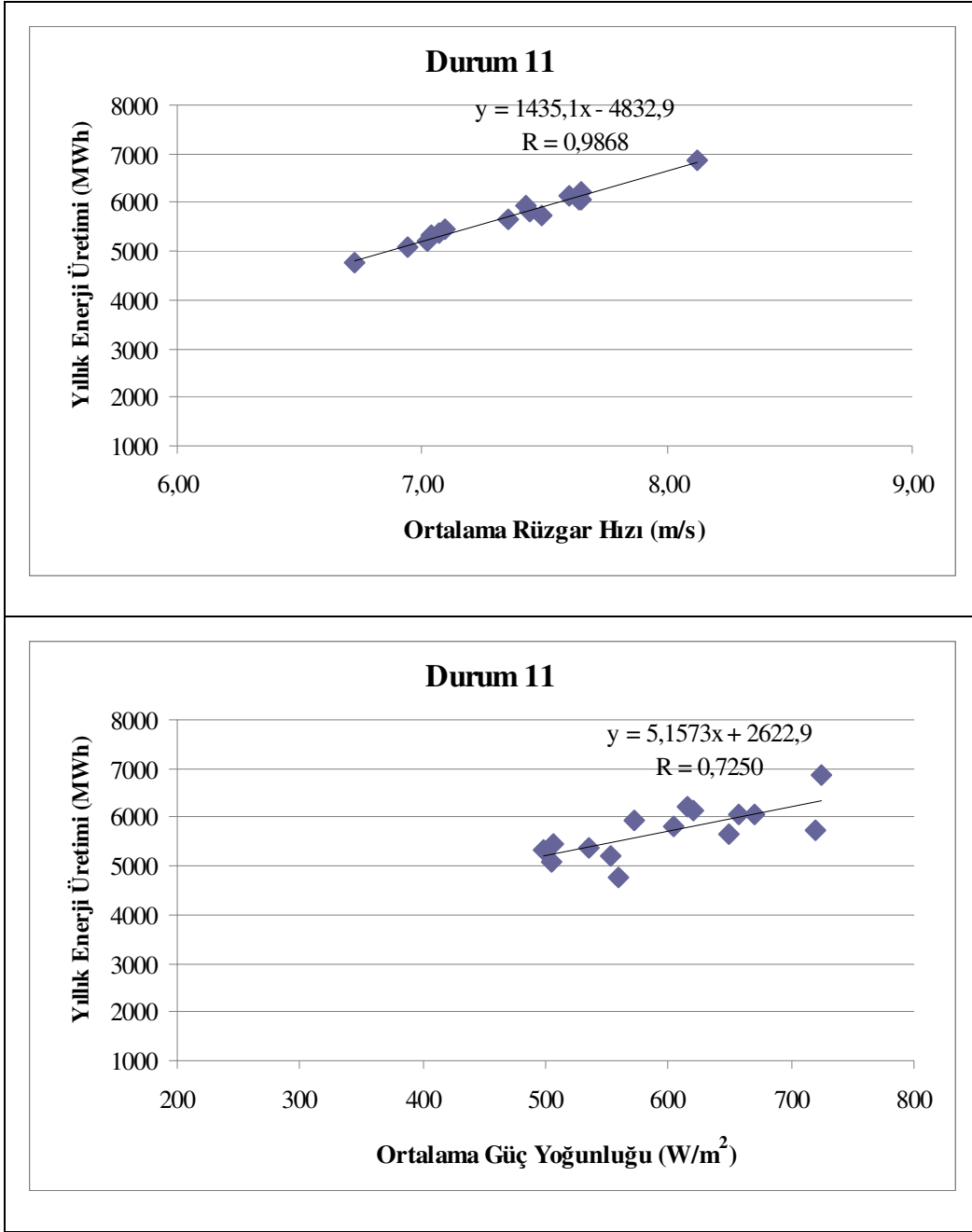
tanımlanan durumlardan 10-11-12 için de ayrı ayrı ortalama hız-yıllık enerji üretimi ve güç yoğunluğu-yıllık enerji üretim grafikleri oluşturulmuştur.

Durum 10 için yıllık enerji üretim değişimleri Şekil 5.29'da gösterilmektedir.



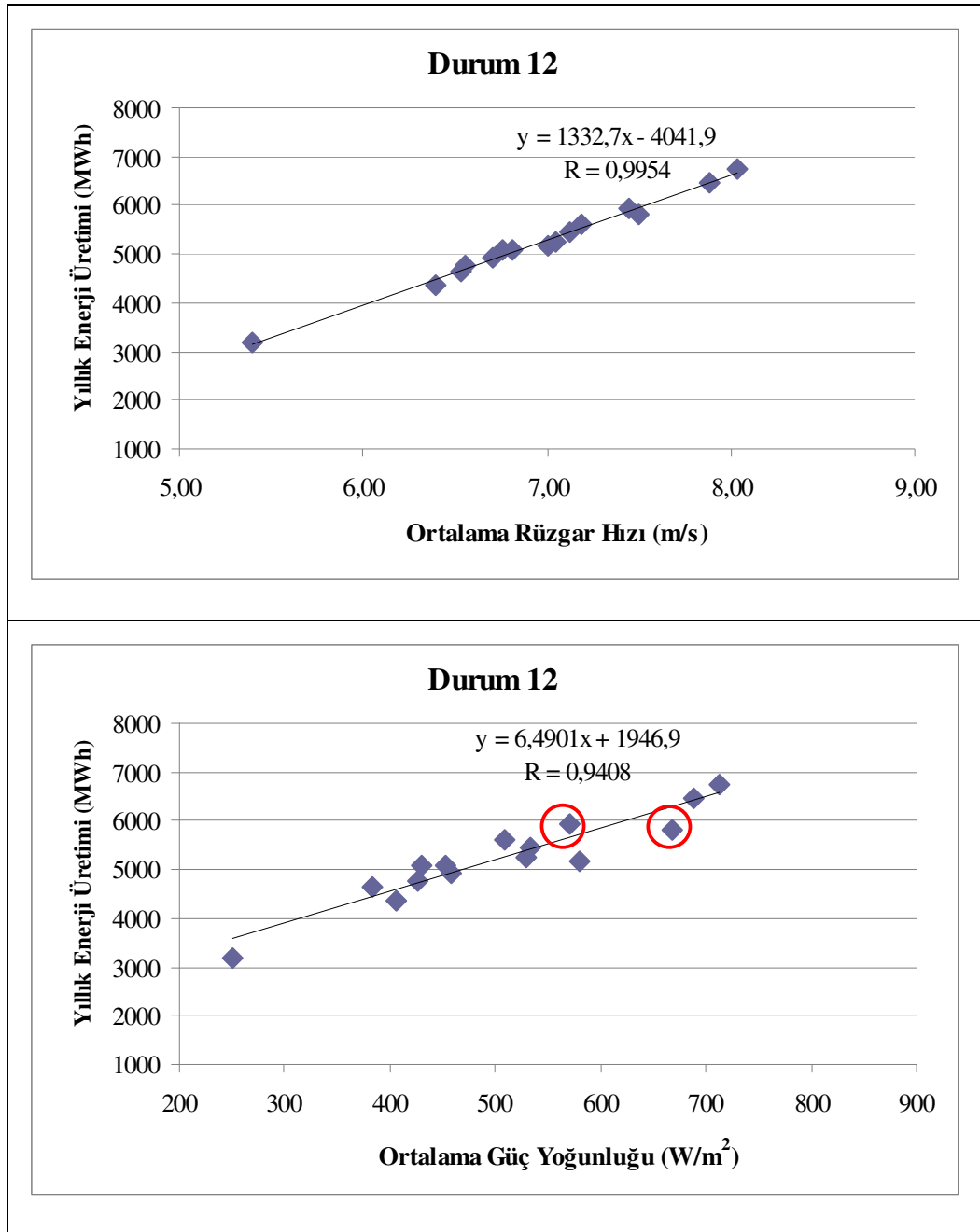
Şekil 5.29: Durum 10 için yıllık enerji üretimleri

Durum 11 için yıllık enerji üretimi değişimleri ve R eğilim çizgisi ve değerleri Şekil 5.30'da gösterilmektedir.



Şekil 5.30: Durum 11 için yıllık enerji üretimleri

Durum 12 için yıllık enerji üretimleri ise Şekil 5.31’de gösterilmektedir.



Şekil 5.31: Durum 12 için yıllık enerji üretimleri

V80 türbini için, farklı zaman aralıklarında, 30m yükseklikteki rüzgar hızı verilerinden elde edilen yıllık enerji üretim değişimleri grafiklerinde de görüldüğü gibi, ortalama rüzgar hızları tüm durumlar için 5m/s’den fazladır. Buna göre, 10m’deki durumlara göre daha yüksek olduğu söylenebilir. Eğilim çizgilerinin 0-1

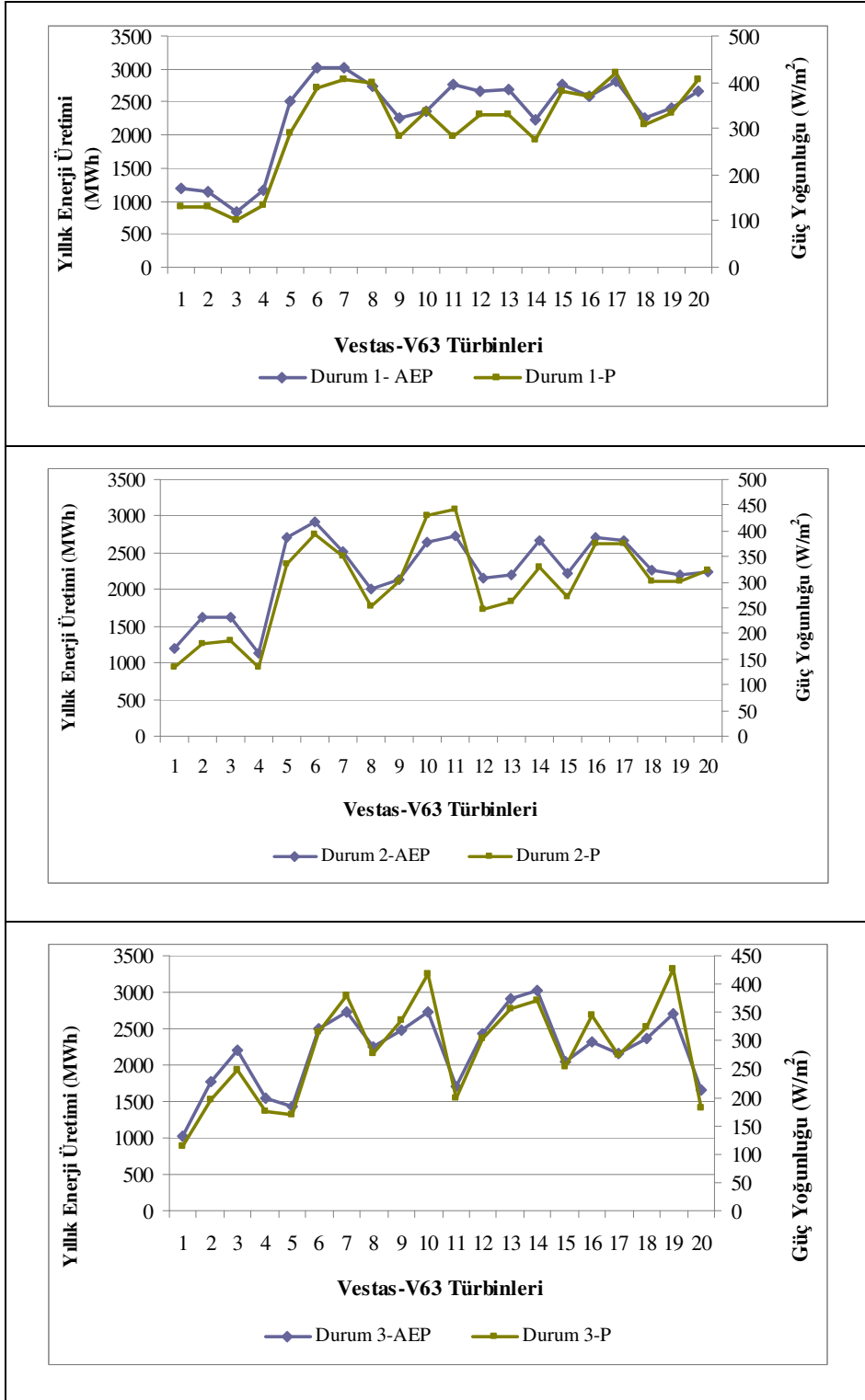
arasında olması gerektiğine göre, bu grafikleri de gerçek değerlere en yakın eğilim çizgileri elde edilmiştir.

Genel olarak güç yoğunluğu-enerji üretimi dağılım grafikleri incelendiğinde, enerji üretiminin güç yoğunluğuna bağlı olarak değiştiği söylenemez. Şekil 5.31'den de görüldüğü gibi, kırmızı daireler içerisinde bulunan güç yoğunluğu değerleri, yaklaşık olarak aynı enerji üretim değerlerine sahiptir, bu nedenle güç yoğunluğu dağılımının enerji üretim değerleri için uygun bir dağılım olmadığı söylenebilir.

V63 türbinlerinin her birinin 10m ve 30m farklı zaman aralıklarının farklı durumlarının ortalama rüzgar hızı-yıllık enerji üretimi ve güç yoğunluğu-yıllık enerji üretimi değerlerinin değişimleri tek tek grafikselleştirilmiştir. Şekil 5.32'de Durum1-2-3 'leri ortalama rüzgar hızlarıyla yıllık enerji üretimlerinin değişimleri gösterilmektedir.

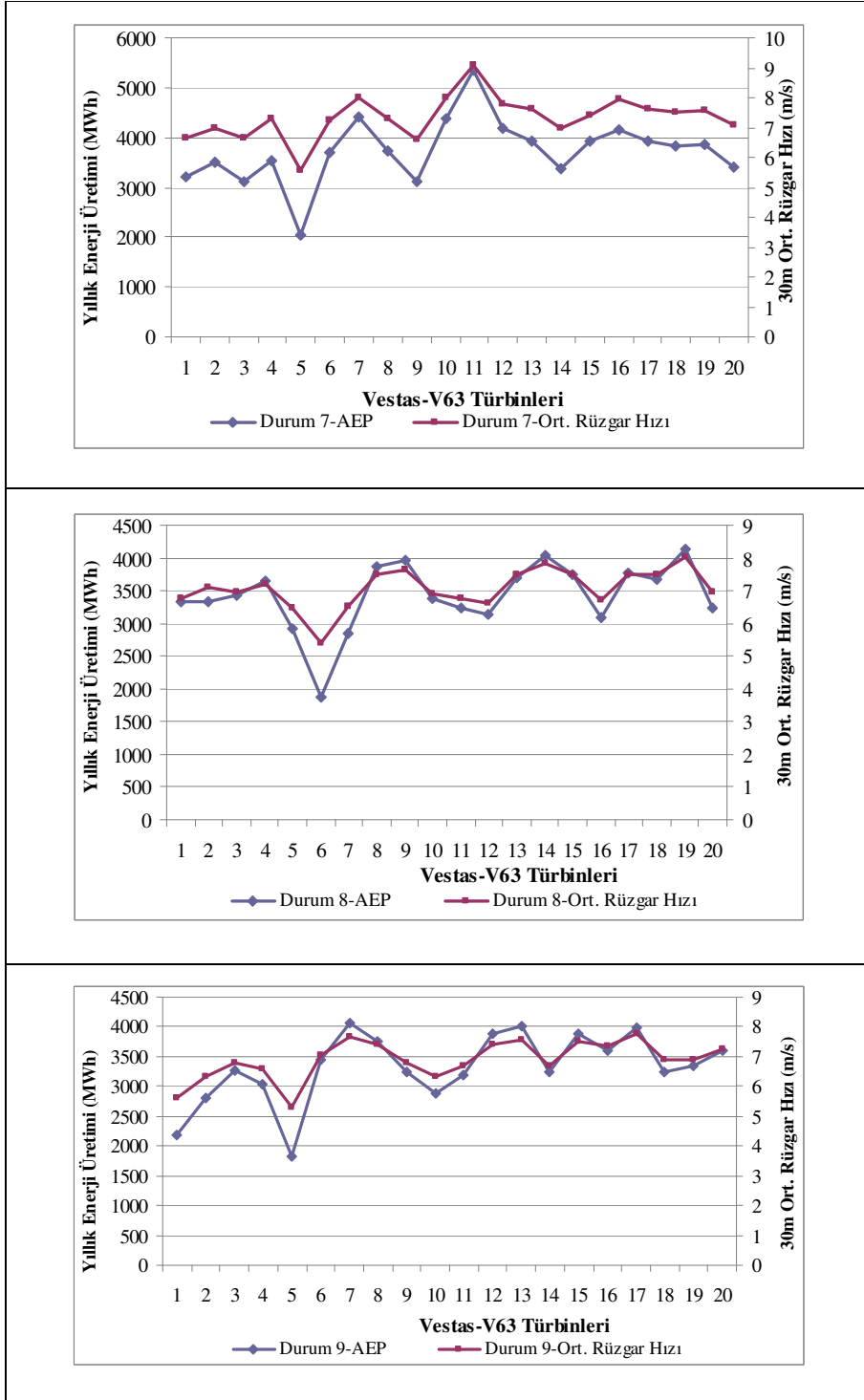


1-2-3 Durumları için güç yoğunluklarına göre yıllık enerji üretim değişimleri Şekil 5.33'te gösterilmektedir.



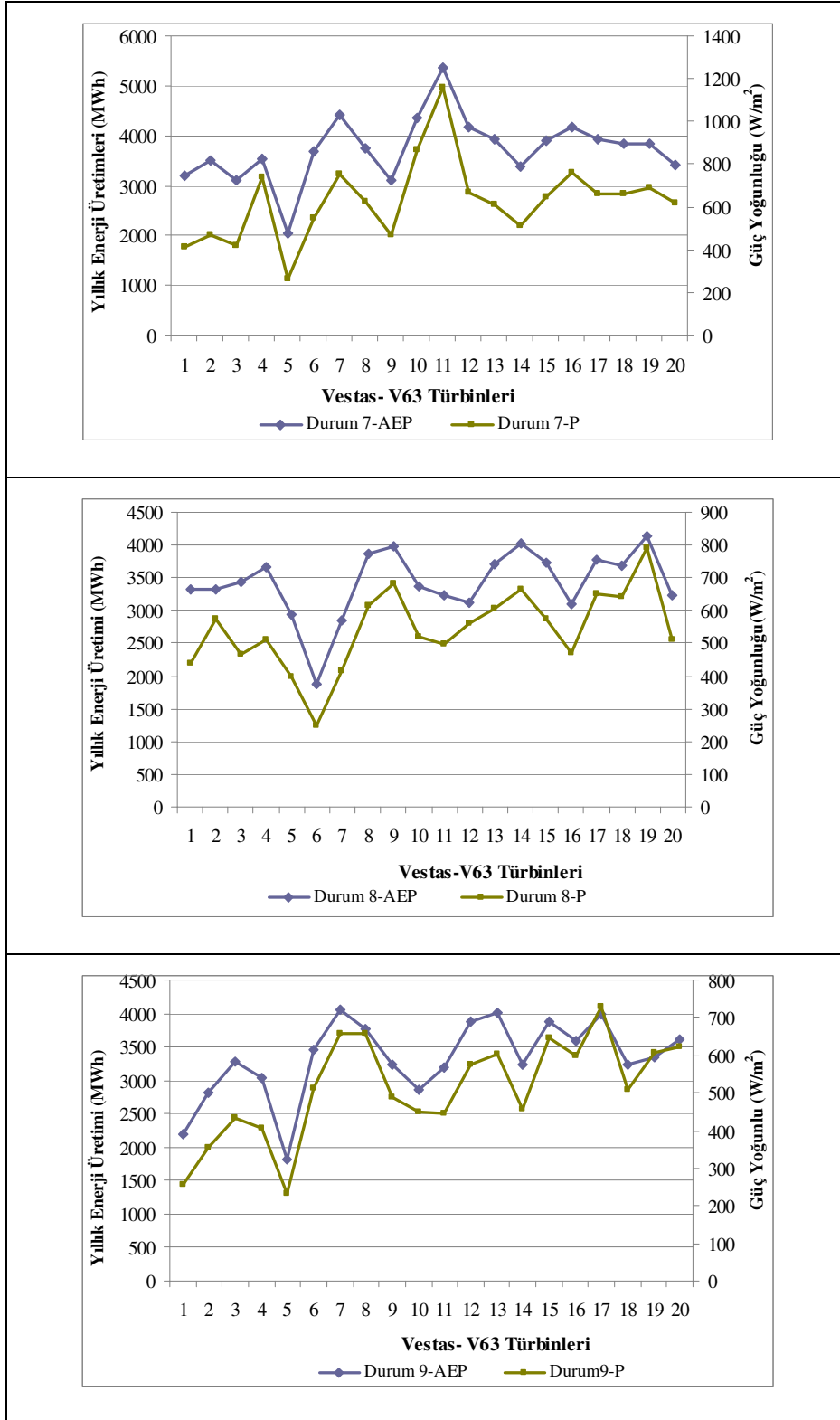
Şekil 5.33: Durum1-2-3 için güç yoğunlukları ile birlikte yıllık enerji üretimi değişimleri

V63 türbinleri için 30m yükseklikteki rüzgar hızı verileri kullanılarak elde edilen Durum 7-8-9 için ort. rüzgar hızı ve yıllık enerji değişimleri Şekil 5.34'te gösterilmektedir.



Şekil 5.34: Durum 7-8-9 için ort. rüzgar hızı ve yıllık enerji üretimleri

7.. 8. ve 9. durumlar için güç yoğunlukları-yıllık enerji üretim değerleri değişimleri ise Şekil 5.35'te gösterilmektedir.

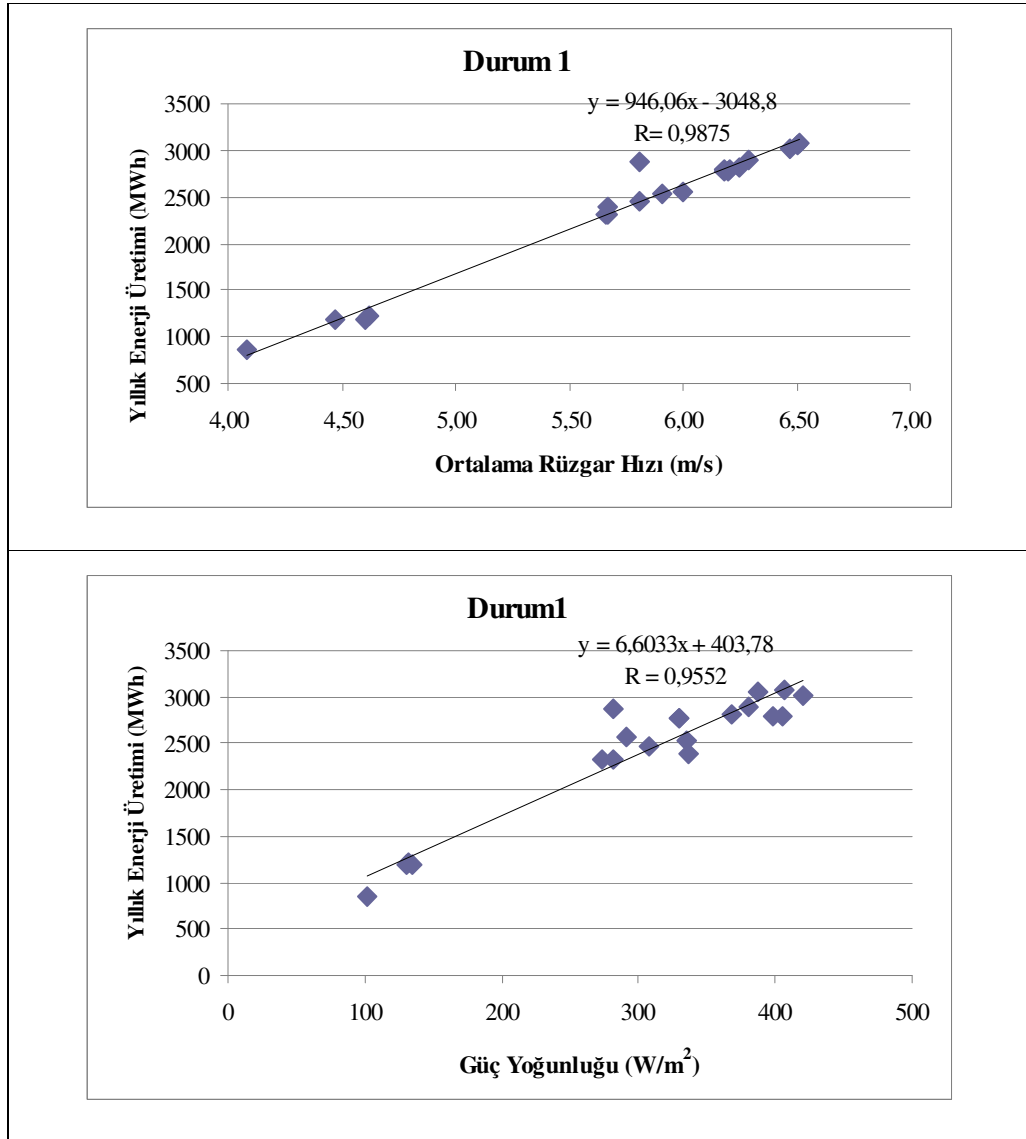


Şekil 5.35: Durum 7-8-9 için güç yoğunlukları ve yıllık enerji üretimleri



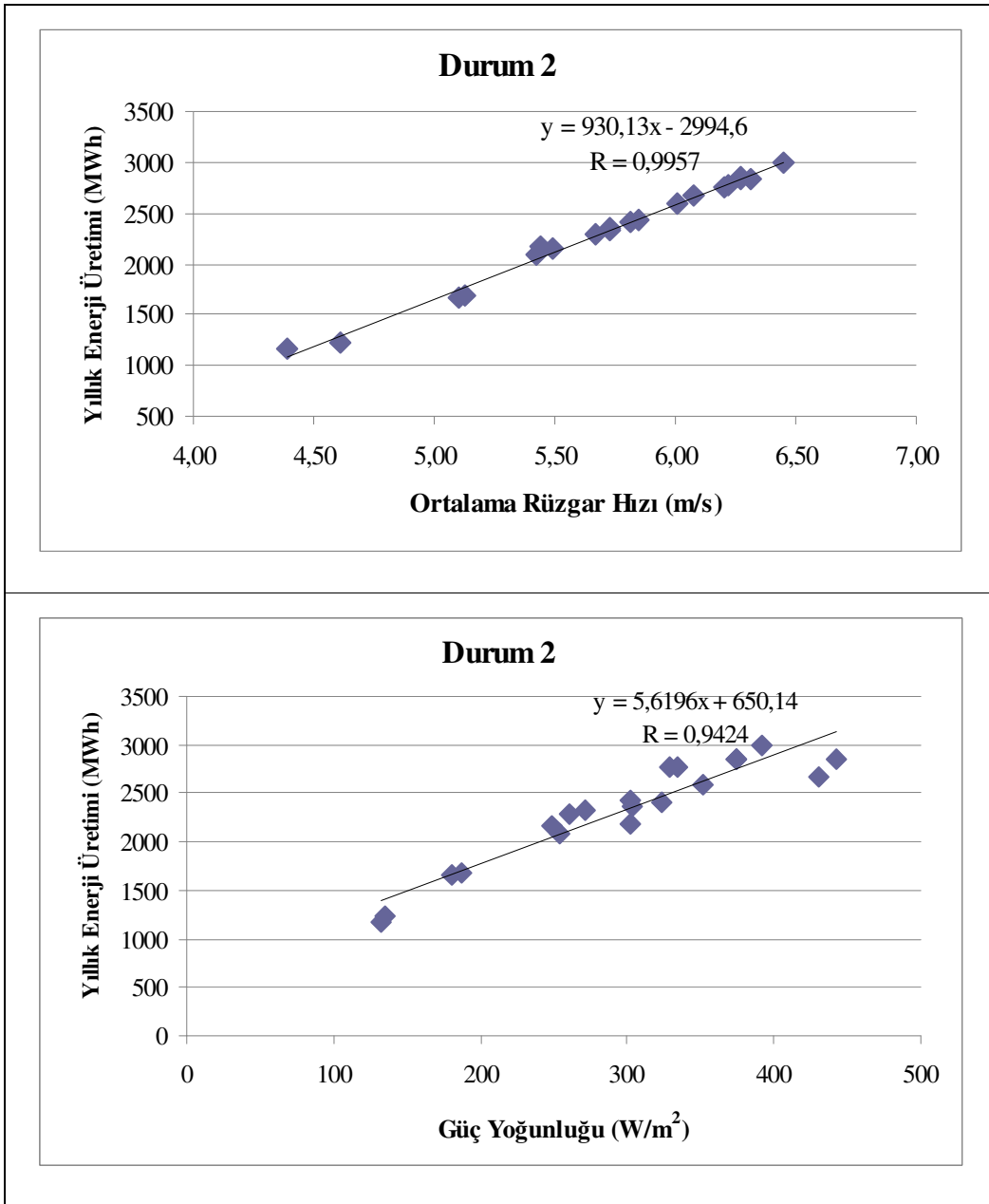
Yukarıda gösterilen tüm grafiklerde yıllık enerji üretiminin değişiminin yaklaşık olarak ortalama rüzgar hızları ve güç yoğunluklarının değişimi ile paralel olarak değiştiği gözlenmektedir.

V63 Türbinleri ve rüzgar verilerininin farklı zaman aralıklarına ait ortalama rüzgar hızı- yıllık enerji üretimleri ve güç yoğunluğu- yıllık enerji üretimleri Durum 1-2-3 ve 7-8-9 için ayrı ayrı grafikselleştirilmiştir. Durum1 için ortalama rüzgar hızı-yıllık enerji üretimi grafiği ile güç yoğunluğu- yıllık enerji üretim grafikleri ve gerçek değerlere yakın R eğrileri Şekil 5.36'da gösterilmektedir.



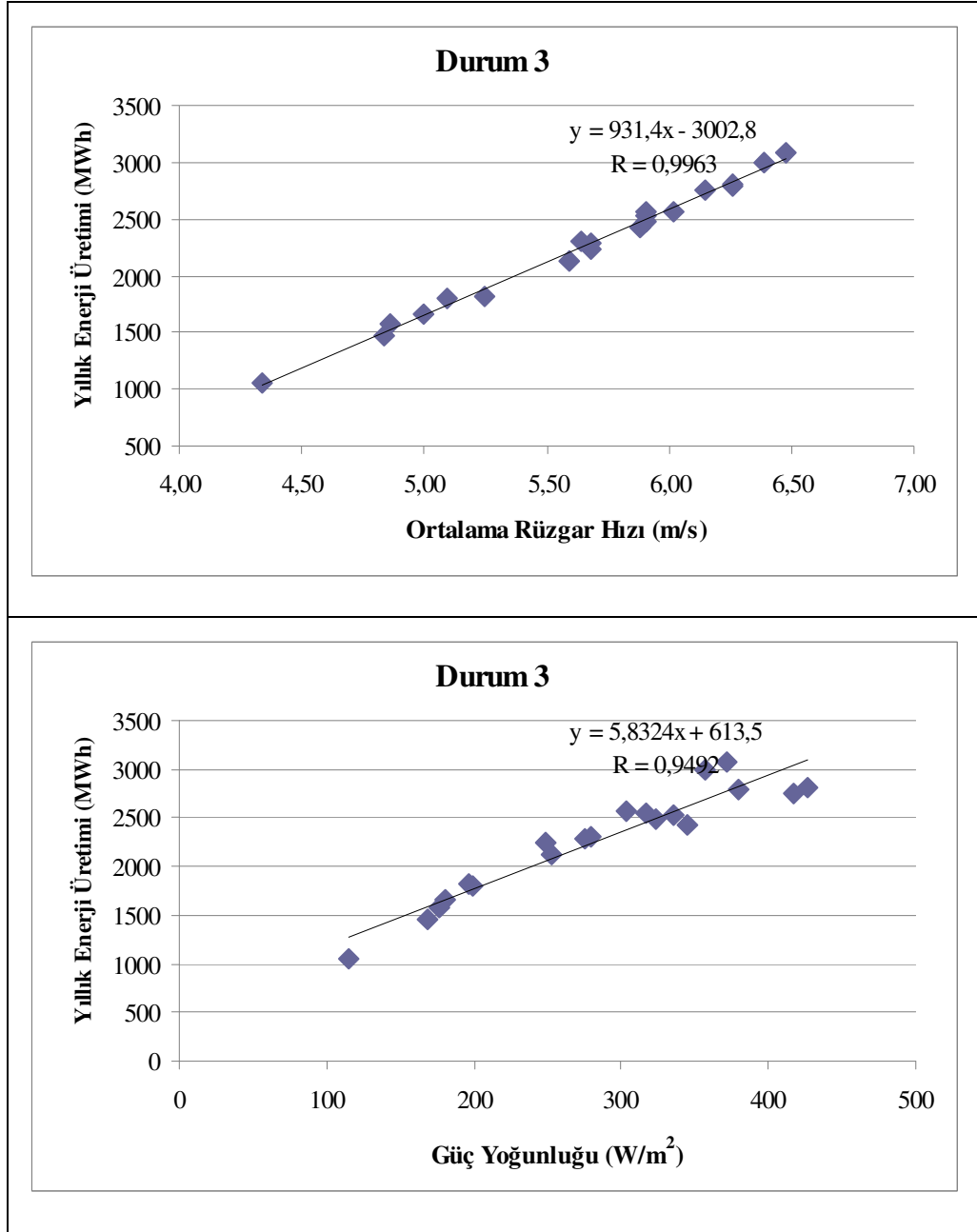
Şekil 5.36: Durum 1 için yıllık enerji üretimleri

Durum 2 için yıllık enerji üretim değişimleri ise Şekil 5.37'de gösterilmektedir.



Şekil 5.37: Durum 2 için yıllık enerji üretimleri

Şekil 5.38 ise, 3. durum için yıllık enerji üretimlerinin ortalama hıza ve güç yoğunluklarına bağlı olarak değişimlerini göstermektedir.

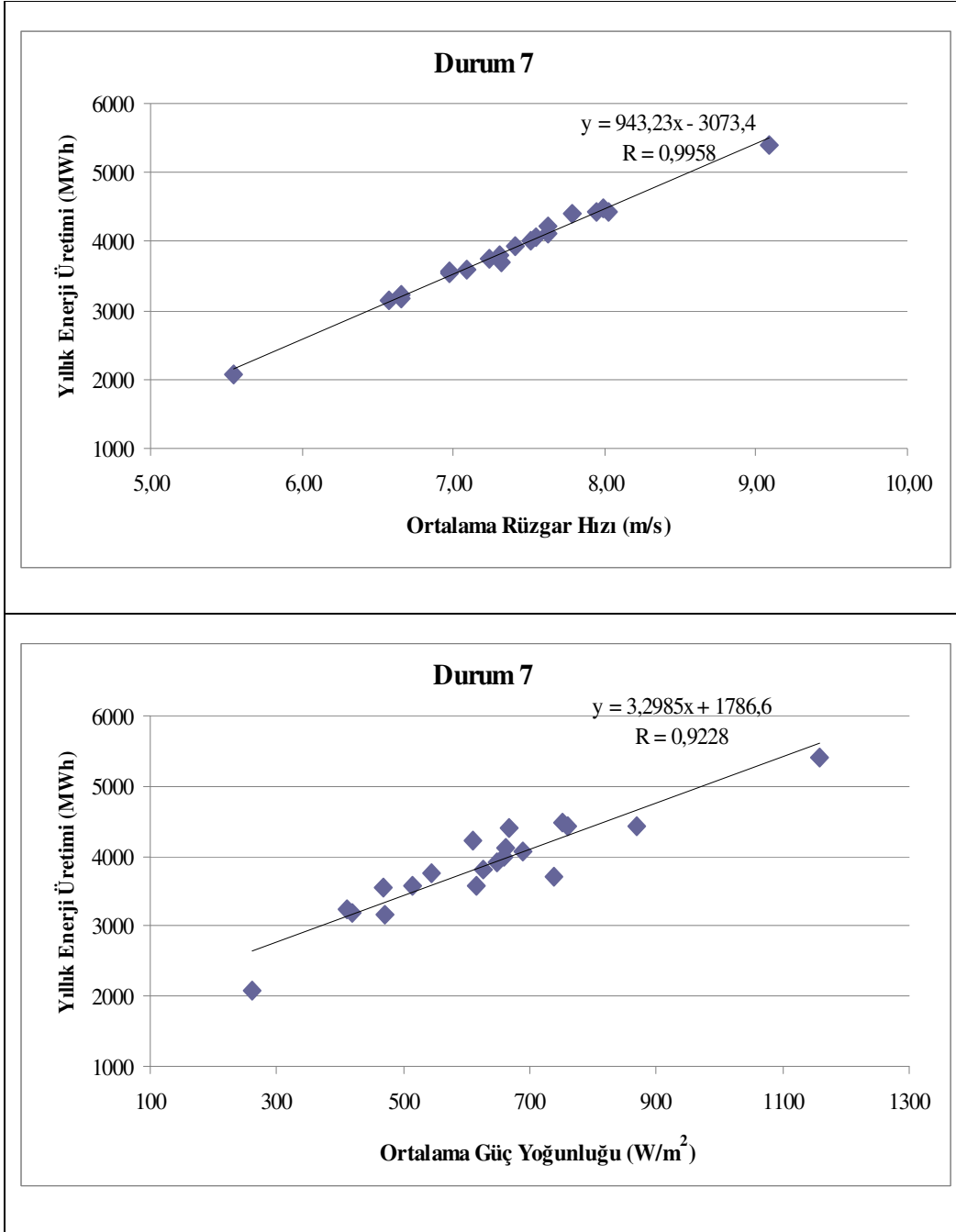


Şekil 5.38: Durum 3 için yıllık enerji üretimleri

1.2. ve 3. durumlar incelendiğinde ortalama rüzgar hızlarının 4m/s nin altına düşmediği gözlenmektedir. Ortalama rüzgar hızı verileri için gerçek değerlere en yakın çizilen eğri ise 3. durum için çizilen 0,9963 değeri ile en iyi eğri uyumudur..

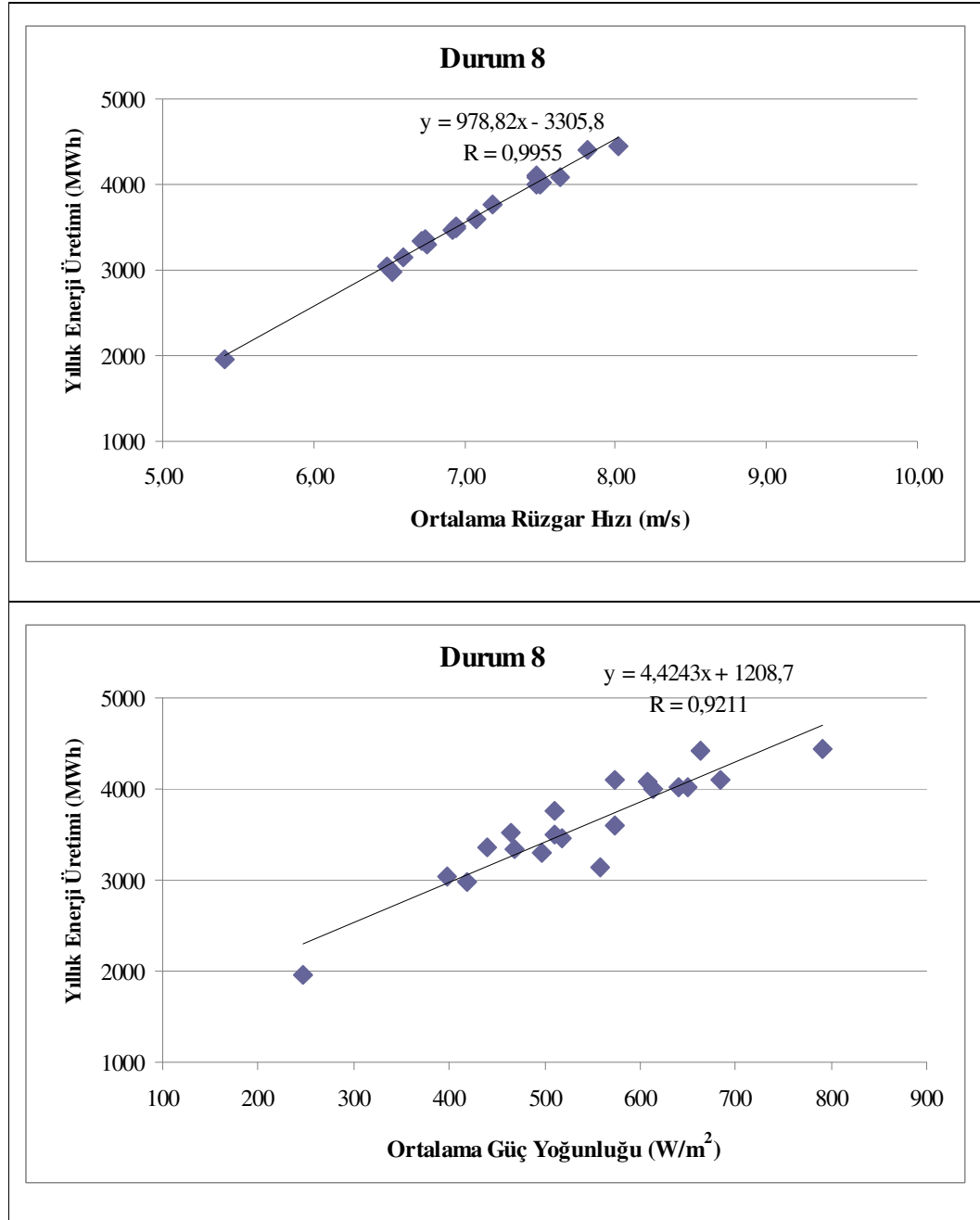
V63 türbinlerinin 30m yükseklikteki veriler kullanılarak tanımlanan 7. 8. ve 9. durumlar için ortalama rüzgar hızına ve güç yoğunluklarına bağlı olarak değişimi

grafiksel olarak çizilmiş ve bu dağılımlardaki R değerleri yaklaşık bulunup eğrileri de dağılım grafikler üzerinde gösterilmiştir. 7. durum için elde edilen yıllık enerji üretim değerleri Şekil 5.39'da gösterilmiştir.



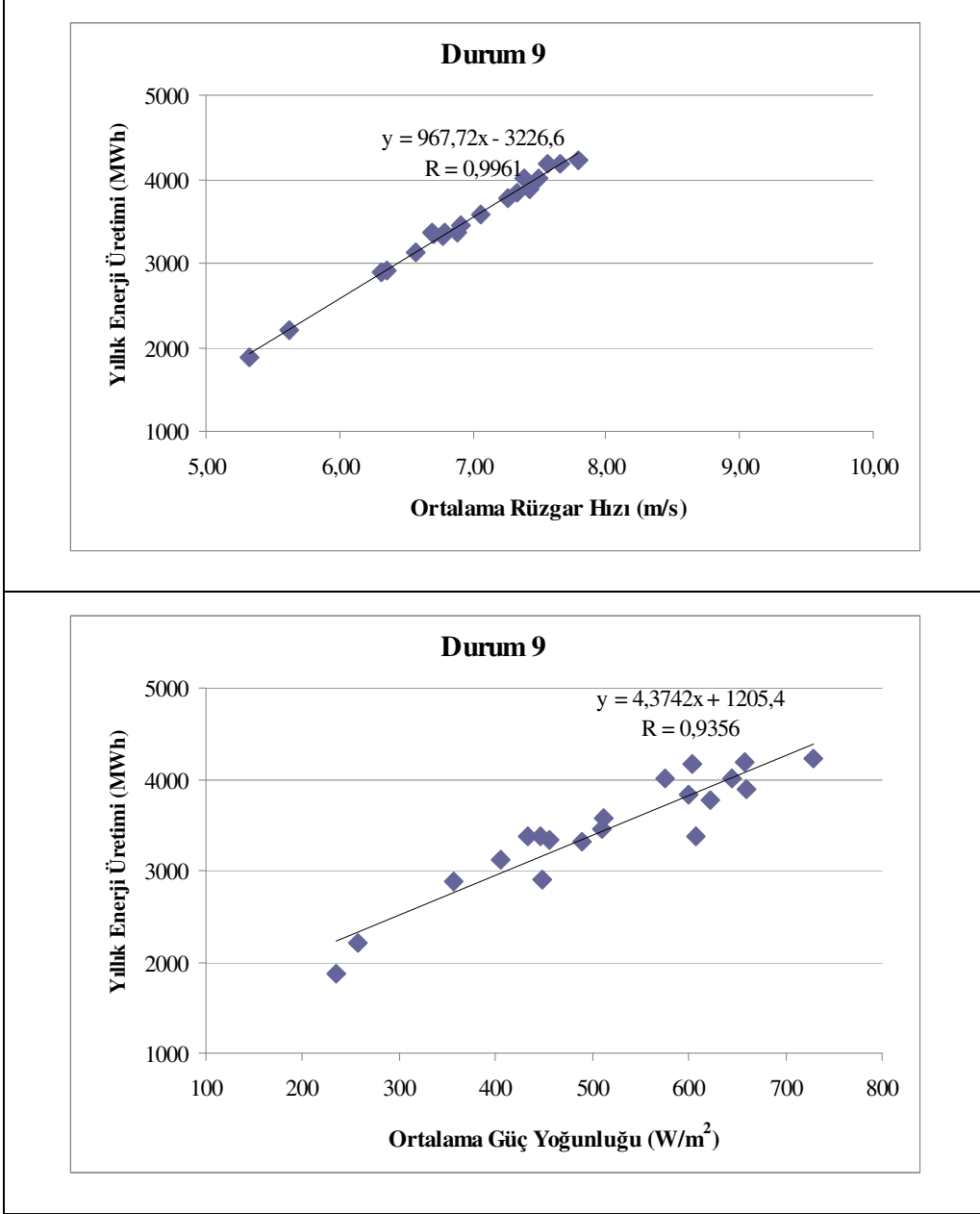
Şekil 5.39: Durum 7 için yıllık enerji üretimleri

8. Durum için yıllık enerji üretimleri ise Şekil 5.40'da gösterilmektedir.



Şekil 5.40: Durum 8 için yıllık enerji üretimleri

9. Durum için üretilen yıllık net enerji değişimleri Şekil 5.41’de gösterilmektedir.



Şekil 5.41: Durum 9 için yıllık enerji üretimleri

7.8. ve 9. durumlar incelendiğinde, tüm durumlar için ortalama rüzgar hızları yaklaşık olarak 5,5 m/s civarında olduğu gözlenmektedir. En yüksek R değeri ise 0,9961 değeri ile 9. durum rüzgar hızı –enerji üretimi grafiğinde hesaplanmıştır.

WASP’tan elde edilen bu enerji üretim değerlerine göre kurulması düşünülen santral için. verilerimizin hangi zaman aralıklarında ölçülmesi gerektiği, hangi türbin tipinin kullanılmasının uygun olduğu ve ayrıca türbinlerin konumunun nasıl olması

gerektiğine karar verilebilir. Bunun yanında elde edilen üretim değerleri kullanılarak kapasite faktörleri de bulunup en uygun olan türbinin santral için kullanılabilirliğine karar verilebilir.

Yapılan bu hesaplamalarda 10m ve 30m yüksekliklerdeki ortalama rüzgar hızları farklı zaman aralıklarında ayrı ayrı incelenmiştir ve farklı üretim değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada üretim değerleri üzerinde Helmann katsayılarının değişimi de ayrıca incelenmiştir. Bunu yapmak için 10m ve 30m'deki veriler, seçmiş olduğumuz türbin tiplerinin kule yükseklikleri olan 60 (V63) ve 67 (V80) m'ye yükseltilmiştir. Öncelikle, 10m'den 30m'ye yükseltirken verilerde kullanılan ortalama Helmann katsayısı bulunmuştur. Buna göre ilk Helmann katsayısı 0,37 'dir. Bu değer kullanılarak 10m verileri 60 m ve 67 m yüksekliğe ve 30m verileri de yine aynı yüksekliklere extrapole edilmiştir. Daha sonra bulunan bu verileri WASP içerisinde tek bir V63 ve V80 türbini için ölçüm noktasında enerji üretim değerleri bulunmuştur. 0,37 Helmann katsayısının yanında. rüzgar hızı verilerini kule yüksekliklerine çıkarırken. 0,2 ve 0,14 katsayıları da kullanılmıştır. Buna göre, her bir Helmann katsayısı için 4 durum ve tek bir türbinin üreteceği yıllık net enerji ve kapasite faktörleri bulunmuştur. Bu durumlar ve sonuçlar Tablo 5.37'de listelenmiştir.

**Çizelge 5.37:** Helmann katsayıları için durum tanımları

Helmann Katsayısı	Durum	Yükseklik
0.37	D1	30m→60m
	D2	30m→67m
	D3	10m→60m
	D4	10m→67m
	D5	30m→60m
0.2	D6	30m→67m
	D7	10m→60m
	D8	10m→67m
	D9	30m→60m
0.14	D10	30m→60m
	D11	10m→60m
	D12	10m→60m

Yukarıdaki 4 farklı durum için harita üzerinde ölçüm noktasına tek bir türbin yerleştirilerek yıllık net enerji üretimleri ve her bir türbin için kapasite faktörleri elde edilmiştir. Bu değerler Tablo 5.38'de gösterilmektedir.

Bu tabloya göre yıllık net enerji üretimi en fazla 0,37 Helmann katsayısı kullanılarak elde edilen rüzgar hızı verilerinden elde edilmiştir. Bu grup içerisinde 10m'den 67m'ye yükseltilerek elde edilen yıllık net enerji ve kapasite en yüksek çıkmıştır. En düşük değerler ise 0,14 Helmann katsayısını kullanarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, 67 metreye yükseltilerek elde edilen verilerden daha yüksek değerlerde sonuçların bulunabileceği söylenebilir. Aynı doğrultuda, kapasite faktörleri de 67 m'ye yükseltilerek bulunan veriler kullanılarak elde edilen türbinlerde daha fazla olduğu gözlenmektedir. D4 verilerinden, en yüksek enerji üretimi olan 3999 MWh elde edilmiştir. bu değerın kapasite faktörü ise 22,83% olarak bulunmuştur. Bu verilerden yola çıkarak, Helmann katsayısının yüksek olmasının enerji üretiminin fazla olmasına katkısı olduğu söylenebilir. Buna göre, bu arazinin dağlık olduğu düşünülürse Helmann katsayısının yüksek seçilmesi tavsiye edilebilir.

**Çizelge 5.38:** Helmann katsayılarına göre yıllık enerji üretimleri ve kapasite faktörleri

Helmann Katsayısı	Durum	Net AEP (MWh)	C <sub>f</sub> (%)
0,37	D1	2337	17,79
	D2	3977	22,70
	D3	2412	18,36
	D4	3999	22,83
	D5	1729	13,16
0,2	D6	2965	16,92
	D7	1107	8,42
	D8	2004	11,44
0,14	D9	1538	11,70
	D10	2654	15,15
	D11	798	6,07
	D12	1487	8,49

#### 5.4. Verilerin Ekonomik Analizi

Rüzgar enerjisi mevcut üretim teknolojileri ile kW başına yüksek sermaye gerektiren ancak yakıt ve işletme maliyeti en düşük olan bir enerji kaynağıdır. Yüksek sermaye gerektiren her yatırım gibi rüzgar enerjisi santrallerinin kârlılığı sermayenin fiyatına, yani tesislerin öz sermaye ve kredi finansman koşullarına bağlıdır. Örneğin faiz, geri ödeme planı ve vade gibi unsurlar kredi finansmanının maliyetini belirlediği gibi tesis amortisman dönemi ile geri ödeme süresi de finansmanın maliyetini etkilemektedir. Avrupa komisyonunun hazırladığı rapora göre Avrupa birliğine üye ülkelerin Rüzgar enerjisi için finansman koşulları kimi zaman uygulamaya konan kanunlar ile çok büyük değişiklikler gösterebilmektedir [16]. Rüzgar enerjisi



maliyetini belirleyen etkenler, yatırım giderleri( kurulum alanı, şebeke bağlantısı dahil), işletme ve bakım giderleri, kapasite faktörü, türbin çalışma ömrü, kredi ödemeleridir.

Özellikle yatırım giderleri ve kapasite faktörü ekonomik verimlilik açısından kritik önem taşımaktadır.

Kapasite faktörü tesisin kurulacağı alanın, yapılan rüzgar ölçümleri ile belirlenen yıllık ortalama rüzgar hızında üretilen elektrik enerjisinin türbinin maksimum gücüne ulaştığı rüzgar hızında üreteceği elektrik enerjisine bölünmesinden elde edilen “%” cinsinden değeridir. Genelde rüzgar santrallerinde kapasite faktörü %20-%45 arasında değişmekte olduğundan üretilen enerji için yatırım maliyetini etkilemektedir [32].

Kapasite faktörünü etkileyen en önemli unsurlardan birisi de seçilecek bölgedeki topografyanın yapısıdır. Karmaşık yapıya sahip bir topografyada türbülansın yüksek olmasından dolayı kapasite faktörü hem düşecek hem de çalışma ömrünü azaltacaktır [5].

Son yıllardaki türbin teknolojisindeki gelişmeler, daha yüksek, daha hafif kanatlı ve yüksek kapalı türbinlerle birim maliyeti düşürmektedir. 1990 yılında 200 kW güç üreten türbinler günümüzde yerini 4 MW üretim kapasitesine sahip modern türbinlere bırakmıştır. En çok tercih edilen türbinler ise 1500-3000 kW üretim gücüne sahip türbinler olmaktadır.

Kurulum aşamasından sonra işletme giderleri maliyetleri etkilemektedir. İşletme giderleri içinde sigorta, periyodik bakım, tamir ve yedek parça giderleri sayılabilir. Sigorta ve periyodik bakım giderleri türbin ömrü bazında belirlenmektedir. Ancak yedek parça ve tamir giderlerinin kurulum aşamasında belirlenmesi güçtür.

İşletme giderleri yeni bir türbinde üretilen birim kW enerji başı %10-15 arasında değişmekte olup, türbin yaşı ilerledikçe maliyetler içindeki payı %35 düzeyine kadar çıkabilmektedir. İşletme giderleri türbin kapasitesine ve yaşına bağlıdır [33].

Sonuç olarak, bir bölgeye rüzgar türbini kurulurken yapılması gereken en önemli çalışmalardan bir tanesi de kWh enerji maliyetinin hesaplanmasıdır ve bu hesap içerisinde yukarıda anlatılan parametrelerin de gözönünde bulundurulması gerekmektedir. Eşitlik 5.1 sistem ömrü boyunca yapılan yatırımın şimdiki zaman değerini göstermektedir.

$$PVC = I + B \left[ \frac{1+i}{r-i} \right] * \left[ 1 - \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^t \right] - S \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^t \quad (5.1)$$

Bu eşitlikte, PVC, sistemin ömrü boyunca yapılan yatırımın şimdiki değerini, I, ilk yatırım maliyetini( türbin fiyatı ile fiyatın %20si kadar olan bağlantı giderleri), B, yıllık bakım onarım giderlerini, i, enflasyon oranını, r faiz değerini, S, hurda bedelini, t ise türbinin ömrünü ifade etmektedir.

B yıllık bakım onarım gideri ise eşitlik 6.2 ile gösterilmiştir.

$$B = \frac{I}{(t * 4)} \quad (5.2)$$

Eşitlik 6.3 ile kWh maliyeti hesaplanabilmektedir.

$$kWhMaliyeti = \frac{PVC}{P_R * C_f * t} \quad (5.3)$$

Bu eşitlikte  $C_{f,k}$  kapasite Faktörünü ifade etmektedir.

Bu çalışmada yukarıdaki eşitlikler kullanılarak, seçilen türbinlerin en yüksek ve en düşük kapasite faktörleri için kWh başına maliyeti hesaplanmıştır. Kullanılan veriler içerisinde, tanımlanan durumlardan Durum 3, V63 türbininin kullanıldığı santral için %16,74 ile en düşük kapasite faktörünü göstermektedir. Durum 7 için ise yine V63 türbininin kullanıldığı santral için en yüksek değer olan %28,4 göstermektedir. V80 türbininin kullanıldığı durumlar arasından ise en yüksek değer %31,59 ile 10. duruma aittir, en küçük değeri ise %19,61 olarak durum 5 göstermektedir. Bu kapasite faktörleri kullanılarak 4 ayrı durum için her santralin kWh senelik üretim değerleri bulunmuştur. Aynı durumlar için türbinlerin bugünkü değerini bulabileceğimiz eşitlik 5.1 kullanılmıştır. Bu çalışmada türbinlerin MW başına fiyatı 900000€, türbin ömrü ise 30 yıl olarak kabul edilmiştir. Hurda bedeli ise türbin fiyatının %10'u olarak alınmıştır. TL cinsinden faiz değeri ise %7,75, enflasyon oranı ise %6 değeri kullanılmıştır. Elde edilen TL cinsinden kWh maliyeti daha sonra € 'ya çevrilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar Tablo 5.39'da gösterilmektedir. Buna göre kWh maliyeti 1,15 cent/€ ile 2,97 cent/€ arasında değişmektedir.

**Çizelge 5.39:** Farklı durumlardaki türbin fiyatları ve kWh maliyetleri

Durum	Türbin Gücü(kW)	Türbin Maliyeti(PVC)	Yıllık Enerji Üretimi (kWh) (yıllık üretimtürbin ömrüxC <sub>p</sub> )	kWh Maliyeti (cent/€)
Durum 3	1500	56840682	1319781600	1,96
Durum 7	1500	56840682	2239056000	1,15
Durum 5	2000	101050102	1546052400	2,97
Durum 10	2000	101050102	2490555600	1,84



## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada Tavas ilçesinin Aralık 2004-Aralık 2005 tarihleri arasındaki 10m ve 30m yüksekliklerdeki 10 dakika aralıklarla ölçülmüş rüzgar hızı ve yön verileri kullanılarak bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi için çalışılmıştır. Yapılan analizler ve değerlendirmeler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 10m ve 30m yükseklik için ölçülen rüzgar hızı verilerinin, seçilen bölge için gün içerisindeki saatlik değişimleri incelenmiş olup, ortalama en yüksek rüzgar hızı öğleden sonra saat 14:00 ve 15:00 civarında, en düşük rüzgar hızı ise sabah saatlerinde olduğu gözlenmiştir. Veriler aylık olarak incelendiğinde ise en yüksek ortalama rüzgar hızı her iki yükseklikte de Temmuz ayı için, en düşük değer ise Mayıs ayı için hesaplanmıştır. Aynı şekilde mevsimsel olarak incelenen rüzgar verilerinde en yüksek değerler yaz mevsiminde gözlenmektedir. Çalışmada kullanılan ölçüm noktası dağlarla çevrili olan bir ova olması sebebiyle bölgenin dağ ve vadilerin farklı ısınmaları sonucu meydana gelen dağ ve vadi meltemlerinden etkilendikleri söylenebilir. Bu sonuçlara göre mevsimsel olarak yaz aylarında ve gün içerisinde öğleden sonra saatlerinde bu bölgeden santraller için daha yüksek verim alınabileceği söylenebilir.

- Verileri için frekans analizi yapıldığında, rüzgarın esme sıklığı gün içerisinde NNE yönlerden en yüksektir. 0,2-0,3 arasındaki Helmann katsayıları gün içerisinde en yüksek frekansa sahiptir. Aylara göre incelendiğinde 0,3-0,4 arasındaki Helmann katsayılarının frekansı tüm aylarda en yüksektir. Helmann katsayılarının ve sıcaklıkların aylık ve saatlik incelemeleri yapıldığında Helmann katsayılarının sıcaklıklarla ters orantılı olarak değiştiği gözlenmiştir. Tüm bu gün içerisindeki ve aylık değişimler, arazi üzerindeki yerşekillerine, ölçüm yapılan yerin etrafındaki engellere göre değişim gösterebilir, bu nedenle çalışması yapılan arazinin yerinde incelenmesi de gerekebilir.

- Yapılan çalışmada 10m ve 30m için iki ayrı rüzgar gülü elde edilip, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tavas ilçesinin 10m yükseklik verisine ait rüzgar gülü incelendiğinde hakim rüzgar yönünün 30° sektöründe NNE yönünde olduğu ve %

32,9 frekansa sahip olduğu görülmektedir. 30m yükseklik için hakim rüzgar yönünün değişmediği ve frekansın da %33,1 değeriyle yine aynı sektörde daha fazla bulunduğu gözlenmiştir.

- WASP 8,0 kullanılarak çizilen Weibull dağılımına göre ölçek parametresi 3,3 m/s. şekil parametresi ise 1,44 olarak bulunmuştur. Ortalama rüzgar hızı 2,95 m/s. ortalama güç yoğunluğu ise  $45 \text{ W/m}^2$  olarak bulunmuştur. 30m verileri kullanılarak aynı hesaplar yapıldığında, ortalama rüzgar hızı 4,56m/s. şekil parametresi 1,63, ölçek parametresi ise 5,1 m/s. güç yoğunluğu ise  $141 \text{ W/m}^2$  olarak bulunmuştur. Daha önce yapılan çalışmalarda, bir bölgede kurulması düşünülen rüzgar çiftliğinin yapılabilir olması için şekil parametresinin 2, ortalama rüzgar hızının en az 3 m/s olması gerektiği, ancak bu koşullar sağlanırsa enerji veriminin yüksek olacağı görülmüştür. Bu durumda dağılımın verdiği sonuçlardan 10m yükseklik verilerine ait değerler normal değerlerin altında gözükse bile, uygun türbin seçimleri yapılarak rüzgar enerjisi santrali kurulumu yapılabilir. 30m yükseklik verilerinden elde edilen sonuçlar 10m verilerine göre daha yüksektir. Buna göre eğer bu bölgeye rüzgar enerjisi santrali kurulumu düşünülüyorsa, fizibilite çalışmalarının 10m ölçümlerine göre değil, en az 30m ölçümlerine göre olması daha olumlu sonuçlar verecektir.

- Eğer kullanılan rüzgar hızı verisi 10m yükseklik için varsa, bu rüzgar hızı verileri istenilen kule yüksekliğine farklı Helmann katsayıları kullanılarak yükseltilebilir. Bunun için arazinin yapısı çok önemlidir. Arazinin pürüzlülüğüne göre Helmann katsayıları değiştirilebilir. Bu çalışmada öncelikle kullanılan 10m verilerini 30m yüksekliğe extrapole etmek için kullanılan Helmann katsayılarının değişimleri incelenmiştir. Buna göre en düşük Helmann katsayıları öğlene doğru, en yüksek değerler ise sabaha karşı saatlerde gözlenmektedir. Aylık ve mevsimlik olarak incelendiğinde ise yaklaşık 0,35 değeri civarında değişmektedir. Buna göre en yüksek Helmann katsayılarının yaz aylarında olduğu gözlenmektedir. Helmann katsayısının değişimini arazinin dağlık olması ve rüzgar hızlarının yaz aylarında ve öğle saatlerinde daha fazla olması etkileyebilir.

- Pürüzlülük faktörü, dağlık araziler için çok önemli bir parametredir. Bu bölgelerde deniz kıyı bölgelerine göre pürüzlülük daha fazladır, bu nedenle kurulacak santrallerden yeterli verim alınamayabilir. Üzerinde çalışılan bölge pürüzlülük açısından elverişli bir bölge olmamakla birlikte santralin ova alanına yerleştirilmesi bir avantaj sağlayabilir. Bu bölgede pürüzlülük değerlerinin düşük olmasının

yanında, ortalama rüzgar hızlarının da yüksek olması beklenebilir. Ancak çalışmada kullanılan bölgede ovaya yerleştirilen türbinlerden elde edilen yıllık net enerji, kuzey bölgelere göre nispeten daha az dağlık ama ortalama rüzgar hızı ve yüksekliği ovaya göre daha fazla olan güney bölgelere yerleştirildiğinde elde edilen yıllık net enerji miktarından daha düşük çıkmaktadır. Buna göre fizibilite çalışması yapılırken sadece pürüzlülük değerlerine göre değil, ortalama rüzgar hızı, sıcaklık, nem vb. parametreleri de incelemek gerekebilir.

- Elde edilen haritalara göre ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu değerlerinin yükseltisi fazla olan yerlerde yüksek olduğu görülmektedir. Bu bölgelere rüzgar santrali kurulabilir diye düşünülebilir. Fakat yüksek olan yerlerin dağlık arazi olduğu gözönünde bulundurulmalıdır. Yüksek dağlık arazi bölgelerinde türbülans olma ihtimalini de unutmamak gerekir. Fakat dağlık arazi olsa da ulaşım rahat sağlanıyorsa santralin şebekeye bağlantısını zorlayan bir durum yoksa ve yapılan ön çalışmalarda istenilen değerler elde ediliyorsa dağ ve tepelerin zirvelerine santral kurulumu düşünülebilir. V63 ve V80 türbinlerinin yerleştirildiği arazi kuzey bölgelere göre daha az engebeli ve ortalama rüzgar hızı ovaya göre daha yüksek olduğu için bu bölgeye santral kurulumu düşünülebilir.

- Çalışmada kurulması planlanan 30MW santral için WAsP ta yapılan modelleme ile Vestas V63 ve V80 türbinleri seçilerek enerji üretim değerleri hesaplanmış, V80 tipi türbinden elde edilecek yıllık enerji üretim miktarı daha fazla çıkmıştır. Aynı zamanda 10m ve 30m yükseklikteki veriler için 10 dakikalık, 30 dakikalık ve 60 dakikalık farklı zaman aralıklarında ölçülen rüzgar verileri kullanılarak hesaplama yapıldığında, 10 dakikalık veriler kullanılarak yapılan hesabın daha hassas olacağına düşünülmüştür. Ayrıca V80 türbini kullanılarak yapılan hesapmalarda V63 türbininin kullanımından elde edilen üretim değerlerine göre her zaman daha yüksek üretim değerleri elde edilmiştir.

- 10m ve 30m rüzgar verileri V63 ve V80 türbinlerinin kule yüksekliklerine göre farklı Helmann katsayıları kullanılarak extrapole edilmiştir. Buna göre, 10m ve 30m deki ölçüm değerleri V63 tipi türbin için 60m' ye, V80 tipi türbin için 67m' ye literatürde sık olarak kullanılan 0,2 ve 0,14 Helmann katsayıları ile yükseltilmiştir. Ayrıca 10m' deki ölçüm değerleri ile 30m' deki ölçüm değerlerinden elde edilen 0,37 katsayısı da hesaplarda kullanılmıştır. Böylece toplam 12 farklı durum elde edilmiştir. Kullanılan bu 12 farklı durum için WAsP'ta ölçüm noktasına konulan tek

bir türbin için enerji üretim değerleri karşılaştırıldığında 0,37 Helmann katsayısını kullanarak yaptığımız yükseltmeler sonucunda elde edilen enerji üretim değerleri diğerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Ölçüm noktası etrafı dağlarla çevrili olduğu için Helmann katsayısının incelenen bölge için literatürde sıklıkla kullanılan değerlerden daha yüksek tutulması gerekeceği sonuçlardan da gözlenmektedir.

- 12 farklı durum için karşılaştırma yapıldığında 10m verilerinin farklı zaman aralıklarındaki V63 türbinine ait enerji üretim değerleri karşılaştırıldığında, 10dk enerji üretim değeri 30dk verilerinden elde edilen enerji üretim değerinde yaklaşık olarak % 3, 60dk enerji üretimdeğerlerinden yaklaşık olarak %5 daha fazla çıktığı gözlenmektedir. Yine 10m'de V80 türbinlerinin kullanımından elde edilen enerji üretim değerleri farklı zaman aralıkları için karşılaştırıldığında, 10dk aralıklarla ölçülen verilerden elde edilen üretim değerleri 30dk lık verilerin enerji üretim değerlerinden %8, 60dk lık enerji üretim değerlerinden yaklaşık olarak %5 daha fazla olduğu gözlenmiştir.

- Aynı inceleme 30m rüzgar verileriyle V63 ve V80 türbinleri için yapıldığında, V63 türbinlerindeki 10dk verilerden elde edilen enerji üretim değerleri. 30dk enerji üretimlerinden %6,5, 60dk verilerinden yaklaşık %10 fazla olduğu gözlenmiştir. V80 türbinleri için ise 30dk verilerinde elde edilen enerji üretim değerleri 10dk enerji üretim değerinden % 4, 60dk lık enerji üretim değerinden %8 daha fazla elde edilmiştir. Buna göre 30 m yükseklikteki rüzgar verileri kullanılarak daha fazla enerji üretim değeri hesaplanmıştır. Türbin modellerinin ve rüzgar verilerinin ölçüm aralıklarının değişimi enerji üretim değerlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Genel olarak bakıldığında 10dk lık veriler daha hassas hesaplamalar için kullanılabilir.

- Farklı yükseklikteki farklı zaman aralıklarındaki ölçüm verilerinin değiştirilmesi ve farklı türbinler kullanılması sonucu elde edilen enerji üretim değerlerinin incelenmesinin yanısıra her bir model santral için kapasite faktörleri de bulunmuş ve bu değerlerin ilk altı durum için yani 10m' lik veri grubu için %20'ler civarında olduğu, ikinci 6 durum için yani 30m' lik veri grubu için %20-30 civarında değiştiği gözlenmektedir.

-Her iki 10m ve 30m 'deki gruptan V63 ve V80 türbinlerine ait en yüksek ve en düşük kapasite faktörlerine göre santrallerin senelik enerji üretimleri bulunmuştur. Senelik üretim değerlerinden ve bugünkü türbin fiyatlarından yola çıkarak kWh



maliyetleri bulunmuştur. Buna göre santralin kWh maliyeti 1,15 ile 2,97 eurocent arasında değişmektedir.

Yapılan bu çalışmada elde edilen değerlerin rüzgar enerjisi santrali kurulması için gereken değerleri karşıladığı gözlenmiştir. Ancak bu bölgede yer seçimi tüm sonuçları önemli derecede etkileyeceğinden santralin yeri, santraldeki türbinlerin yerleşimi ve birbirlerinden etkilenme durumları gözönünde bulundurulmalıdır. Santralin hakim rüzgar yönüne açık ve engellerin kapatmadığı bir bölgeye kurulması daha iyi olacağı gözönünde bulundurulmalıdır. Eğer uygun bir yer seçilirse Tavas bölgesinden enerji üretimi açısından istenen verim alınabilir. Ayrıca gelişen türbin teknolojisi ile bölgeye uygun türbin tiplerinin seçimiyle rüzgardan elde edebilecek enerji miktarı da artacaktır.



## KAYNAKLAR

- [1] **Koyuncu, T., Lüle. F.**, 2009. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsünün Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi, Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, s.171.
- [2] **Güney, İ., Terzi, U. K.**,1994. Rüzgar Enerji Teknolojileri ve Kullanımının Türkiye'deki Gelişimi.
- [3] **Kurban, M., Hocaoğlu, F. O., Kantar, Y. M.**, 2007. Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Tahmininde Kullanılan İki Farklı İstatistiksel Dağılımın Karşılaştırmalı Analizi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 13, s.103-104.
- [4] **Walker, F. J. and Jenkins, N.**, 1997. Wind Energy Technology.
- [5] **Şahin, A. D.**, 2008. A Review on Research and Development on Wind Energy in Turkey.
- [6] **Karadeli, S.**, 2001. Rüzgar Enerjisi. Ankara.
- [7] **Wizelius, T.**, 2007. Developing Wind Power Projects, London.
- [8] **Durak, M.**, 2000. Rüzgar Enerjisi Teknolojisi ve Türkiye Uygulaması, Akhisar Rüzgar Elektrik Santrali, Yüksek Lisans Tezi. Şubat 2000. İTÜ.
- [9] **Menteş, S., Topçu. S., Ünal, Y. and Borhan. Y.**, 2001. An Overview Of Wind Energy Potential Along The Coastal Region Of Black Sea In The North Of Turkey, Third European & African Conference On Wind Engineering Proceeding. Eindhoven University Of Technology.
- [10] **Öztürk, İ., Çelik. A.**, 2006. Dünya'da ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Kullanım Durumu ve Geleceğe Yönelik Beklentiler, Atatürk Üni. Ziraat Fak. Dergisi.
- [11] **Güler, Ö.**, 2007. Wind Energy Status in Electrical Energy Production of Turkey, Renewable Energy & Sustainable Energy Review 13, s.473.
- [12] **Url-1** < <http://www.epdk.gov.tr/lisans/elektrik/lisansdatabase>>, 10.01.2010.
- [13] **Ata, R., Çetin, N. S.**, 2007. 3kW Otonom Bir Rüzgar Türbini Kurulumu ve Enerji Eldesi, Gazi Üni. Müh. Mim. Fak. Dergisi, **vol.** 23, s. 42
- [14] **Kırım, S.**, 2002. Rüzgar Enerjisi ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [16] **Gökçınar, R. E.**, 2008. Rüzgar Enerjisi Fayda- Maliyet Analizi ve Hibrit Sistemler, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, s. 17-25.
- [15] **Url-2** <<http://www.ewea.org>>, 05.01.2010
- [17] **Justus, J. C., Hargraves, W. R., Mikhail, A. and Graber, D.**, 1978. Methods For Estimating Wind Speed Frequency Distributions, J. Appl. Meteorology.

- [18] **Koçak, K., Aslan, A.**, 2003. Süreklilik Eğrileri ile Rüzgar Hızı Persistansının Hesaplanması.
- [19] **Tolun, S., Erim, M. Z., Menteş, S., Aslan, Z., Yükselen, A., Beşerik, G.**, 1991. Çanakkale Civarında Rüzgar Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi ve Çevreye Uygun Küçük Güçlü Bir rüzgar Türbini Dizaynı, İTÜ Araştırma Fonu Projesi.
- [20] **Janardan, S. R.**, 1994. Wind Characteristics, West Texas A&M University, s.118-140,207.
- [21] **Lettau, H.**, 1969. Note On Aerodynamic Roughness- Parameter Estimation On The Basis Of Roughness- Element Distribution, J. Appl. Met. 8.
- [22] **Gipe, P.**, 2003. Wind Power, Chelsea Greer Publishing Company.
- [23] **Rosby, C. G. and Montgomery, R. B.**, 1935. The Layer Of Frictional Influence In Wind And Ocean Currents, Paper In Phys. Oceanogr. Meteor., MIT and Woods Hole Oceanogr.
- [24] **Perera, M. D.**, 1981. Shelter Behind Two-Dimensional Solid And Porous Fences, J. Wind Engin, And Industrial Aerodyn. 8.
- [25] **Businger, J.**, 1973. Turbulent Transfer In The Atmosferic Surface Layer, In: Work shop on Micrometeorology, Ed. By D. A. Haugen American Meteor. Soc.. Boston, Mass.
- [26] **Dyer, A. J.**, 1974. A Review of Flux-Profile Relationships, Boundry- Layer Meteorol 7.
- [27] **Jensen, N. O., Petersen, E. L. and Troen. I.**, 1984. Extrapolation Of Mean Wind Statistics Eith Special Regard To Wind Energy Aplications, World Meteorological Organization, WCP-86.
- [28] **Url-3** < <http://www.tavas.net/modules.php> >, alındığı tarih16.09. 2009.
- [29] **Url-4** < <http://www.tavas.gov.tr>>, alındığı tarih16.09.2009.
- [30] **Url-5** <<http://www.eie.gov.tr>>, alındığı tarih 11.10.2009.
- [31] **Rehman, S. and Al-Abbadi, N. M.**, 2005. Wind Shear Coefficients And Their Effect On Energy Production, Energy Conversion and Management 46. Elsevier,s. 2579,2584.
- [32] **Url-6**< [http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/ruzgar\\_potansiyel.html](http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/ruzgar_potansiyel.html) >, alındığı tarih 09.12.2009.
- [33] **Url-7**< <http://www.ewea.org>>, alındığı tarih 20.12.2009.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Serap TALAYOĞLU

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Ordu- 10.8.1983

**Adres:** Atatürk Mh. 547. Sk. Bahçeşehir si 1A- Beylikdüzü / İstanbul

**Lisans Üniver:** İstanbul Teknik Üniversi- Meteoroloji Mühendisliği