

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI YÜKSEKLİK VE ÖRNEKLEME ARALIKLARINDAKİ RÜZGAR
VERİLERİNİN RÜZGAR POTANSİYELİ TAHMİNİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ebubekir FIRTIN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 Aralık 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Ocak 2010

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Önder GÜLER (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Sibel MENTEŞ (İTÜ)

Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU (İTÜ)

ARALIK 2009

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince beni teşvik eden, yönlendiren Sayın Yrd. Doç. Dr. Önder GÜLER'e, karşılaştığım problemlerin çözümünde benden yardımlarını esirgemeyen Sayın Seyit AKDAĞ'a teşekkür ederim.

Aralık 2009

Ebubekir FIRTIN
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KISALTMALAR	v
ÇİZELGE LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1 TÜRKİYE’DE VE DÜNYADA RÜZGAR ENERJİSİNİN DURUMU.....	1
1.1 Giriş	1
1.2 Dünyada Rüzgar Enerjisi.....	2
1.3 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi	6
1.4 1 Kasım 2007 RES Lisans Başvuruları	9
1.5 RES Projelerinin Karşılaştığı Trafo Problemi	10
1.6 RES Başvurularının Çakışması veya Kesişmesi Durumu	10
1.7 Lisanslı RES Projeleri	11
2 GLOBAL TÜRBİN PİYASASI.....	13
2.1 Giriş	13
2.2 Türbin Piyasalarına Genel Bakış	17
2.3 Türbin Üreticileri.....	18
3 RÜZGAR ENERJİSİ TEMEL DENKLEMLERİ.....	21
3.1 Temel Denklemler	21
3.2 Betz Limiti.....	22
4 BALIKESİR’DE ENERJİ ANALİZİ UYGULAMASI.....	25
4.1 Uygulama Sahasının Tanıtımı	25
4.2 Ölçüm İstasyonu.....	29
4.3 Arazi Yapısı.....	29
4.4 Rüzgar Verisi.....	31
4.5 Harita	33

4.6	Güç Kanunu (Hellman Bağıntısı).....	33
4.7	Veri Aralığı	37
4.8	Kullanılan Yazılımlar	38
5	ENERJİ ANALİZLERİ	41
5.1	Metodoloji	41
5.2	36 MW Rüzgar Santrali Üzerinden Enerji Analizleri	44
5.2.1	36 x 1 MW Bonus Analiz Sonuçları	46
5.2.2	40 x 900 kW Enercon E44 Analiz Sonuçları	47
5.2.3	45 x 800 kW Nordex N50 Analiz Sonuçları	49
5.3	Ölçüm Noktasında Tek Türbin İle Yapılan Analizler	51
5.4	Ölçüm Noktasında CFD Analizleri	53
6	SONUÇ VE ÖNERİLER	57
	EKLER.....	61
	KAYNAKLAR	75

KISALTMALAR

TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim AŞ
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
Riso	: Danimarka Ulusal Laboratuvarı
DMİ	: Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
KF	: Kapasite Faktörü
RES	: Rüzgar Enerjisi Santrali
AEP	: Yıllık Enerji Üretimi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 Elektrik üretim santrallerinin kaynaklarına göre dağılımı	2
Çizelge 1.2 Kurulu rüzgâr gücünün kıtalara göre dağılımı	4
Çizelge 1.3 Kurulu rüzgâr gücü (MW) en büyük 10 ülke.....	5
Çizelge 1.4 Rüzgâr enerjisinin yerel şebekelerdeki payı	5
Çizelge 1.5 Türkiye'de işletmede olan rüzgar santralleri	7
Çizelge 1.6 Türkiye'deki RES'lerde gerçekleşmiş kapasite faktörü değerleri	8
Çizelge 2.1 Global kümülatif rüzgar kurulu gücü (GW) 2020 projeksiyonu.....	16
Çizelge 2.2 Bir rüzgar santralının maliyet kalemleri	17
Çizelge 2.3 Türbin firmalarının üretim merkezlerinin kıtalara göre dağılımı	20
Çizelge 4.1 Sahanın sıcaklık - basınç - hava yoğunluğu değişimi	27
Çizelge 4.2 Sahanın pürüzlülük indeksi.....	31
Çizelge 4.3 Frekans analizi	32
Çizelge 4.4 Gerçekleşmiş ortalama alfa değerleri	36
Çizelge 4.5 Güç katsayısının ortalama rüzgar hızına etkisi	36
Çizelge 4.6 Elde edilen veri setlerinde ortalama rüzgar hızları	37
Çizelge 5.1 Enerji analizlerinde altlık olarak kullanılan veri setleri	41
Çizelge 5.2 Kullanılan türbinler.....	43
Çizelge 5.3 10dk'lık veri setlerinin durumu için enerji üretimleri ve kapasite faktörleri.....	44
Çizelge 5.4 Yarım saatlik veri setleri için enerji üretimleri ve kapasite faktörleri	44
Çizelge 5.5 Saatlik veri setlerinin kullanılması için enerji üretimleri ve kapasite faktörleri .	45
Çizelge 5.6 36 x Bonus türbini kullanılması durumu için türbinlerin parametreleri	46
Çizelge 5.7 40 x Enercon türbin kullanılması durumuna göre türbin parametreleri	48
Çizelge 5.8 45 x Nordex türbini kullanılması durumu için türbin parametreleri	50
Çizelge 5.9 10dk'lık veri setinin kullanılması için enerji üretimleri ve kapasite faktörleri ...	52
Çizelge 5.10 Yarım saatlik setin kullanılması için enerji üretimleri ve kapasite faktörleri ...	52
Çizelge 5.11 Saatlik veri setinin kullanılması için enerji üretimleri ve kapasite faktörleri ...	53
Çizelge 5.12 10dk'lık veri setinin kullanılması için üretim değerleri ve kapasite faktörleri..	56
Çizelge 6.1 Bonus türbinine göre Wasp analizlerinde 10dk 50m veri setinden sapmalar	58
Çizelge G.1 3 saatlik ve günlük veriler kullanılarak yapılan enerji hesapları.....	75
Çizelge H.1 Her durum için hesaplanan güç yoğunlukları (W/m^2)	77

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Türkiye'nin kurulu güç kapasitesi ve üretimi (1970.2008)	1
Şekil 1.2 Küresel kurulu rüzgar gücünün yıllık değişimi (1999.2008).....	3
Şekil 1.3 50m'de yıllık ortalama rüzgar hızları	6
Şekil 1.4 TEİAŞ'ın bağlantı görüşü verdiği RES projelerinin dağılımı	10
Şekil 2.1 Kıtalara göre rüzgar enerjisi kurulu gücü (GW) 2020 projeksiyonu	14
Şekil 2.2 Kara ve deniz rüzgar santrallerinin kurula güce (GW) göre 2020 projeksiyonu	15
Şekil 2.3 Türbin nominal güçlerinin (MW) artış seyri.....	18
Şekil 2.4 Türbin üreticilerinin pazar payları.....	19
Şekil 3.1 Türbine yaklaşan hava kütlesi	22
Şekil 3.2 Betz Limiti	23
Şekil 4.1 Proje uygulama sahası	25
Şekil 4.2 Sahanın rüzgar hızı . hava yoğunluğu değişimi	26
Şekil 4.3 Sahanın sıcaklık - basınç değişimi	26
Şekil 4.4 Hava yoğunluğu - sıcaklık ilişkisi	27
Şekil 4.5 Güç yoğunluğunun farklı yükseklikteki değerlerinin gün içinde değişimi ..	28
Şekil 4.6 Rüzgar hızı ve güç yoğunluğu aylık değişimi	28
Şekil 4.7 50m rüzgar ölçüm istasyonu	29
Şekil 4.8 Sahanın RIX haritası.....	30
Şekil 4.9 Rüzgar gülü ve Weibull dağılımı.....	31
Şekil 4.10 Alfanın yıl boyunca değişimi.....	34
Şekil 4.11 Alfanın aylara göre değişimi.....	35
Şekil 4.12 Gün içinde alfanın dalgalanması.....	35
Şekil 4.13 Wasp rüzgar atlası metodolojisi	39
Şekil 5.1 50m yükseklikte hesaplanmış kaynak grid (66 W/m ² – 683 W/m ²).....	42
Şekil 5.2 36 x Bonus türbininin saha içindeki dağılımı	47
Şekil 5.3 40 x Enercon türbininin sahadaki dağılımı	49
Şekil 5.4 40 x Nordex türbininin sahadaki dağılımı	51
Şekil 5.5 Sahanın 50m CFD rüzgar hızı haritası.....	54
Şekil 5.6 Sahanın α katsayısının hâkim rüzgâr yönünden CFD analizi	55
Şekil 6.1 Bonus türbinine göre WindSim analizlerinde 10dk 50m veriden sapmalar..	59
Şekil A.1 Türbinlerin sahada güç yoğunluğuna göre dağılımı	61
Şekil A.2 Bir başak açıdan türbinlerin sahada dağılımı ve ölçüm direği.....	62
Şekil A.3 Bir başka açıdan sahada türbinler	62
Şekil B.1 Bonus 1 MW türbinin güç eğrisi	63
Şekil B.2 Enercon E44 900 kW türbinin güç eğrisi	63
Şekil B.3 Nordex N50 800 kW türbinin güç eğrisi	64
Şekil C.1 Weibull A parametresinin değişimi	65
Şekil C.2 Weibull A parametresinin değişimi	66

Şekil C.3 Pürüzlülük indeksinin değişimi.....	67
Şekil D.1 Bonus türbinlerinin 10dk 50m veri setinde rüzgar hızına göre üretim değerleri	69
Şekil D.2 Enercon türbinlerinin 10dk 50m veri setinde rüzgar hızına göre üretim değerleri	69
Şekil D.3 Nordex türbinlerinin 10dk 50m veri setinde rüzgar hızına göre üretim değerleri	70
Şekil E.1 Bonus türbinlerinin 10dk 50m veri setinde güç yoğunluğuna göre üretim değerleri	71
Şekil E.2 Enercon türbinlerinin 10dk 50m veri setinde güç yoğunluğuna göre üretim değerleri	71
Şekil E.3 Nordex türbinlerinin 10dk 50m veri setinde güç yoğunluğuna göre üretim değerleri	72
Şekil F.1 Alfa katsayısının sektörlere göre değişimi.....	73
Şekil F.2 Alfa katsayısının frekans grafiği	73

SEMBOL LİSTESİ

- TI : Türbilans yoğunluğu
V : Rüzgar hızı
 ρ : Hava yoğunluğu
A : Türbin kanatlarının süpürdüğü alan
 σ : Standart sapma
 α : Alfa katsayısı (windshear coefficient)
h : Ölçüm yüksekliği
m : Kütle

FARKLI YÜKSEKLİK VE ÖRNEKLEME ARALIKLARINDAKİ RÜZGAR VERİLERİNİN RÜZGAR POTANSİYELİ TAHMİNİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Enerji fiziksel olarak bir sistemin iş yapabilme kabiliyeti olarak tanımlansa da, günümüzde ülkelerin politikalarında yer alması sebebiyle bu anlamının çok ötesinde bir yer edinmiştir. Fosil yakıtların yakın bir gelecekte tükenecek olması dolayısıyla, enerji yönü olan politikalar tarih boyunca hiç bu kadar ön planda olmamıştı.

Bu politikalar rüzgar ve güneş enerjisi gibi, fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılabilen sistemlerin geliştirilmesine sebep olmuştur. Özellikle son 10 yılda rüzgar enerjisi ülkemizde ve tüm dünyada önde gelen sektörlerden olmuştur.

Rüzgar enerjisine olan bu eğilim akademik alanda da kendini göstermiş ve bir çok çalışma ile belli bir bölge için maksimum enerji kazancı sağlanmasına yönelik öneriler getirilmiştir. Bu sebeple bu çalışmanın amacı Balıkesir'deki yüksek enerji yoğunluklu bir bölgede yapılan rüzgar ölçümleri kullanılarak, güç kanununun farklı alfa değerleri ile kullanılmasıyla sonuçlardaki değişiklikleri ortaya koymaktır. Ayrıca türbin göbek yüksekliğinde yapılan ölçümlerin önemini vurgulamak da yine bu çalışmanın amaçlarındandır.

Bu çalışmalar hem 3 farklı türbin modeli için 36 MW'lık bir rüzgar elektrik santrali tasarlanarak, hem de ölçüm noktasında tek türbin olduğu varsayılarak, yaklaşık 100'e yakın farklı durum için yapılmıştır.

Sonuç olarak ölçümlerin türbin göbek yüksekliğinde yapılmasının gerekli olduğu görülmüş, empirik bağıntıların enerji analizlerinde ciddi hatalara sebep olabileceği anlaşılmıştır.

EFFECTS OF WIND DATAS COLLECTED AT DIFFERENT HEIGHTS AND TIME INTERVALS TO THE WIND POTENTIAL

SUMMARY

Although energy is defined as the ability of a system to perform “work”, today, it means more than its physical meaning due to its importance on countries policies. Policies with energy aspect, has never been such considerable since energy has been used for centuries as a result of fossil fuels is getting run out and will be completely exhausted in near future.

However there always have been alternative energy to the fossil sources, like solar and wind energy. Especially with last decade wind energy has become more popular and a leading sector all over the world including Turkey.

This trend has resulted with lots of academic studies to improve the energy acquisition from wind at site specific conditions. Therefore scope of this study is to determine the wind energy potential at Balikesir / Turkey by using different alpha values with “Wind Power Law”. It also aimed with this study that to identify the importance of the wind measurements at turbine hubheights.

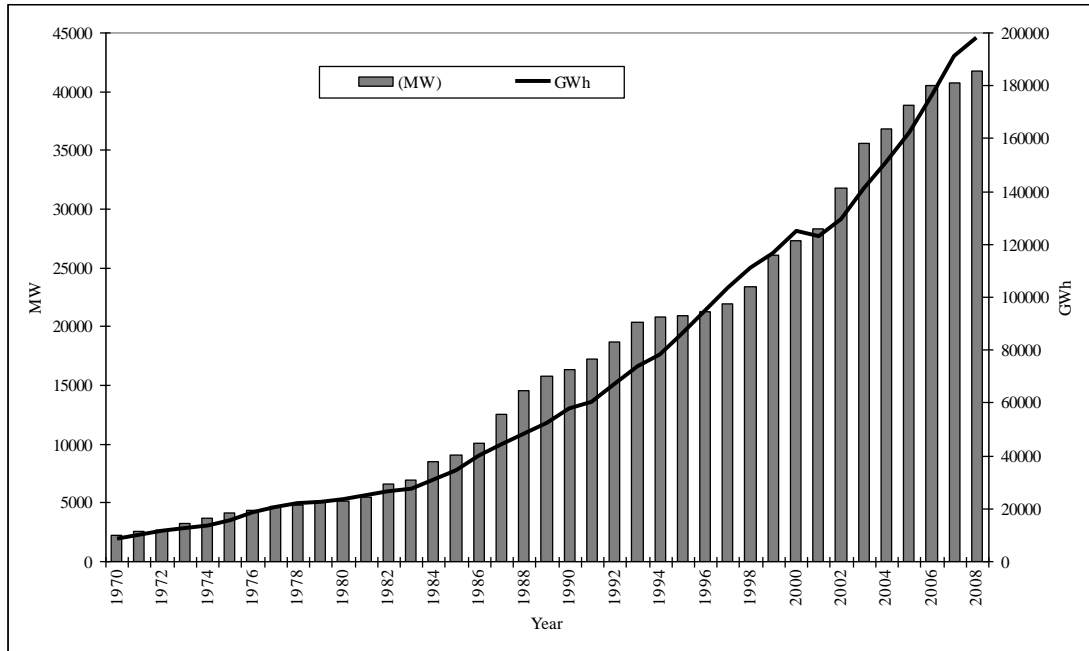
All these studies have been performed with 3 different wind turbine models for 36 MW installed power capacity and with one turbine at measurement point, that means energy yield calculations for almost 100 different conditions.

Consequently all results showed that the wind speed measurements should be made at hubheights of turbines. Otherwise empiric relations will cause errors on calculations.

1 TÜRKİYE'DE VE DÜNYADA RÜZGAR ENERJİSİNİN DURUMU

1.1 Giriş

Elektrik sürdürülebilir kalkınma için anahtar bir girdi ve temel bir ihtiyaçtır. Küresel elektrik tüketimi 1973 (6116 TWh)'ten 2007 (19771 TWh) yılına kadar yaklaşık 3,1 kat, diğer taraftan Türkiye'nin enerji talebi 1970 (8,62 TWh) yılından 2008 (198,32 TWh) yılına kadar 23 kat artmıştır. Türkiye'nin bu gelişim süreci içerisinde elektrik üretimi her yıl ortalama %8,7 artmıştır. Türkiye'nin kurulu gücü ve enerji üretiminin gelişimi Şekil 1.1'de gösterilmiştir.[1]



Şekil 1.1 : Türkiye'nin kurulu güç kapasitesi ve üretimi (1970-2008)

Projeksiyonlara göre, Türkiye'nin elektrik enerjisi talebi 2017 yılında 360 TWh'ya ulaşması beklenmektedir. Enerji tüketimindeki hızlı artış, 2008 yılında toplam kurulu gücün 18,7 kat artışla 41.802,6 MW'a ulaşmasını sağlamıştır. Bu kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı Çizelge 1.1'de gösterilmiştir.[1]

Çizelge 1.1 : Elektrik üretim santrallerinin kaynaklarına göre dağılımı

Kaynak Tipi	Kurulu Güç (MW)	Pay (%)	Üretim (GWh)	Pay (%)
Doğalgaz	13239.6	32	95531	48.2
Kömür	10096.9	24	57468	28.9
Hidroelektrik	13828.7	33	33264	16.8
Diğerleri	4637.4	11	12066	5.91

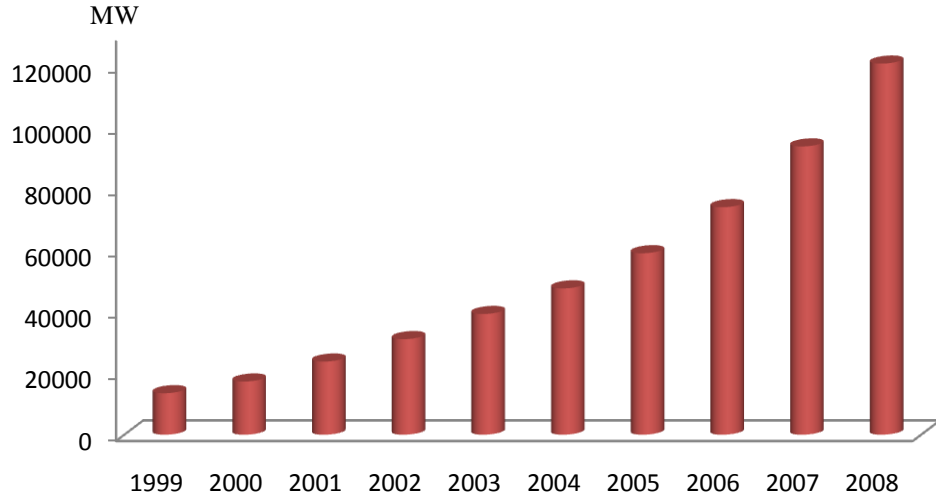
Türkiye'nin yetersiz doğalgaz, kömür ve petrol rezervlerine sahip olması, enerjinin %75 oranında dışa bağımlı kaynaklardan üretilmesine sebebiyet vermiştir. Yerli kaynaklar toplam elektrik üretiminin ancak %40 kadarını karşılamaktadır. Geri kalanın önemli bir kısmı da %97'si ithal edilen doğalgazdan karşılanmakta, bu da doğalgaz fiyatlarındaki düşük bir artışın ülkenin ekonomisini ciddi manada etkilemesine sebebiyet vermektedir. Bu sebepten ülkenin artan elektrik talebinin karşılanması ve enerji güvenliğinin sağlanması en önemli problemleri olarak öne çıkmaktadır. Bu problemleri çözmek için elektrik üretiminde yerli ve yenilenebilir kaynakların oranını arttırmak oldukça önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında, toplam kurulu güçteki düşük payı ve yüksek ekonomik potansiyeliyle rüzgar enerjisi dikkat çekmektedir. Bu potansiyelin sonucu olarak 2007 yılında Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK)'na 751 rüzgar projesinden oluşan 78.180,2 MW'lık lisans başvurusu yapılmıştır.[2]

1.2 Dünyada Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi tüm dünyada en hızlı gelişen yenilenebilir enerji kaynağıdır. 2008 sonu itibariyle rüzgar enerjisine dayalı üretim tesislerinin toplam kurulu gücü 121.188 MW'a ve bu tesislerin yıllık üretimleri yaklaşık olarak 260 TWh'e ulaşmıştır. Günümüzde rüzgardan üretilen elektrik enerjisi, toplam küresel elektrik tüketiminin %1,5'ine karşılık gelmektedir. Son 10 yılda rüzgar santrallerinin kurulu gücü her yıl ortalama %28 artmıştır. Küresel kurulu rüzgar gücü Şekil 1.2'de gösterilmiştir.

Rüzgar enerjisi bilhassa puant zaman aralığında elektrik piyasa fiyatlarının düşmesinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu sebeple bazı ülkelerde kurulu rüzgar gücü

hidroelektrik ve kömür santrallerine nispeten daha hızlı artmaktadır. Örneğin Avrupa Birliği'nin kurulu rüzgar gücü 2008 yılında 8484 MW artmıştır. Aynı yıl doğalgaz 6932 MW, petrol 2495 MW, kömür 762 MW ve hidroelektrik 473 MW artış göstermiştir. 2012 yılında rüzgar enerjisinden üretilen elektrik enerjisinin 500 TWh'a, bir başka deyişle toplam üretimin %3'üne ulaşması beklenmektedir.



Şekil 1.2 : Küresel kurulu rüzgar gücünün yıllık değişimi (1999-2008)

Kurulu rüzgar gücünün kıtalara göre dağılımı Çizelge 1.2'de verilmiştir. Görüldüğü gibi Avrupa en büyük kurulu güce sahiptir Bununla birlikte diğer kıtalarda rüzgar santralleri büyük bir hızla yaygınlaşmaktadır. Avrupa enerji ve teşvik politikaları sayesinde kurulu rüzgar gücünün ve modern rüzgar türbinlerinin gelişmesinde çok önemli, hayati katkılar sağlamıştır. Rüzgar türbini üretimi 2008 yılında 36 milyar avroluk endüstriyel bir sektör haline gelmiş ve 100.000'den fazla kişinin istihdam edilmesini sağlamıştır. [3]

Çizelge 1.2 : Kurulu rüzgar gücünün kıtalara göre dağılımı

Kıta	2007		2008		2012	
	Rüzgar kap. (MW)	%	Rüzgar kap. (MW)	%	Rüzgar kap. (MW)	%
Afrika & Orta Doğu	538	0.6	669	0.6	3000	1.2
Asya	15831	16.9	24368	20.5	66000	27.5
Avrupa	57136	60.9	65946	55.5	102000	42.4
Latin Amerika & Karayibler	537	0.6	625	0.5	4500	1.9
Kuzey Amerika	18664	19.9	25539	21.5	61300	25.5
Avustralya	1158	1.2	1644	1.4	3500	1.5

Son 10 yıldır, rüzgar enerjisine olan ilgi birçok ülkede çarpıcı bir şekilde artmıştır. Çizelge 1.3’de en yüksek rüzgar gücüne sahip 10 ülkenin kurulu gücünün dağılımı gösterilmiştir. Bugün ABD %20,8’lik pay ile (25170 MW) en yüksek kurulu güce sahip ülkedir. Tüm dünyadaki rüzgar kurulu gücünün %86’sının bu 10 ülkede kurulduğu görülmektedir. Sadece 5 ülke toplam enerji talebinin en az %6’sından fazlasını rüzgardan karşılıyor (Çizelge 1.4). Offshore rüzgar santralleri; pahalı türbin fiyatları, yüksek kurulum ve şebeke bağlantısı maliyetleri gibi sebeplerle toplam rüzgar kurulu gücü içindeki payı oldukça düşüktür. Denizde kurulan rüzgar santrallerinde elektrik üretiminin maliyeti, karada kurulu olanlardan %50 daha fazla olmaktadır. Ancak denizlerde kurulan santrallerde kapasite faktörleri daha yüksek olmaktadır.

Çizelge 1.3 : Kurulu rüzgar gücü (MW) en büyük 10 ülke

Ülke	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
1 ABD	4685	6374	6740	9149.0	11603.0	16818.8	25170
2 Almanya	12001	14609	16628.8	18427.5	20622.0	22247.4	23903
3 İspanya	4830	6202	8263	10027.9	11630.0	15145.1	16754
4 Çin	468	566	764	1266.0	2599.0	5912.0	12210
5 Hindistan	1702	2110	2985	4430.0	6270.0	7850.0	9645
6 İtalya	788	904	1265	1718.3	2123.4	2726.1	3736
7 Fransa	147	198	390	757.2	1567.0	2455.0	3404
8 İngiltere	552	647.6	900.8	1353.0	1962.9	2389.0	3241
9 Danimarka	2880	3110	3117	3128.0	3136.0	3125.0	3180
10 Portekiz	193.8	288.6	562	1022.0	1716.0	2130.0	2862

Çizelge 1.4 : Rüzgar enerjisinin yerel şebekelerdeki payı

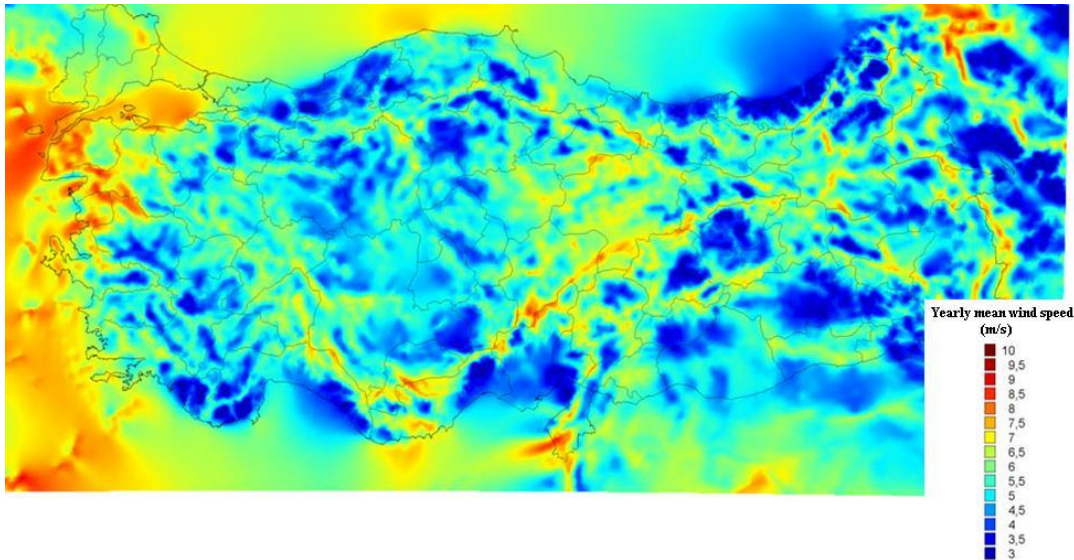
	2005	2006	2007	2008
Ülke	%	%	%	%
Danimarka	18.50	16.78	21.22	19.3
İspanya	7.79	8.72	11.76	11.7
Portekiz	3.70	5.97	9.26	11.3
İrlanda	2.52	5.59	8.42	8.8
Almanya	4.34	5.65	7.00	6.5

Bir sahadan rüzgar enerjisi üretimi maliyetleri; üretilen elektrik miktarı, enflasyon, faiz oranları, türbin tipi ve maliyeti, kule yüksekliği, inşaat maliyetleri, iletim hattı maliyetleri gibi faktörlere bağlıdır. Bu faktörlerin değişimi ülkeden ülkeye ve zamanla değişmektedir. Yüksek üretim oranları, türbin teknolojisi ve güç elektroniğindeki gelişmeler sayesinde bu maliyetler ciddi oranda düşüşler

göstermiştir. Günümüzde bir rüzgar türbini 20 yıl önceki eşdeğer bir türbine kıyasen 180 kat daha fazla enerji üretebilmektedir. Petrol fiyatlarının artması sebebiyle rüzgardan elektrik üretimi daha cazip hale gelmiştir. 90'lı yılların başlarında en büyük güçlü ticari rüzgar türbini 1 MW'ın altındaydı. Günümüzde 5 MW ve 126m rotor çapında türbinler imal edilmektedir. Türbinlerdeki bu gelişim sadece gücünde değil, aynı zamanda verimliliğinde de sürmektedir.

1.3 Türkiye'de Rüzgar Enerjisi

Yapılan rüzgar potansiyeli çalışmalarına göre Türkiye önemli bir değerlendirilebilir rüzgar potansiyeline sahiptir. Wijk ve Coelingh'e göre Türkiye'nin elektrik üretimine yönelik teknik ve ekonomik rüzgar enerjisi potansiyeli sırasıyla 83 GW ve 10 GW'tır. 2002 yılında Meteoroloji Müdürlüğü verilerinden faydalanılarak Türkiye rüzgar haritası hazırlanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları Wijk ve Coleingh'in çalışmalarına benzer sonuçlar vermiş ve teknik ve ekonomik potansiyel sırasıyla 88 GW ve 10 GW olarak ifade edilmiştir. 2006 yılında Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlandı ve karalarda yer seviyesinden 50m yükseklikte rüzgar enerjisi potansiyeli 131,7 GW olarak hesaplandı. Şekil 1.3 50m yükseklikte yıllık ortalama rüzgar hızlarını göstermektedir. Şekilden de görülebildiği gibi rüzgar potansiyeli Türkiye'nin Batı ve Güney bölgelerinde yoğunlaşmıştır.



Şekil 1.3 : 50m'de yıllık ortalama rüzgar hızları

Yüksek rüzgar potansiyeline rağmen, rüzgardan elektrik üretimi ülkemizde oldukça düşüktür. Türkiye’de işletmede olan rüzgar santrallerinin 2009 Aralık ayı itibariyle toplam kurulu gücü 802,8 MW olup, bu santrallerin bir kısmı Çizelge 1.5’de gösterilmiştir. 2009 Aralık ayı itibariyle rüzgar santrallerinin kurulu gücü toplam kurulu gücün % 1,8’sine karşılık gelmektedir.

2008 yılında, rüzgardan üretilen elektrik enerjisi 797 GWh’e, bir başka deyişle toplam üretimin %0,4’üne ulaşmıştır. 1998 – 2008 yılları arasında rüzgar santrallerinin ortalama kapasite faktörü değerleri ise %30 ila %40 arasında gerçekleşmiştir. Diğer taraftan gerçekleşmiş ortalama kapasite faktörü değerleri 2003-2007 yılları arasında Avrupa’da %21’den aşağıdadır. Ortalama kapasite faktörü değerleri Avrupa’ya kıyasla Türkiye’de daha yüksektir.[4]

Çizelge 1.5 : Türkiye’de işletmede olan rüzgar santralleri

Yer	Şirket	İşletmeye alınma tarihi	Kurulu gücü (MW)
İzmir-Çeşme	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	1998	1.5
İzmir-Çeşme	Ares Alaçatı Rüzgar En. Sant. San. ve Tic. A.Ş.	1998	7.2
Çanakkale-Bozcaada	Bores Bozcaada Rüz. Enj. Sant. San. ve Tic. A.Ş.	2000	10.2
İstanbul-Hadımköy	Sunjüt Sun’i Jüt San. ve Tic. A.Ş.	2003	1.2
İstanbul-Silivri	Teperes Elektrik Üretim A.Ş.	2006	0.85
Balıkesir-Bandırma	Yapısan Elektrik Üretim A.Ş.	2006	30.00
Çanakkale-İntepe	Anemon Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	2007	30.40
Manisa-Akhisar	Deniz Elektrik Üretim Ltd. Şti.	2007	10.8
Çanakkale-Gelibolu	Doğal Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	2007	14.90
İzmir-Çeşme	Mare Manastır Rüz. En. Sant. San. ve Tic. A.Ş.	2007	39.20
Manisa-Sayalar	Doğal Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	2008	34.20
İstanbul-Çatalca	Ertürk Elektrik Üretim A.Ş.	2008	60.00
İzmir-Aliğa	İnnores ElektÜretim A.Ş.	2008	42.50
İstanbul-Gaziosmanpaşa	Lodos Elektrik Üretim A.Ş.	2008	24.00
Balıkesir-Şamlı	Baki Elektrik Üretim Ltd. Şti.	2008	90.00

Hatay-Samandağ	Deniz Elektrik Üretim Ltd. Şti.	2008	20.00
Aydın-Didim	Ayen Enerji A.Ş.	2009	31.50
Muğla-Datça	Dares Datça Rüz. En. Sant. San. ve Tic. A.Ş.	2009	28,80
Çanakkale-Ezine	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	2009	20.80
Balıkesir-Susurluk	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	2009	18.90
Osmaniye-Bahçe	Rotor Elektrik Üretim A.Ş.	2009	35.00
İzmir-Bergama	Ütopya Elektrik Üretim San. ve Tic. A.Ş.	2009	15.00
İzmir-Çeşme	Mazı-3 Rüz. En Sant. Elektrik Üretim A.Ş.	2009	22.50
Balıkesir-Bandırma	Akenerji Elektrik Üretim A.Ş.	2009	15.00
Balıkesir-Bandırma	Borasco En. ve Kimya San. ve Ticaret A.Ş.	2009	45.00
Manisa-Soma	Soma Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	2009	34.20
Hatay-Belen	Belen Elektrik Üretim A.Ş.	2009	15.00
Tekirdağ-Şarköy	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	2009	28.80
		Total	727.45

Çizelge 1.5'deki santrallerden bazılarının gerçekleşmiş kapasite faktörü değerleri Çizelge 1.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 1.6 : Türkiye'deki RES'lerde gerçekleşmiş kapasite faktörü değerleri

Santral Adı	Kurulu Güç (MW)	Gerçekleşmiş Kapasite Faktörü Değerleri (%)									
		1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Alize RES (Çeşme)	1,5	33,6	31	39,1	28,6	37,6	35,1	30,1	37,9	30,9	23,2
Ares (Çeşme)	7,2	25,7	25,7	29,7	23,5	27,7	28,1	26,5	25,6	24,8	21,2
Bores (Bozcaada)	10,2			43,5	34,1	43,6	38,3	37	38,2	36,2	40,8
Bares (Bandırma)	30								26,2	42,9	44,6
Mare (Çeşme)	39,2									29,8	33,6
Sunjüt (İstanbul)	1,2								22,3	22,3	23,6

Görüldüğü gibi uygulama çalışmasının yapılacağı Balıkesir’de ve çevresindeki santrallerin gerçekleşmiş kapasite faktörü değerleri ortalama %30’un üzerindedir. Bu da sahamızın verimli bir saha olduğunu göstermektedir. Bu tablodaki sonuçlar ilerleyen bölümlerde uygulama çalışmasının sonuçları ile de örtüşmektedir.

1.4 1 Kasım 2007 Rüzgar Enerji Santrali Lisans Başvuruları

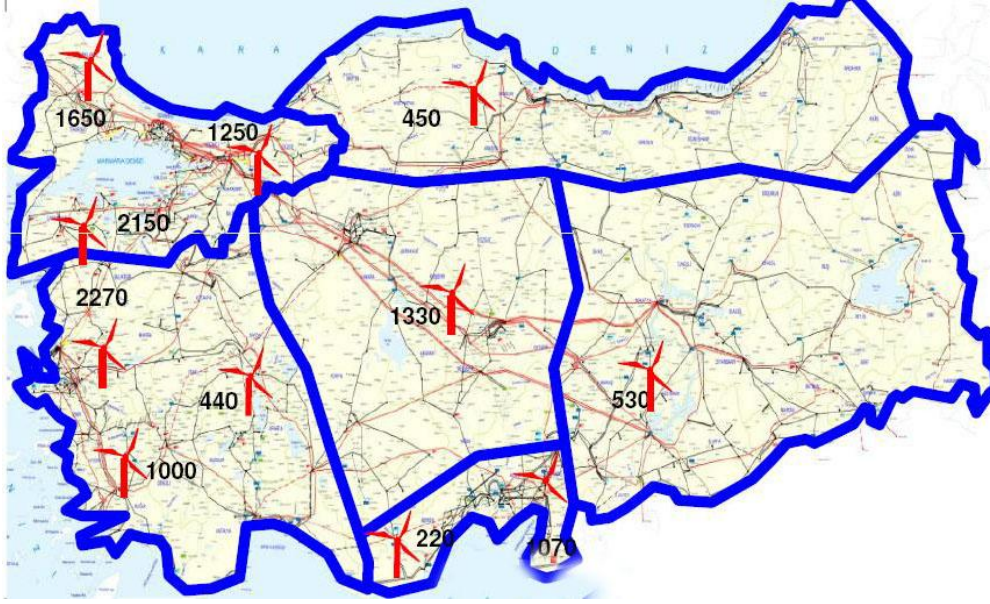
Türkiye’de ilk rüzgar enerji santrali (RES) 1998 yılında, 1,5 MW kurulu gücünde İzmir - Çeşme’de kurulmuştur. Bu tarihten itibaren kurulu güç her yıl katlanarak artmış ve 2009 Aralık ayı itibariyle 802,8 MW’a ulaşmıştır.

Enerji Piyasası Denetleme Kurumu çeşitli yıllarda lisans başvurularını kabul etmiş ve bu başvurulardan uygun olanları lisanslandırmıştır. En son 1 Kasım 2007 tarihinde mevzuat gereği 1 günlüğüne açılan lisans başvuruları rekor seviyede başvuru ile sonuçlanmıştır. Halen EPDK’da inceleme ve değerlendirme aşamasında olan 750’yi aşkın 1 Kasım 2007 projeleri Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ)’nin bağlantı görüşlerini beklemektedir.

TEİAŞ’ın 1 Kasım 2007 öncesi RES lisans başvurularına verdiği 3274 MW’ı lisanslı 4916 MW’lık bağlantı görüşüne rağmen, gerçekleşmiş yatırımlara ait kurulu gücün 800 MW mertebesinde kalması, hala yatırımı bekleyen yaklaşık 2500 MW lisanslı RES projesinin lisans termin programına göre en geç 2012 yılına kadar üretime geçeceğini göstermektedir. Bununla birlikte EPDK’dan lisans almayı bekleyen bağlantı görüşü olmuş yaklaşık 1410 MW RES projesi (toplam 24 proje) bulunmaktadır.

TEİAŞ 2009 yılında 1 Kasım projeleri için 2356 MW’ı doğrudan bağlanacak, 5097 MW’ı yarışma sonucu bağlanmak üzere toplam 7453 MW bağlantı görüşü vermiş, ancak daha sonra mevzuattaki değişiklik sonucu bu görüşler iptal edilmiştir. Bu durum Türkiye iletim şebekesinin mevcut 12369 MW’lık RES bağlanabilir kapasitesinin olduğunu ortaya çıkarmıştır. 2010 yılının ilk ayından itibaren TEİAŞ’ın 1 Kasım başvurularına yönelik görüşlerini revize etmesinden sonra EPDK bu projeleri lisanslandırmaya başlayacaktır. TEİAŞ’ın projeksiyonlarına göre 2020 yılında 20 GW’lık toplam bağlanabilir RES kapasitesi olması öngörülmektedir.

Şekil 1.4’te TEİAŞ’ın bağlantı görüşü verdiği rüzgar projelerinin bölgesel dağılımı görülmektedir.



Şekil 1.4 : TEİAŞ'ın bağlantı görüşü verdiği RES projelerinin dağılımı

1.5 RES Başvurularının Karşılaştığı Trafo Problemi

TEİAŞ bir trafoya bağlanabilir RES kapasitesini kısıtlaması ve 78 GW'lık başvuruya karşılık mevcut durumda 8 GW'lık RES kapasitesi olması projelerin önündeki en büyük problem olarak görünmektedir.

Aynı trafoya merkezi için görüş almış projelerden en yüksek katkı payını veren proje sahibi, kurulu gücü kadar kapasiteye (kapasitenin yeterli olmadığı durumlarda kurulu gücünü düşürmek suretiyle) sahip olabileceklerdir.

1.6 RES Başvurularının Çakışması veya Kesişmesi Durumu

RES projeleri -farklı trafo merkezleri için görüş almış olsalar dahi- eğer bir projenin sınırları diğer bir projenin sınırları ile kısmen veya tamamen çakışıyorsa, bu durumda proje sahası için yarışma düzenlenecek ve aynı saha için en yüksek katkı payını veren proje sahibi sahaya sahip olabilecektir.

1.7 Lisanslı RES Projeleri

Lisanslı projeler lisans özel hükümlerinde belirtilen terminlere uymakla yükümlü olduklarından projenin gerçekleşmesi için gerekli idari izinleri zamanında almalıdırlar.

Bir RES projesi lisans aldıktan sonra ÇED (Çevresel Etki Değerlendirmesi) belgesi, orman izinleri, kamulaştırmalar, imar izinleri, harita çalışmaları gibi bazı prosedürleri yerine getirmesi gerekmektedir.

RES projeleri ilgili yönetmelik gereği ÇED belgesi almaktan (ÇED kararı çıkmasını gerektiren kararlar hariç) muaftırlar ve “ÇED gerekli değildir” belgesi alarak çevresel yükümlülüklerini yerine getirmiş sayılırlar. Ayrıca 15 km'ye kadar iletim hatları da aynı yönetmelik gereği muafiyet kapsamındadır ve “ÇED gerekli değildir” belgesi almaları gerekmektedir. Rüzgar türbinlerinin kuş göç yollarında bulunması ihtimaline karşı Ornitoloji Raporu alınması da gerekebilir.

RES projelerinin orman sınırlarında kalan kısımları için alınması gereken izinlere ait ödenen bedeller üzerinden de teşvik kapsamında santralin işletme dönemindeki ilk on yılı boyunca %85 oranında indirim uygulanır.

İletim hattı maliyetleri işletmenin ilk 10 yılı içerisinde TEİAŞ tarafından proje sahibine peyderpey geri ödenir.

2 GLOBAL TÜRÜN PİYASASI

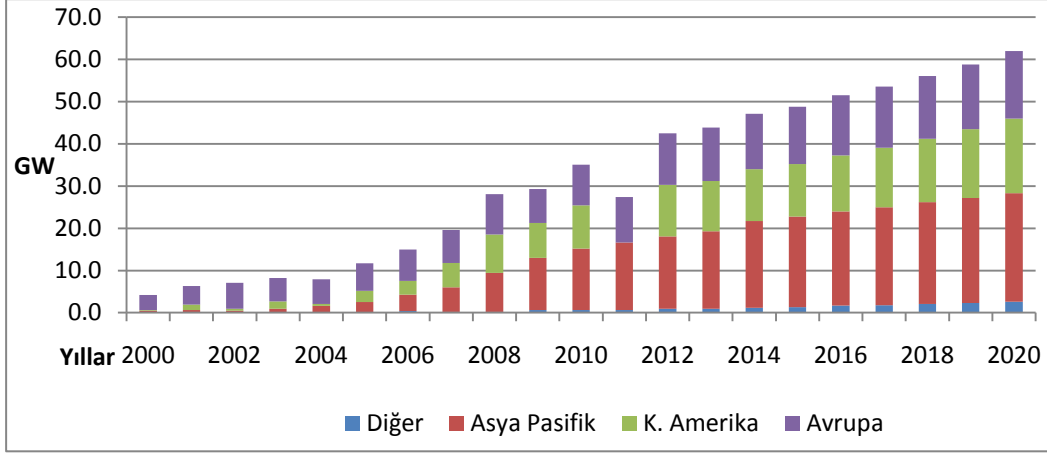
2.1 Giriş

Geçmiş yıllar boyunca rüzgar endüstrisinin sıra dışı büyümesi tüm dünyada enerji sektöründe faaliyet gösteren büyük yatırımcıların dikkatini bu sektöre çekmesine sebep olmuştur. Gerek Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın, gerekse diğer bağımsız kuruluşlar ve devlet destekli enstitülerin hazırladığı raporlarda rüzgar enerjisinin dünyanın enerji talebinin karşılanmasında gün geçtikçe daha büyük bir pay sahibi olacağı öngörülmüştür. Rüzgar santralleri sağladıkları karbondioksit emisyonu azalımları bir tarafa, hükümet teşviklerinin de katkısıyla yatırımcılarına büyük bir ekonomik fayda getirmektedirler.

Gelişmekte olan ülkelerde elektrik enerjisine olan talep patlaması fosil yakıtlardaki fiyat dengesizliğinin de etkisiyle yatırımları alternatif enerji üretim sistemlerine yöneltmiştir. IEA'nın tahminlerine göre OECD ülkelerinde 2030 yılına kadar 2000 GW'lık bir üretim kapasitesi kurulmasına ihtiyaç vardır. Bu açıdan bakıldığında rüzgar enerjisi güzel bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır.

Türbin kule yüksekliklerinin ve kanat çaplarının artması, kanat teknolojilerinin gelişmesi, güç elektroniği endüstrisindeki paralel gelişmeler ve hükümet teşvikleri sayesinde rüzgar enerjisi diğer enerji kaynakları ile rahatlıkla rekabet edebilir hale gelmiştir.

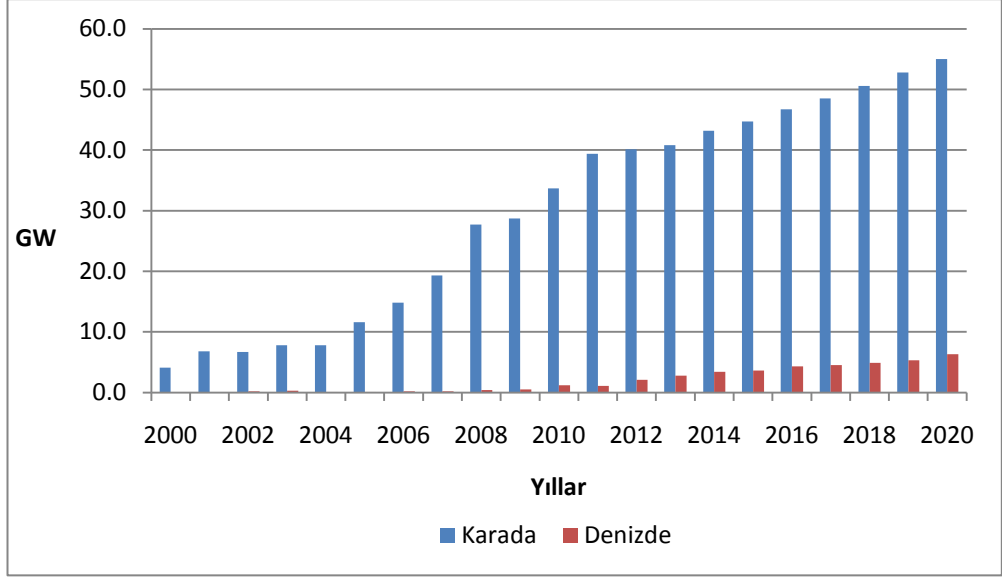
Şekil 2.1 2020 yılına kadar rüzgar enerjisine dayalı üretim tesislerinin kurulu gücü projeksiyonunu göstermektedir. Buna göre bugün büyük ölçüde Avrupa'nın sürüklediği sektör, birkaç yıl içinde Asya'ya doğru kayacak ve çok geçmeden de dünyanın diğer bölgelerinde rüzgar enerjisi kıta Avrupa'sında olduğu gibi yaygın olarak kullanılacaktır.



Şekil 2.1 : Kıtalara göre rüzgar enerjisi kurulu gücü (GW) 2020 projeksiyonu

Son beş yılda her yıl ortalama 7,2 GW yeni rüzgar santrali kurulmuştur. Bu kurulumun %55'i ise sadece Almanya ve İspanya tarafından gerçekleştirilmiştir. Avrupa Birliği'nin 2020 yılında toplam enerji tüketiminin %20'sinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması yönündeki hedefi ve Kyoto Protokolünün getirdiği yükümlülüklerin, kıtadaki rüzgar enerjisine olan yönelimin giderek artmasına sebep olacağı aşikardır. Her ne kadar 2009 yılında yaşanan finans krizinin bu yıl içinde sektördeki büyümeyi %19 düşüreceği görülse de, 2010 yılında rüzgar enerjisi piyasasının 2008 yılındaki büyüme değerlerine ulaşacağı beklenmektedir. Avrupa kıtası rüzgar kurulu gücüne her yıl ortalama 10 GW ekleyerek, 2020 yılında 189,2 GW'lık bir kurulu güce ulaşacak ve küresel rüzgar kurulu gücünün %27'sine sahip olacaktır.[5]

Şekil 2.2 karaya ve denize kurulan santrallerdeki dengeyi göstermektedir. Maliyetleri daha yüksek seyreden ve inşa zorlukları nispeten daha fazla olan deniz (offshore) santrallerinin toplam rüzgar kurulu gücündeki payı 2020 yılında %10'lar seviyesinde gerçekleşecektir.



Şekil 2.2 : Kara ve deniz rüzgar santrallerinin kurula güce (GW) göre 2020 projeksiyonu

Çizelge 2.1’de dünyadaki karadaki (*onshore*) kümülatif kurulu gücün 2020 projeksiyonu ülkeler bazında gösterilmektedir. Görüldüğü gibi ilerleyen yıllarda Avrupa ülkelerindeki hızlı rüzgar kapasitesi artışları yavaşlayacak ve Amerika ile Çin’in yükselişi ise devam edecektir.[5]

Çizelge 2.1 : Global kümülatif rüzgar kurulu gücü (GW) 2020 projeksiyonu

Yıl	2006*	2007*	2008*	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Almanya	20,7	22,4	23,9	25,4	26,7	27,9	28,9	29,9	30,8	31,7	32,7	33,7	34,6	35,7	36,7
İspanya	11,6	14,1	16,7	18,3	19,8	21,8	23,8	25,7	27,7	29,7	31,7	33,7	35,7	37,6	39,6
Danimarka	2,9	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0
İtalya	2,1	2,7	3,7	4,4	5,4	6,5	7,7	8,9	9,9	10,8	11,7	12,5	13,2	13,9	14,5
Hollanda	1,5	1,7	2,0	2,1	2,1	2,3	2,6	2,9	3,1	3,4	3,8	4,1	4,4	4,7	5,0
İngiltere	1,7	2,0	2,6	3,1	3,5	4,2	5,0	5,8	6,7	7,7	8,9	10,1	11,5	13,0	14,6
İsveç	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,6	3,1	3,5	4,0	4,5	5,0	5,6
Yunanistan	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,6	1,9	2,4	2,9	3,5	4,1	4,7	5,4	6,0	6,8
Portekiz	1,7	2,1	2,9	3,6	4,4	5,1	5,7	6,3	6,9	7,4	7,9	8,3	8,7	9,0	9,4
Fransa	1,5	2,5	3,4	4,3	5,5	6,8	8,2	9,7	11,2	12,7	14,3	16,0	17,7	19,4	21,2
Avusturya	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
İrlanda	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
Belçika	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Finlandiya	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
Polonya	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,3	3,9	4,6	5,2	5,8
Romanya	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,6	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5
Bulgaristan	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Meksika	0,0	0,1	0,2	0,4	0,7	0,9	1,2	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,6	2,9	3,2
ABD	11,6	16,9	25,5	32,0	41,0	52,0	62,0	71,5	81,5	92,0	103,0	114,6	127,0	140,5	155,0
Kanada	1,5	1,9	2,4	3,9	4,8	6,9	8,8	10,5	12,0	13,3	14,7	16,0	17,4	18,9	20,5
Y. Zelanda	0,2	0,3	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8	1,9	2,1
Avustralya	0,7	1,1	1,6	1,9	2,3	2,8	3,4	4,1	4,8	5,5	6,3	7,2	8,1	9,0	10,0
Japonya	1,4	1,7	2,0	2,3	2,5	2,8	3,0	3,3	3,5	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8
Çin	2,6	5,9	12,2	22,2	34,2	47,2	61,2	76,2	93,0	110,6	128,9	147,9	167,5	187,7	208,4
Hindistan	6,3	7,9	9,7	11,2	12,8	14,6	16,5	18,5	20,6	22,8	25,1	27,5	30,0	32,6	35,3
Mısır	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3	2,6
Şili	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	2,0
Brezilya	0,2	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,3	4,0	4,7	5,5

*Gerçekleşmiş değerler

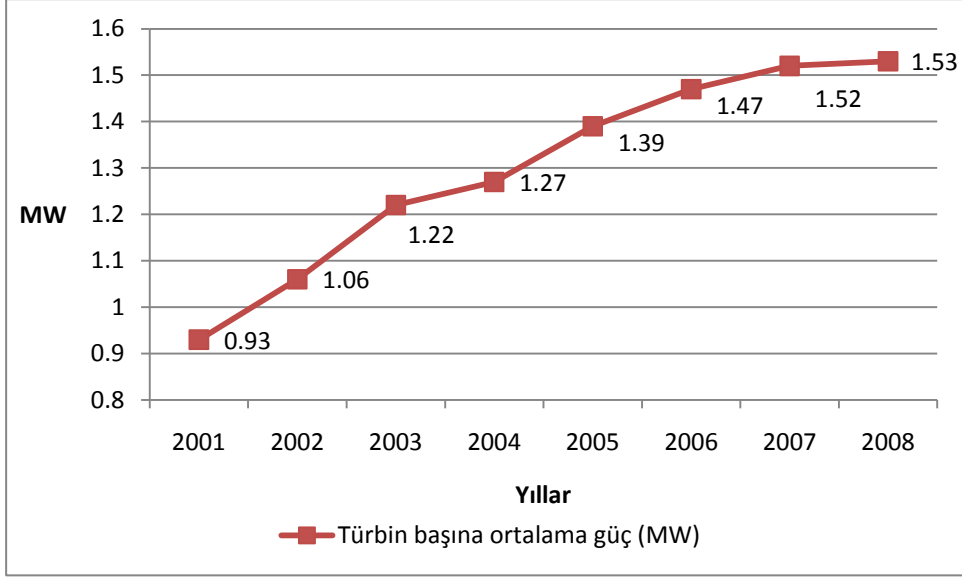
2.2 Türbin Piyasalarına Genel Bakış

Bir rüzgar santralının planlanmasında türbin seçimi çok önemlidir. Bütün maliyetlerin ortalama %75 kadarını türbin maliyetleri oluşturur. Çizelge 2.2 maliyet kalemlerini göstermektedir.

Çizelge 2.2 : Bir rüzgar santralının maliyet kalemleri

	Pay (%)
Türbin	75
Türbin Temelleri	6
Elektrifikasyon	2
Şebeke Bağlantısı	8
Danışmanlık	1
Arazi	4
Yol	1
Diğer	3
Toplam	100

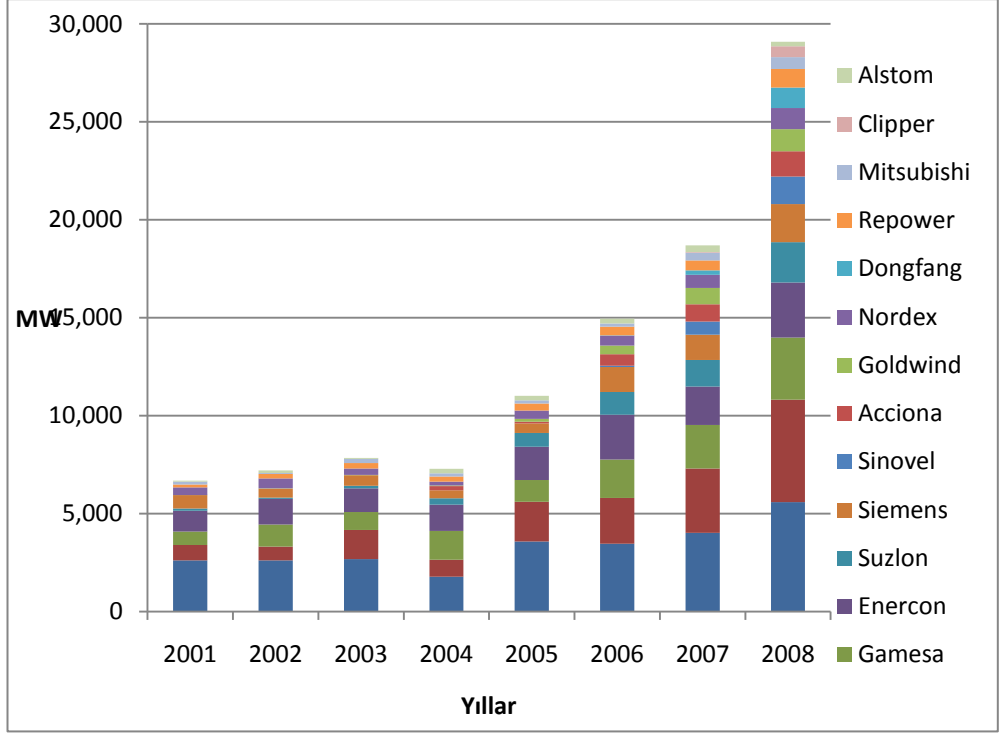
Teknik açıdan bakıldığında türbin seçimi sahanın rüzgar profili, grid (şebeke) kısıtları gibi parametrelere bağlıdır. Teknoloji ilerledikçe yatırımcılar aynı sahada daha büyük güçlü türbinler kullanarak maksimum çıkış gücünü ve ekonomik faydayı sağlayabilmektedirler. Şekil 2.3 2008 yılı itibariyle işletmede olan türbinlerin ortalama kurulu gücünü göstermektedir. Görüldüğü gibi 7 yılda türbin başına güç yaklaşık %65 artmıştır.[6]



Şekil 2.3 : Türbin nominal güçlerinin (MW) artış seyri

2.3 Türbin Üreticileri

Rüzgar türbini üretiminin çoğu belli başlı Avrupalı firmalar tarafından gerçekleştirilmektedir. Mevcut durumda Avrupa pazarında Vestas, Enercon ve Gamesa ön plana çıkarken, Kuzey Amerika’da GE, Vestas, Siemens ve Gamesa, Asya’da ise Sinovel, Suzlon, Vestas ve Goldwind piyasada üreticiler olarak ön plandadırlar. Şekil 2.4’de global türbin pazarında firmaların payları halihazırda kurulu bulunan toplam MW türbin olarak görülmektedir.



Şekil 2.4 : Türbin üreticilerinin pazar payları

Bu oranlarla 2008 sonu itibariyle;

Vestas %25, GE %15, Enercon %15, Gamesa %12, Siemens %8,5, Suzlon %7,5, Nordex %4, Acciona %2,5, Repower %3,5, Goldwind %2,5, Sinovel %2 pazar paylarına sahiptirler.[6]

En büyük 15 türbin üreticisinin üretim yerlerinin dağılımı da Çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 : Türbin firmalarının üretim merkezlerinin kıtalara göre dağılımı

	Avrupa	Amerika	Asya
Vestas	Danimarka, Almanya, Norveç, İsveç, İtalya, İspanya	ABD	Çin, Hindistan
GE	İspanya, Almanya	ABD, Kanada	Çin
Gamesa	İspanya	ABD	Çin
Enercon	Almanya, Portekiz, İsveç, Türkiye	Brezilya	Hindistan
Suzlon		ABD	Hindistan, Çin
Siemens	Danimarka, Almanya	ABD	
Sinovel			Çin
Acciona	İspanya	ABD	Çin
Goldwind			Çin
Nordex	Almanya		Çin
Dongfang			Çin
Repower	Almanya		Çin
Mitsubishi		Meksika	Japonya
Clipper		ABD	
Alstom	İspanya		

Görüldüğü gibi türbin üretiminin önemli bir kısmı ABD, Çin, Almanya, Danimarka ve İspanya’da gerçekleştirilmektedir. Özellikle Çin ucuz işçilik maliyeti ve iç pazarıyla hemen hemen her türbin firmasının ilgisini çekmiştir.

3 RÜZGAR ENERJİSİ TEMEL DENKLEMLERİ

Bu bölümde rüzgarın sahip olduğu enerjinin hesaplanmasına ilişkin temel denklemler verilecektir.

3.1 Temel Denklemler

Rüzgar hızı anlık olarak değişen bir karakter gösterdiğinden, bu değişimin sürekli izlenmesi ve doğru bir şekilde analiz edilmesi gereklidir. Hızındaki değişimler rüzgarın sahip olduğu enerjiyi de sürekli olarak değişmesine sebep olmaktadır. İyi bir rüzgar analizi için rüzgar hızının anlık değişiminden başka günlük ve mevsimsel değişimleri de incelenmelidir.

Rüzgarın sahip olduğu enerjinin belirlenmesinde temel veri rüzgar hızı ve frekansdır. Bu verilerle bir bölgenin sahip olduğu enerji potansiyeli ortaya konabilir. Bunun için ilk önce hız bilgisinden rüzgarın sahip olduğu kinetik enerji hesaplanmalıdır. Rüzgar hareket halindeki bir hava kütlesi olduğundan sahip olduğu enerji de kinetik enerjidir.

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

Bu denklemde;

m, türbin süpürme alanında hareket halindeki havanın kütlesi (kg)

v, hava kütlesinin hızı (m/s) ifade eder.

m (kütle)'yi ρ hava yoğunluğu ve A türbin kanatlarının taradığı alan olmak üzere;

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

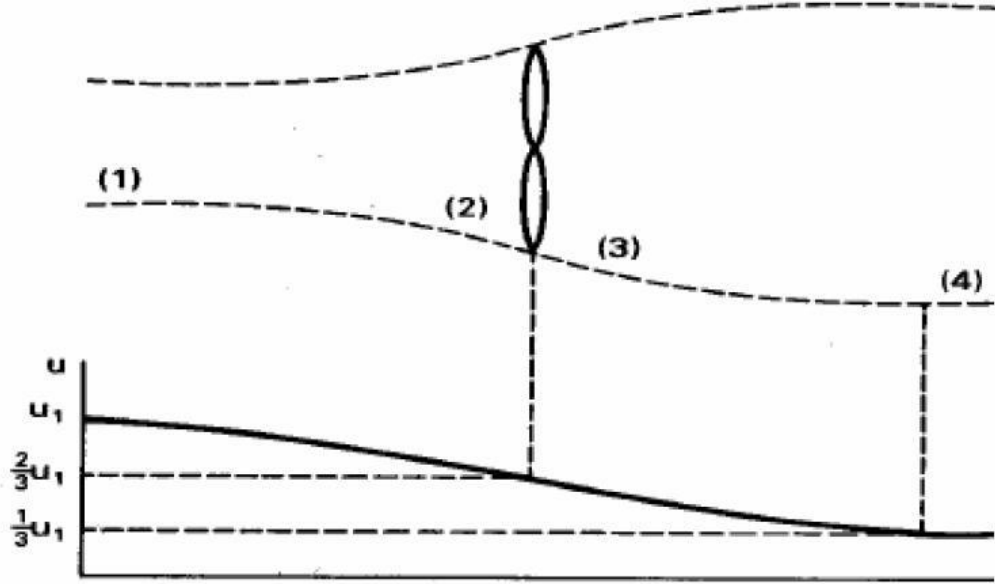
şeklinde ifade edip bir önceki denklemde yerine yazarsak;

$$\text{K.E.} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \text{ (W)} \quad (3.3)$$

olarak elde edilir. Bu denklemden açıkça görülmektedir ki, rüzgarın sahip olduğu enerji hava yoğunluğuna, rotor süpürme alanına ve en çok da rüzgar hızının küpüne bağlıdır. Bu sebeple rüzgar hızının ölçülmesinde yapılacak küçük hatalar, enerji analizlerinde büyük hatalar olarak yansıtacaktır.

3.2 Betz Limiti

Bir türbinin önüne gelen hava kütlesi Şekil 3.1'deki gibi davranır.



Şekil 3.1 : Türbine yaklaşan hava kütlesi

Görüldüğü gibi türbine yaklaşan hava akımının hızı düşmekte ve türbini geçtikten sonraki hızı (4 anı), baştaki (1 anı) hızının 3'te 1'ine karşılık gelmektedir (Şekil 3.1). Hızdaki bu azalmanın sebebi rüzgarın türbine yaklaştıkça aynı hava kütlesinin daha geniş bir alana yayılması ve sahip olduğu enerjinin bir kısmının rotora aktarılmış olmasıdır.

Rüzgar türbini rüzgarın türbinin önünde ve arkasında sahip olduğu kinetik enerjilerin farkı kadar enerji üretecektir. Bu ifadeyi aşağıdaki denklemlerle ifade edebiliriz:

$$P = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_3^2) \quad (3.4)$$

Rüzgar hızının rotordaki değeri; rotora giriş ve çıkıştaki hızlarının ortalaması olduğu kabul edilir. Bu durumda m (kütle);

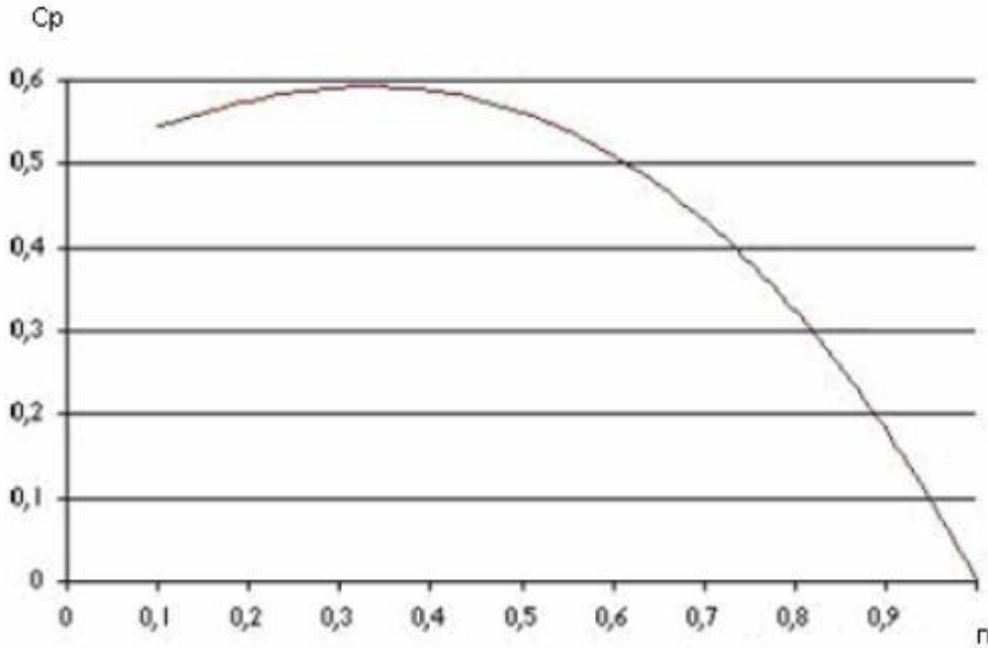
$$m = \rho A \frac{(v_1 + v_3)}{2} \text{ ifadesi Denklem 3.4'de yerine konursa;}$$

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_3) (v_1^2 - v_3^2) \quad (3.5)$$

Elde ettiğimiz bu denklem, rüzgarın sahip olduğu enerji ile üretilecek enerjinin oranı güç faktörü (C_p)'ye göre düzenlenecek olursa;

$$C_p = \frac{1}{2} (1 + n)(1 - n^2) \quad (3.6)$$

$n = \frac{V_3}{V_1}$ olmak üzere, C_p 'nin maksimum çözüm noktasını bulmak için türevi alınıp 0'a eşitlenirse $n = \frac{1}{3}$ değerinde C_p 'nin maksimum 0,59 değerine ulaştığı görülür. Buna Betz Limiti denir (Şekil 3.2).



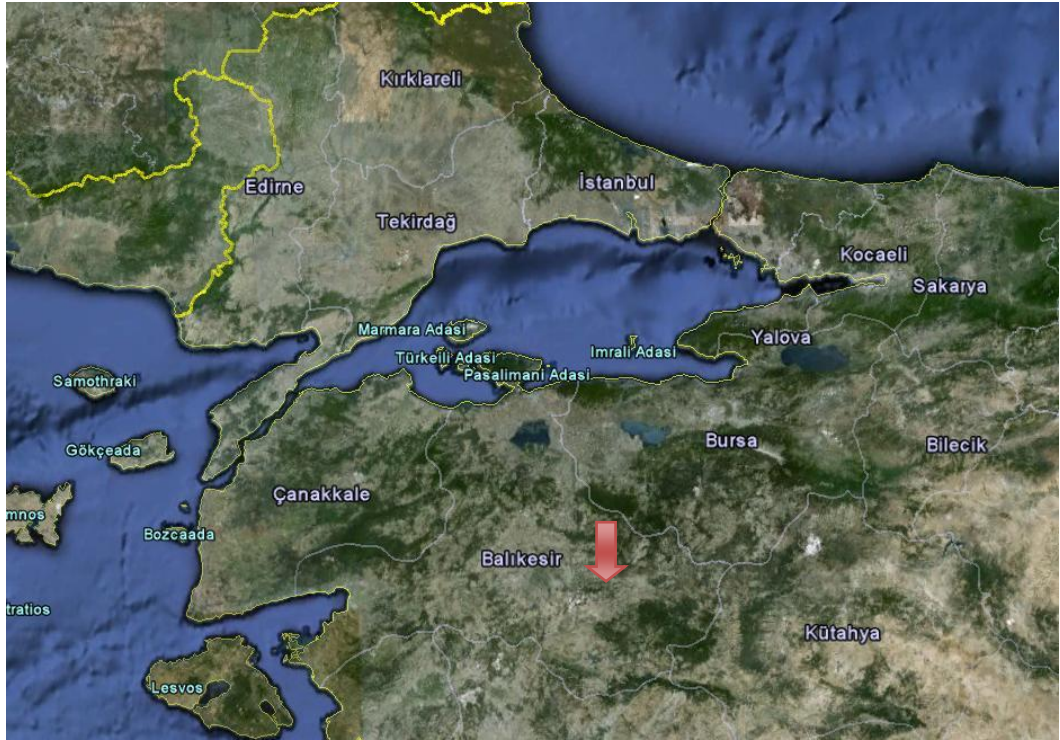
Şekil 3.2 : Betz Limiti

Bunun anlamı bir rüzgar türbinine yaklaşan rüzgarın sahip olduğu enerjinin herhangi bir durumda en fazla %59'u kullanılabilir, faydalı enerjiye dönüştürülebilir. Bu değer aynı zamanda türbinlerin ulaşabileceği maksimum verim değeridir. Ancak piyasada ticari olarak satılan türbinler genellikle bu değer de altında bir performansla çalışırlar. Bunun sebebi rotor etrafında oluşan türbülans ve dişli kutusu gibi elemanlarda ve elektrik sistemlerindeki kayıplardır.

4 BALIKESİR'DE ENERJİ ANALİZİ UYGULAMASI

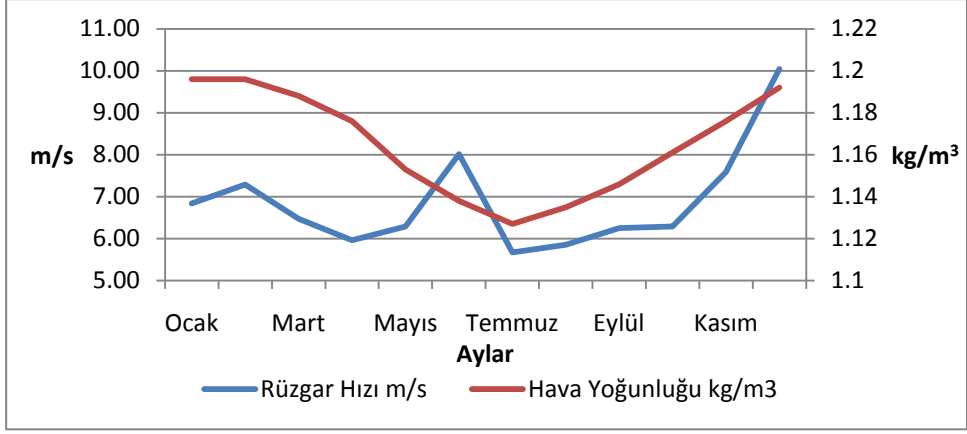
4.1 Uygulama Sahasının Tanıtımı

Çalışmaya konu olan saha Balıkesir'in 25 km kuzeydoğusunda bulunmakta, kompleks yapıdaki bir arazide ve 200 – 450 metre rakım aralığında olup, saha ortalaması 230 metredir. Sahanın haritası Şekil 4.1'de görülmektedir.

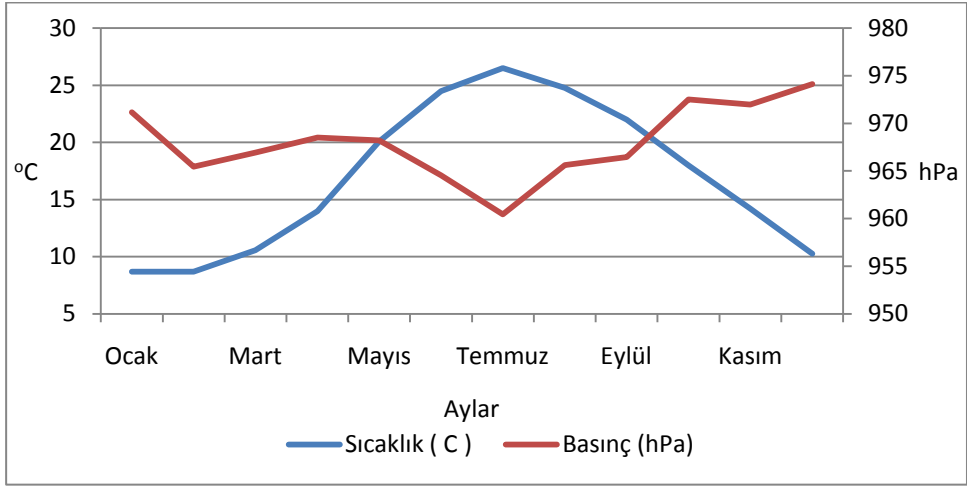


Şekil 4.1 : Proje uygulama sahası

Sahayı temsil edebilecek bir noktada, 50m yüksekliğindeki ölçüm direğinden elde edilen veriler incelendiğinde sahanın bir yıllık ortalama sıcaklığı 16 °C, ortalama hava basıncı 968 hPa, hava yoğunluğu 1,165 kg/cm³ ve 50m yükseklikte ortalama rüzgar hızı 6,9 m/s olduğu görülmüştür. Sahada yapılan keşiflerde yaklaşık 5m yüksekliğinde seyrek ormanlık alanlar göze çarpmıştır. Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Çizelge 4.1'de yıl boyunca sıcaklık, basınç, rüzgar hızı ve hava yoğunluğu değişimi görülebilmektedir.



Şekil 4.2 : Sahanın rüzgar hızı - hava yoğunluğu değişimi



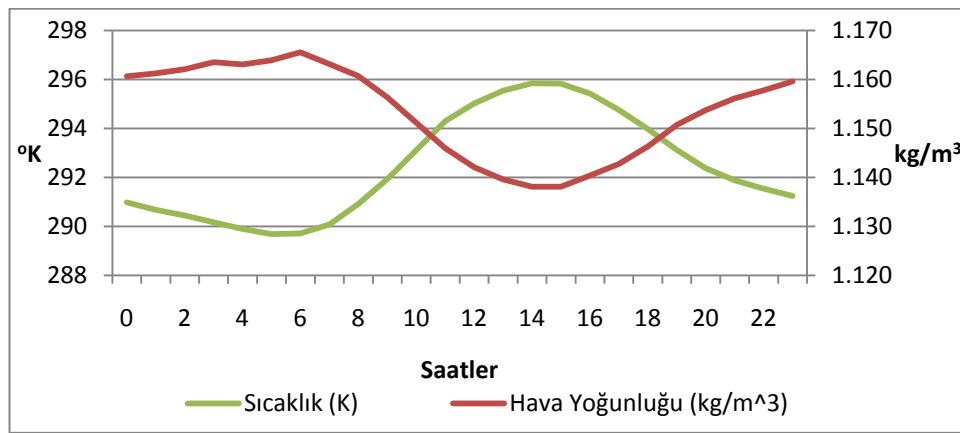
Şekil 4.3 : Sahanın sıcaklık - basınç değişimi

Her iki grafiğe beraber bakıldığı takdirde sıcaklığın yüksek, hava yoğunluğu ve basıncın düşük seyrettiği yaz aylarında rüzgar hızında bir artış gözlemlenmektedir. Yaz aylarında hava yoğunluğunda gözlemlenen düşük değerler, bu aylarda sıcaklığın yüksek olmasıyla açıklanabilir. Bu parametreler arasında daha doğru bir ilişki kurabilmek için uzun yıllar verilerine bakılmalıdır.

Çizelge 4.1 : Sahanın sıcaklık - basınç – hava ve güç yoğunluğu değişimi

	Sıcaklık (C)	Basınç (hPa)	50m Rüzgar Hızı m/s	Hava Yoğunluğu kg/m ³	Güç Yoğunluğu W/m ²
Ocak	9	971	6,84	1,196	257
Şubat	9	965	7,29	1,196	547
Mart	11	967	6,47	1,188	288
Nisan	14	968	5,96	1,176	209
Mayıs	20	968	6,29	1,153	316
Haziran	24	965	8,01	1,138	282
Temmuz	27	960	5,67	1,127	450
Ağustos	25	966	5,86	1,135	731
Eylül	22	966	6,25	1,146	328
Ekim	18	973	6,29	1,161	367
Kasım	14	972	7,59	1,176	358
Aralık	10	974	10,04	1,192	262

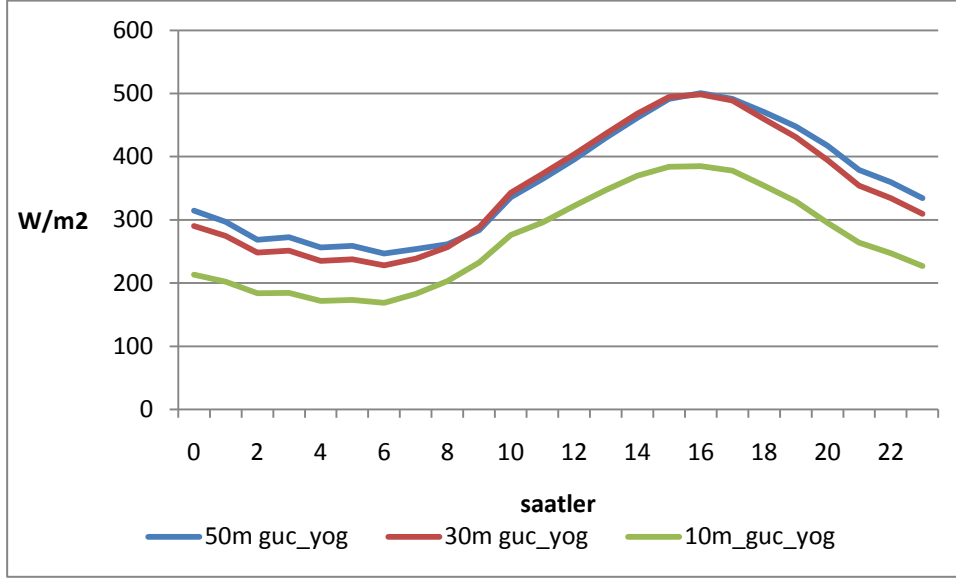
Şekil 4.4’de hava yoğunluğu değişiminin, hava sıcaklığının gece ve gündüz farklı sıcaklıklarda olması ile ilişkisi görülmektedir. Hava yoğunluğunun yüksek değerleri geceleyin ve düşük değerleri de sıcaklığın daha yüksek olduğu gündüz vakitlerinde gözlemlenmiştir. Detaylı enerji hesaplarında gece ve gündüz gerçekleşen bu farklılıklar göz önünde alınmalıdır. Zira hava yoğunluğu rüzgardan elde edilebilecek gücün hesaplanmasında direk çarpan olarak denkleme katılmaktadır. Dolayısıyla da üretilecek enerji miktarına değerindeki değişim kadar etki edecektir.



Şekil 4.4 Hava yoğunluğu - sıcaklık değişimi

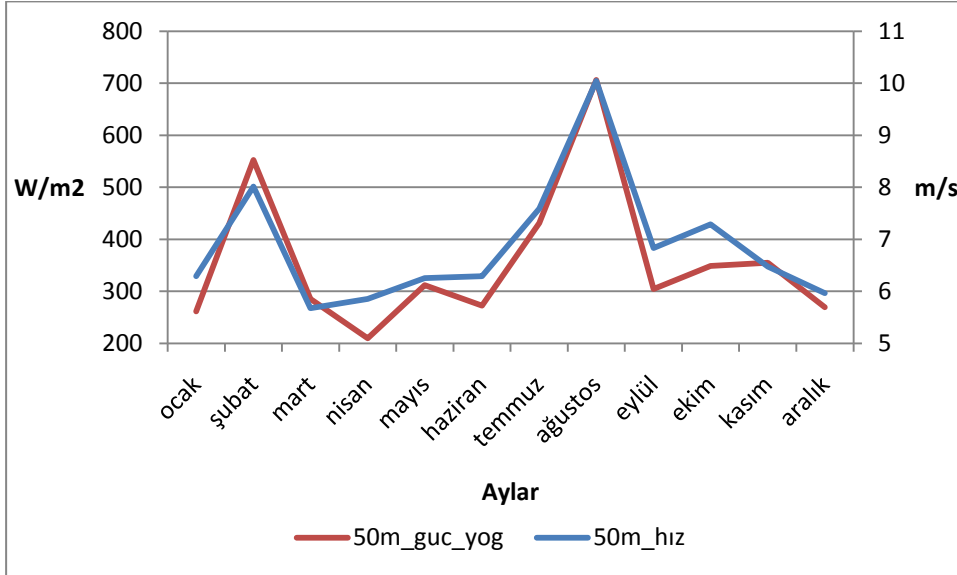
Gün içindeki sıcaklık değişimlerinin güç yoğunluğu ve rüzgar hızını nasıl etkilediği Şekil 4.5’den görülmektedir. Gün içindeki 10°C’lik sıcaklık farkları rüzgar hızını

ortalama 1 m/s oynatmakta ve güç yoğunluğu da bu değişimden 100-150 W/m² etkilenmektedir.



Şekil 4.5 : Güç yoğunluğunun farklı yüksekliklerdeki değerlerinin gün içinde değişimi

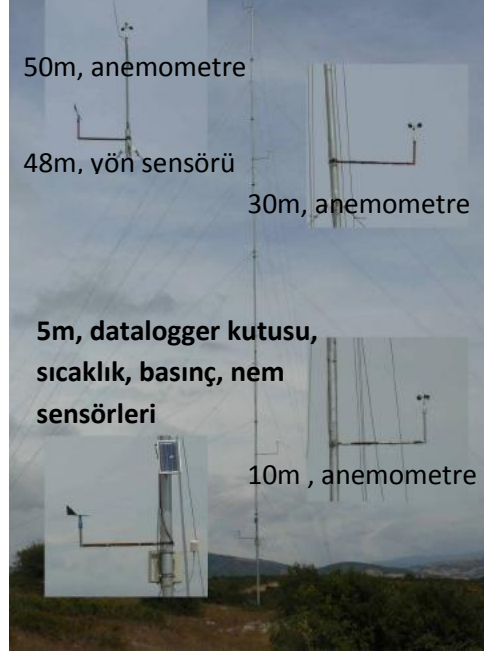
Güç yoğunluğunun rüzgar şiddeti değişimine göre değişimi ise Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6 : Rüzgar hızı ve güç yoğunluğu aylık değişimi

4.2 Ölçüm İstasyonu

IEC standartlarında ve akredite laboratuvarlarda kalibre edilmiş ölçüm cihazları kullanılarak 2008 Eylül – 2009 Eylül arasında 5m de sıcaklık, basınç, nem ölçümleri, 10m, 30m, 50m’de rüzgar hızı ölçümleri ve 48m’de rüzgar yönü ölçümleri 10



Şekil 4.7 : 50m rüzgar ölçüm istasyonu

dakikalık aralıklarla, boru tip direk ile yapılmıştır. Şekil 4.7’de ölçüm istasyonunun konfigürasyonu görülmektedir.

4.3 Arazi Yapısı

Aşağıda ölçüm noktamız referans alınmak üzere 3,5 km yarıçaplı bir daire içerisinde eğimi %30’den fazla olan alanlar kırmızı ile gösterilmektedir. Sahamızın güneydoğu ve kuzeybatısında eğimi nispeten yüksek olan kısımlar göze çarpmaktadır.

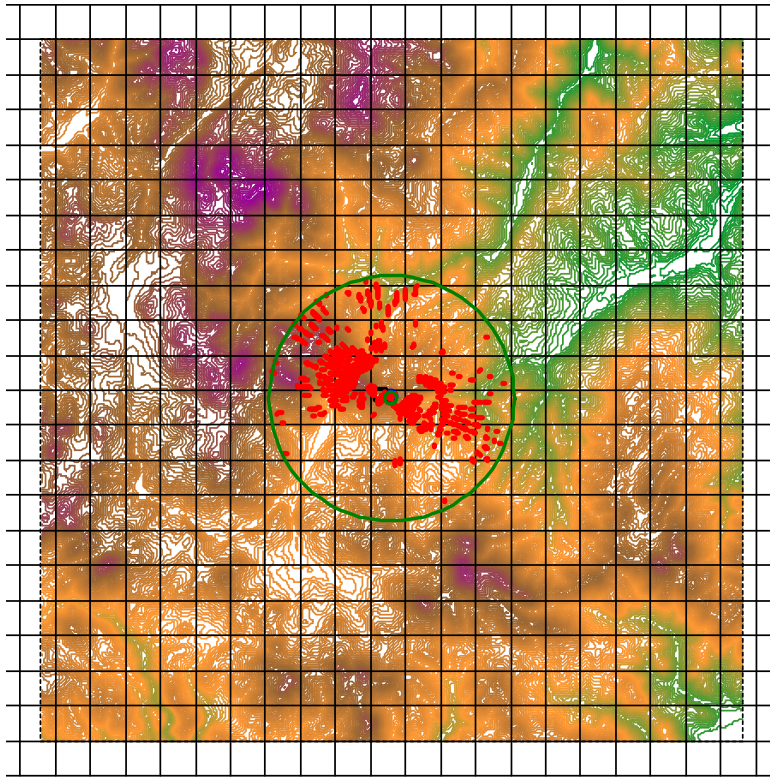
Topoğrafya rüzgarın yönü ve hızının dağılımında önemli bir rol oynar. Dağ silsileleri, tepeler ve kayalıklar rüzgar hız ve yön profilini büyük ölçüde etkiler. Dağ silsilelerinin denize paralel, hâkim rüzgar yönüne dik, orta eğimli (10° - 22°) ve özellikle çıplak olduğu sahalarda enerji üretimi için uygun sahalardır. Zirvede rüzgar hızı, eğim ve dağ grubunun büyüklüğüne bağlı olarak artar. Bu nedenle, tepelerin üst-ön kısmı tesis için uygundur. Fakat tepenin üst-arka kısmı türbülans nedeniyle göz önüne alınmamalıdır.

Sahanın ortalama pürüzlülük indeksi (RIX – ruggedness index) % 4,31 (Çizelge 4.2) olarak hesaplanmıştır. RIX değerinin 0 veya 0'a yakın değerler alması, sahadaki eğimlerin %30'dan daha az olduğunu gösterir ki, yapılan çalışmalar böyle bir arazideki rüzgar akışının Wasp'ın tasarım, performans kriterlerine uygun olduğunu ve bu sahada Wasp programının kullanılmasının yüksek RIX değerli sahalara nispeten daha uygun olduğunu gösterir.

Eğer referans noktası (ölçüm alınan nokta) ile Wasp'tan tahmin yapmasını istediğimiz nokta (türbin noktası) birbirine yakın RIX değerlerine sahip ise (delta RIX yaklaşık olarak 0 ise) hata nispeten az olacaktır.

Eğer referans noktamızın RIX değeri, türbin noktasının RIX değerinden daha büyük ise Wasp bütün hesaplarda (enerji, rüzgar hızı vs.) negatif bir hata (underestimate, gerçek değerinden daha düşük bir değerde tahmin) yapar.[7]

Eğer referans noktamız türbin noktasına göre daha düz bir alanda bulunuyorsa, yani RIX değeri türbin noktasına göre daha düşük ise, bu durumda Wasp pozitif bir hata (overestimate, gerçek değerinden daha yüksek bir değerde tahmin) yapacaktır. Ölçüm noktasındaki %4,31'lik RIX değeri sahamızı orografik olarak orta komplekslikteki bir kategoriye sokmaktadır.



Şekil 4.8 : Sahanın RIX haritası

Çizelge 4.2 : Sahanın pürüzlülük indeksi

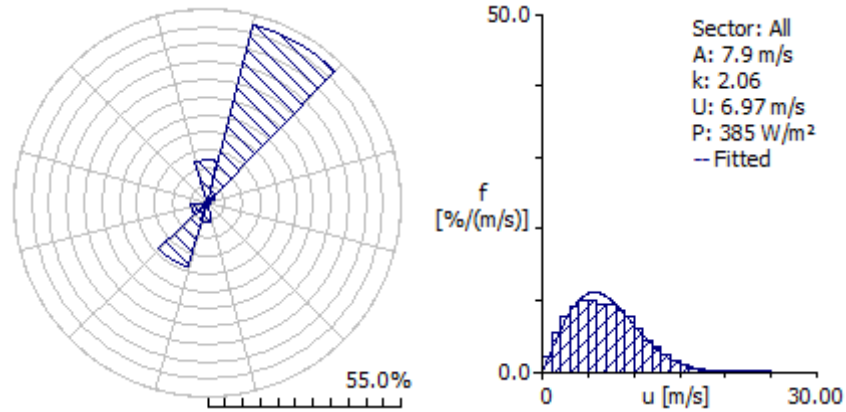
Sektör (°)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
RIX (%)	3,21	0	0,78	4,92	6,56	0,74	0	0	0	8,19	19,12	8,21

Bu açıklamalar ışığında sahamıza baktığımızda türbinlerimizi hâkim rüzgara karşı önu açık, güç potansiyelinin yüksek olduğu ve RIX haritasına (Şekil 4.8) göre Wasp tahmin hatalarının nispeten daha düşük seviyelerde olacağı noktalara koymak mantıklı bir davranış olacaktır.

4.4 Rüzgar Verisi

Elimizdeki rüzgar verisinde 52486 adet kayıt ile %1'in altında kayıp gerçekleşmiştir ki bu rakam elimizdeki verinin enerji analizi amacıyla kullanılmak üzere ideal bir veri yapar.

Bahsi geçen ölçüm istasyonunda yapılan rüzgar ölçümleri Wasp programında değerlendirilerek Şekil 4.9'deki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.9 : Rüzgar gülü ve Weibull dağılımı

Bune göre hâkim rüzgar yönü kuzey doğu yönünden olmak üzere, ortalama rüzgar hızı 6,97 m/s, Weibull k parametresi Türkiye'nin coğrafi konumu için makul bir değer olan 2,06 olarak hesaplanmıştır.

50m'de alınan rüzgar hızı ve 48m'de alınan rüzgar yönü değerleri de Wasp programında sektörel olarak Çizelge 4.3'deki sonuçları vermiştir. Tablodan da

görülebildiği gibi %51,8 frekans ile hâkim rüzgar yönü olan NNE yönünde (30°) en yüksek rüzgar hızı (8,17 m/s) ve güç yoğunluğu ($E=482 \text{ W/m}^2$) değerine ulaşmıştır.

Rüzgar ölçüm verilerinin incelenmesi sonucu, ölçüm yapılan noktanın türbülans yoğunluğu da ayrıca belirlenmelidir. Türbülans yoğunluğu seviyesinin yüksek olması enerji üretim miktarını düşürür, rüzgar türbini üzerine etkiyen kuvvetlerin şiddetini ve malzeme yorulmasının hızını artırır. Bu durum rüzgar enerji santrallerinin ekonomik ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır. Türbülans yoğunluğunun belirlenmesi için öncelikle rüzgar hız ölçüm serilerinin ortalama hızı ve standart sapması belirlenmelidir. Standart sapma önemli bir kavram olup rüzgar hızlarındaki dalgalanmaları tanımlamak için kullanılır. Rüzgar hız verilerinin standart sapması 0 ile 3 m/s, rüzgar yön verilerinin standart sapması ise 3° ile 75° arasında olmalıdır. Herhangi bir alandaki standart sapmanın küçük olması demek o alandaki rüzgar rejiminin son derece düzenli olması anlamına gelmektedir. Rüzgar hız verilerinin standart sapma miktarının bu verilere ait ortalama hız değerine oranı ise türbülans yoğunluğu olarak adlandırılmaktadır. Türbülans yoğunluğunun yüksek olduğu alanlara rüzgar enerji santrali kurmaktan kaçınılmalıdır.[8]

Çizelge 4.3 : Frekans analizi

	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	All
A	6.7	9.2	3.2	1.9	1.6	2.2	6.1	7.1	5.0	4.3	3.6	4.7	7.9
k	2.70	2.87	1.58	1.66	1.58	1.29	1.24	1.58	1.36	1.08	1.09	1.53	2.06
U	5.94	8.17	2.88	1.66	1.48	2.08	5.71	6.38	4.53	4.19	3.48	4.21	6.97
E	192	482	37	7	5	19	429	400	180	226	127	121	385
f	12.1	51.8	2.4	0.6	0.6	1.0	5.2	19.0	4.9	0.9	0.5	1.0	100

Elimizdeki rüzgar hızı verisinin “ σ ” standart sapması 3,66 m/s, yön verilerinin standart sapması ise 99° olarak hesaplanmıştır. Bu durum için türbülans yoğunluğu;

$$TI = \sigma / V$$

$$TI = 3,66 / 6,9$$

TI = 0,53

olarak hesaplanır.

4.5 Harita

Çalışma kapsamında kullanılan bütün haritalar NASA'nın ürettiği SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) haritalarıdır. SRTM haritaları rüzgar enerjisi analizleri amacıyla tüm dünyada yaygın olarak kullanılmakta ve tavsiye edilmektedir.

Proje uygulama sahamızı kapsayan SRTM haritası uygun formata dönüştürülerek, ölçüm noktası merkez alınarak oluşturulmuş 20 km x 20 km'lik bir alanda çalışılmıştır. Çalışmalarda kullanılan bütün haritalar UTM koordinat sistemindedir (Datum ED50).

4.6 Güç Kanunu (Hellman Bağıntısı)

Rüzgar güç kanunu (wind power law) aynı noktadaki birden fazla yükseklik seviyelerinin rüzgar hızları arasındaki ilişkiyi ifade eder. Güç kanunu genellikle rüzgar projelerinin değerlendirilmesinde ölçüm yapılan yükseklikteki rüzgar hızının, türbin göbek yüksekliğindeki rüzgar hızına yükseltilmesi amacıyla kullanılır.

Güç kanunu bağıntısı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\frac{V}{V_r} = \left(\frac{h}{h_r}\right)^\alpha$$

h: rüzgar hızı bilinmek istenen yükseklik seviyesi (m)

h_r: rüzgar hızı bilinen yükseklik seviyesi (m)

v: bilinmek istenen rüzgar hızı (m/s)

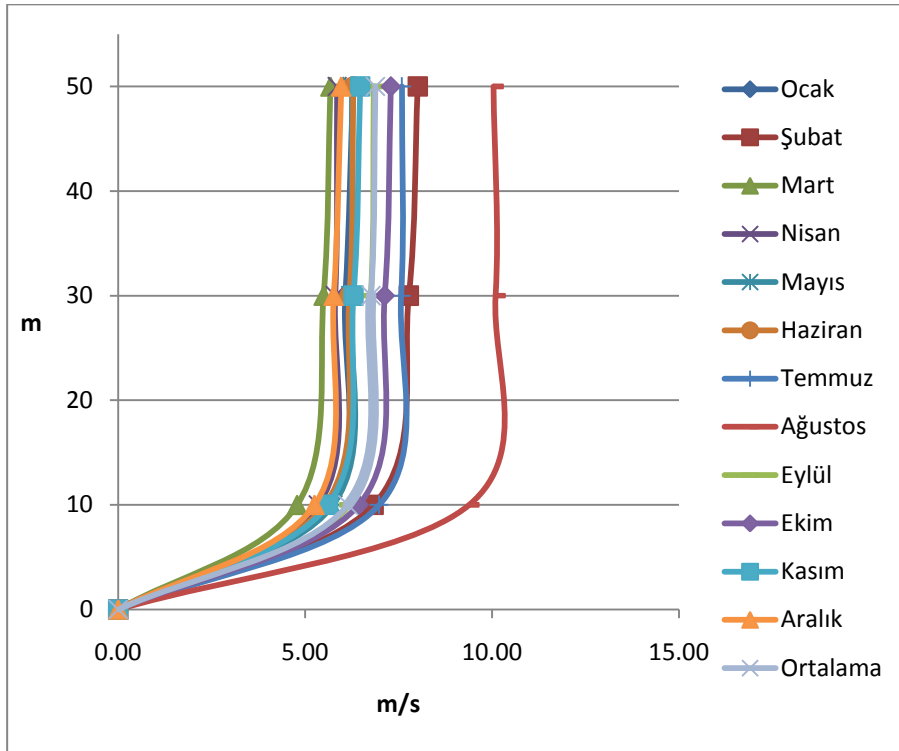
v_r: ölçüm neticesi bilinen rüzgar hızı (m/s)

α: alfa katsayısı (windshear coefficient)

Burada α her saha için sürekli değişen önemli bir parametredir. Alfa katsayısının doğru bir şekilde tespit edilebilmesi için ölçüm noktasında birden fazla yükseklikte rüzgar hızı bilgisi alınmalıdır. Bu sayede rüzgar hızı bilinen iki farklı yükseklik seviyesi arasındaki α, denklemden hesaplanarak saha hakkında fikir edinilir. Bunun mümkün olmadığı durumlarda α değeri literatürde 1/7 olarak alınarak bir üst seviye

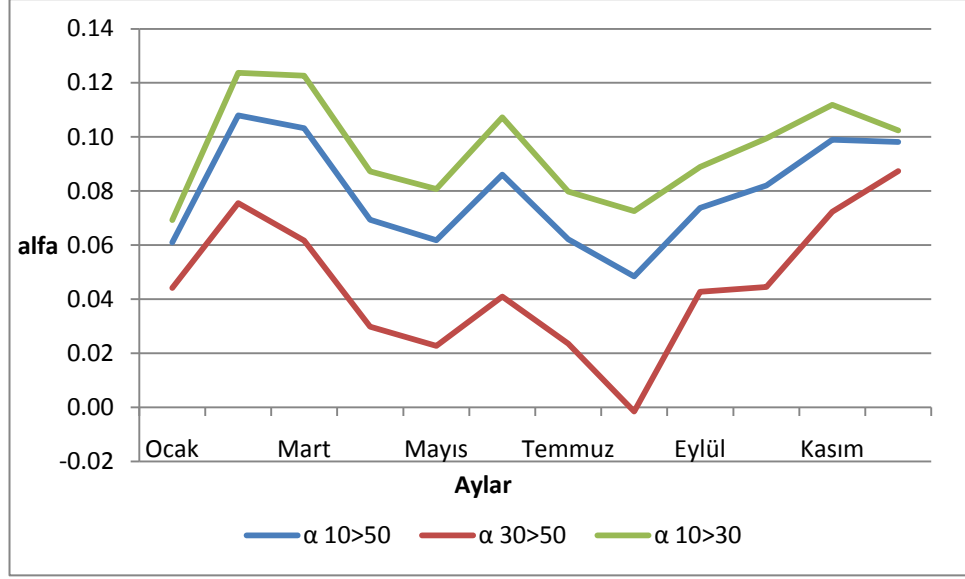
rüzgar hızı tahmin edilir. Ancak bu kabul rüzgar enerjisi hesaplarında ciddi bir belirsizlik ve güvensizlik doğurur. Türbin göbek yüksekliğinde rüzgar hızını belirlemenin en doğru yolu göbek yüksekliğinde ölçüm yapmak, mümkün değilse de göbek yüksekliğinin 2/3'ünün altında kalmayacak şekilde ölçüm istasyonu kurmaktır. [9]

Bu çalışmaya konu olan sahada 10m, 30m ve 50m de bir yıl süre ile yapılan ölçümlere göre α (wind shear) Şekil 4.10'da gösterildiği gibi gerçekleşmiştir.



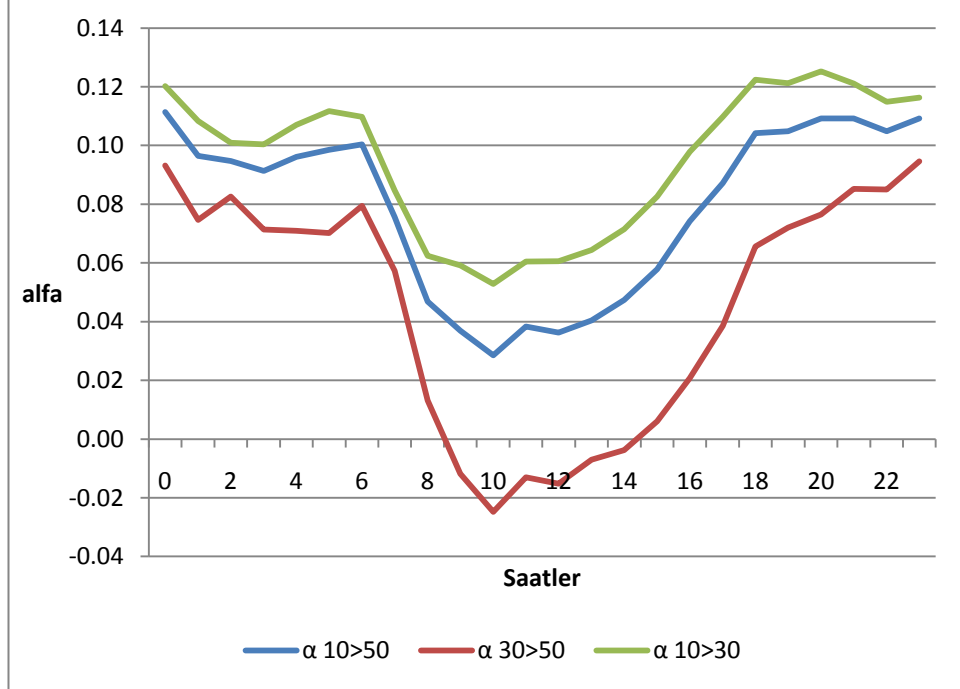
Şekil 4.10 : Alfanın yıl boyunca değişimi

Alfanın mevsimsel değişimi Şekil 4.11'da gösterilmiştir. Rüzgar hızının artış gösterdiği yaz aylarında α 'daki değişim de ortadadır.



Şekil 4.11 : Alfanın aylara göre değişimi

Alfanın gün içinde değişimi Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Bir yıl içinde gerçekleşen değerlere göre α geceleri daha yüksek seyretmektedir.



Şekil 4.12 : Gün içinde alfanın dalgalanması

Görüldüğü gibi α katsayısı aylara göre değişiklik arz etmekte, bu da enerji analizlerimizde sabit bir α değeri kullanmayı değil de, aylık hatta mümkünse günlük α değişimlerinin dikkate alınmasını gerektirmektedir. [9]

Çizelge 4.4'de 3 ölçüm yüksekliğinin farklı kombinasyonları için hesaplanmış α değerleri görülmektedir.

Çizelge 4.4 : Gerçekleşmiş ortalama alfa değerleri

	α
10m => 30m	0,095
10m => 50m	0,079
30m => 50m	0,044

Görüldüğü gibi α asgari ve azami değerleri arasında %50'ye varan değişimler olabilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, 10m'de monte ettiğimiz anemometrenin sahanın pürüzlülüğünden ne kadar etkilendiğidir. Eğer ölçüm istasyonunun yakın çevresinde rüzgarın 10m yüksekliğe kadar akışını değiştirecek bir pürüzlülük ögesi yok ise, bu durumda 10m ile 50m arasında hesaplanmış α değerini kullanmak mantıklı olacak ve α seçiminden kaynaklanacak hataları minimize edecektir.

Çizelge 4.5'de, farklı α değerlerinin genel rüzgar ortalamasını nasıl etkilediği görülmektedir.

Çizelge 4.5 : Alfa katsayısının ortalama rüzgar hızına etkisi

	10m >50m	30m >50m	10m > 30m
$\alpha = 0,143$	7,7 m/s	7,3 m/s	7,2 m/s
$\alpha = 0,2$	8,5 m/s	7,5 m/s	7,7 m/s

Görüldüğü gibi 50m’de 6,9 m/s olarak gerçekleşen rüzgar hızı, literatürde genel olarak kullanılan alfa değerleri ile yükseltme işlemine 10m ölçümleri referans alınarak tabi tutulduğunda 8,5 m/s ve 7,7 m/s gibi değerler elde edilebilmektedir. Aynı yükseltme işlemi 30m ölçümleri referans alınarak yapıldığında ise gerçeğe daha yakın sonuçlar (7,2 ve 7,7 m/s) elde edilmektedir. Sadece bu tablonun sonucu olarak, rüzgar hızı ölçümlerinin türbin göbek yüksekliğinde veya türbin göbek yüksekliğine mümkün en yakın yükseklikte yapılması gerektiği söylenebilir.

4.7 Veri Aralığı

Rüzgar, tahmin edilmesi en zor meteorolojik parametrelerden biri olduğu için, rüzgar santrali kurulacak alanda rüzgar ölçümleri yapmak çok önemlidir. Enerji analizlerinde kullanılacak olan bu ölçümlerin hassasiyeti de aynı derecede önemlidir. Türkiye şartlarında belli bir saha için ölçüm standartlarına uygun uzun dönem verisi elde etmek her zaman mümkün olmamaktadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü’nün Türkiye’nin birçok noktasında yapmakta olduğu meteorolojik manada bir değer ifade eden ölçümler rüzgar enerjisi analizlerinde kullanılmaya genelde uygun değildir. Ancak sahada yapılan ölçümler ile mukayese anlamında bir fikir verebilir.

Saatlik formatta kaydedilen bu verilerle yapılacak enerji analizlerindeki farkları görebilmek amacıyla sahamızda yapmış olduğumuz 10m, 30m ve 50m yüksekliklerde 10dk’lık periyotlarla yapılan rüzgar hızı ölçümleri yarım saatlik ve saatlik ortalamaları alınarak enerji analizlerinde kullanılmıştır.

Kullanılan veri setlerinde rüzgar hızlarının ortalaması Çizelge 4.6’da verilmiştir. Buna göre enerji analizinde kullanılacak 7 farklı durum ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 4.6 : Elde edilen veri setlerinde ortalama rüzgar hızları

Veri seti	10	30	50	1/5 10>50	1/5 30>50	1/7 10>50	1/7 30>50
Ort. Hız m/s	6,1	6,8	6,9	8,5	7,5	7,7	7,3

4.8 Kullanılan Yazılımlar

- **Global Mapper**

Proje sahasının NASA SRTM haritalarının WASP ve OpenWind programına uygun formatlara dönüştürülmesinde Global Mapper programından faydalanılmıştır.

- **Wasp**

Dünyada rüzgar enerjisi analizlerinde yaygın olarak kullanılan Danimarka / Riso laboratuvarlarında geliştirilmiş paket bir programdır. WASP bilgisayar programı rüzgar hız ve yön bilgileri ile rüzgar gözlem istasyonu çevresindeki engellerden, arazi yüzey pürüzlülüğü ve arazinin topoğrafik özelliklerinden yola çıkarak bölgesel rüzgar atlas istatistiklerinin ve enerji potansiyelinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

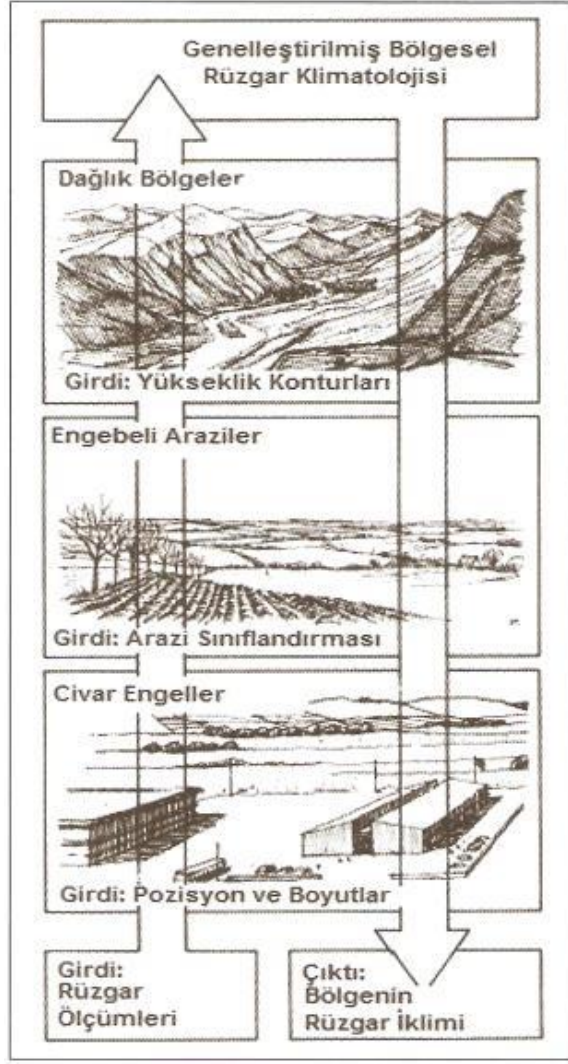
Wasp kendisine veri olarak girilen aşağıda belirtilen 4 bilgiyi (Şekil 4.13) değerlendirerek bölgenin rüzgar atlasını hesaplar.

- ✓ Proje sahasının topoğrafik haritası
- ✓ Rüzgar hızı verileri
- ✓ Bölgenin pürüzlülük haritası
- ✓ Çevredeki engel bilgileri

Wasp programı kompleks yapıdaki arazilerde önemli oranlarda tahmin hatası yapmaktadır. Wasp'ın doğru tahminler yapabilmesi için, söz konusu saha için aşağıdaki parametrelerin *Wasp performans kriterleri* dâhilinde olması gerekmektedir:

- ✓ Referans saha (ölçüm noktası) ve tahmin edilen saha (türbin noktası) genel itibarıyla aynı rüzgar rejimine sahip olması
- ✓ Her iki nokta için rüzgar rejiminin dengeli, istikrarlı olması
- ✓ Yapılan ölçümlerin standartlara uygun (güvenilir) olması
- ✓ Arazinin mümkün mertebe az eğimli ve düz olması
- ✓ Kullanılan haritaların yeterli güvenilirlikte olması[10]

Bu çalışma kapsamında amacımıza ulaşmak için Wasp programına sadece topoğrafik harita ve rüzgar hızı verileri girilmiştir. Her durum için “resource grid” ler oluşturularak sonuçları karşılaştırılmıştır.[10]



Şekil 4.13 : Wasp rüzgar atlası metodolojisi

- **OpenWind**

Proje sahasında türbin optimizasyonu yapılmasına imkân sağlayan Wasp tabanlı bir program. Bu çalışmada türbin koordinatları OpenWind programı ile yapılan optimizasyon çalışması ile elde edilmiş ve bütün durumlar için aynı türbin noktaları esas alınmıştır.[11]

- **WindSim**

Son yıllarda rüzgar akışının modellenmesinde de yaygın olarak kullanılmaya başlayan CFD temelli program. Akım ayrılmalarının yoğun olarak gerçekleştiği sahalarda Wasp doğru sonuçlar vermekten uzaklaşmaktadır. Bu durumdaki sahalarda, temeli Navier – Stokes denklemlerine dayanan, daha geniş bir alanda sahayı inceleyebilen CFD tabanlı programlar kullanılmaktadır.[12,13]

5 ENERJİ ANALİZLERİ

5.1 Metodoloji

Bu çalışmada 50m yüksekliğindeki ölçüm direğinde 10m, 30m ve 50m’de ölçülen rüzgar hızı ve 48m’de ölçülen rüzgar yönü verilerinin 10 dakikalık, yarım saatlik ve saatlik ortalamaları kullanılarak, enerji analizleri yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

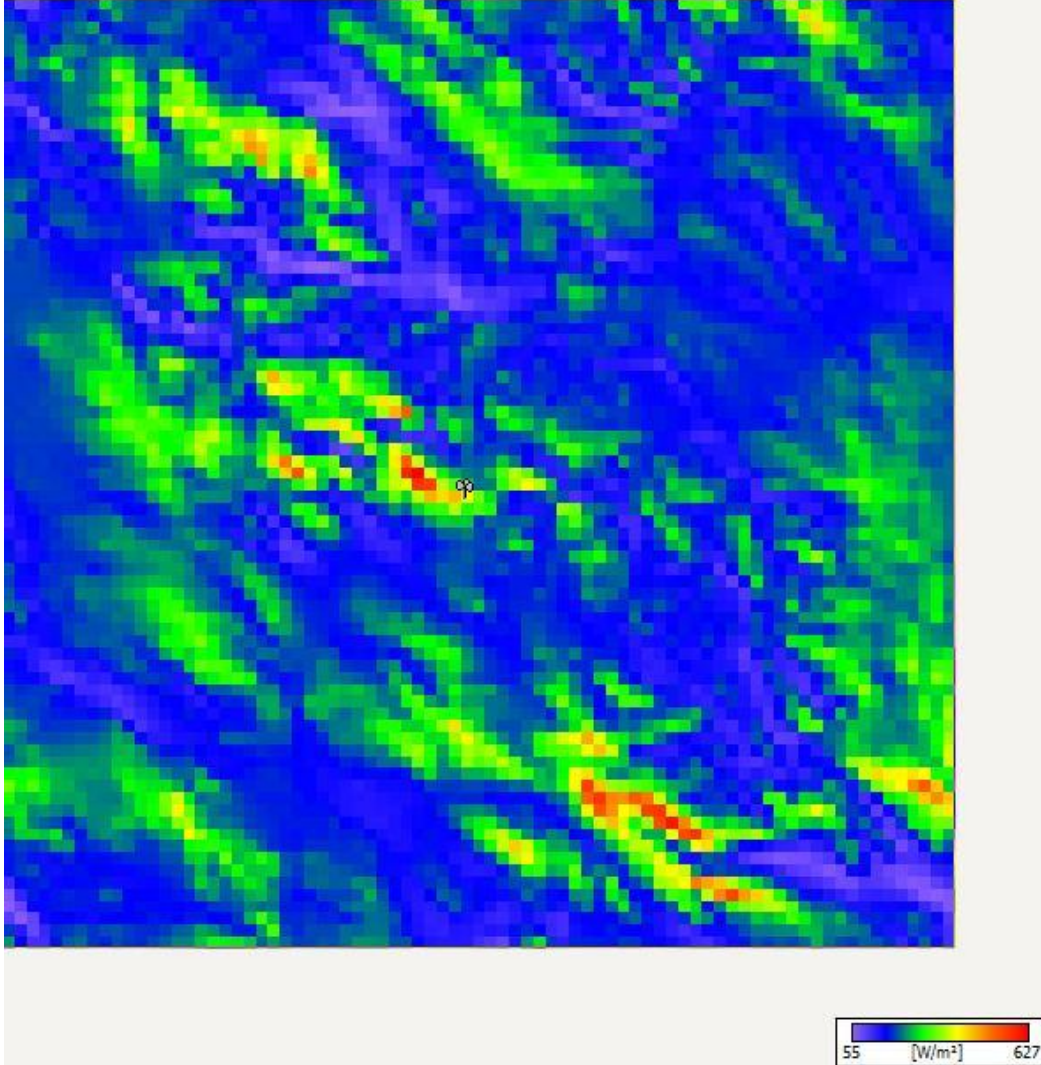
Wasp programında bütün analizler için girilen 7 farklı rüzgar hızı dosyası (OWC file – Observed Wind Climate) aşağıda tablo halinde (Çizelge 5.1) listelenmiştir.

Çizelge 5.1 : Enerji analizlerinde altlık olarak kullanılan veri setleri

10	Wasp programına 10m de ölçülmüş veriler girildi
30	Wasp programına 30m de ölçülmüş veriler girildi
50	Wasp programına 50m de ölçülmüş veriler girildi
1/5 10>50	Wasp programına 10m'den 50m'ye alfa = 1/5 kabulüyle yükseltilmiş veriler girildi
1/5 30>50	Wasp programına 30m'den 50m'ye alfa = 1/5 kabulüyle yükseltilmiş veriler girildi
1/7 10>50	Wasp programına 10m'den 50m'ye alfa = 1/7 kabulüyle yükseltilmiş veriler girildi
1/7 30>50	Wasp programına 30m'den 50m'ye alfa = 1/7 kabulüyle yükseltilmiş veriler girildi

Çalışmada bütün durumlar için üretilen kaynak grid (ızgara) dosyaları 200m çözünürlükte ve yer seviyesinden 50m seviyededir. Bunun anlamı topoğrafik harita üzerinde belirtilen sınırlar içinde 200m aralıklarla bir nokta koymak suretiyle bir ızgara oluşturulması ve ölçüm noktasındaki değerlerin Wasp modeliyle oluşturulan bu noktalarda hesaplanmasıdır. Şekil 5.1’deki harita 10m yükseklikte 10 dakika aralıklı ölçümler kullanılarak 50m de hesaplanmış bir “grid”i göstermekte olup, *grid*

6241 noktadan oluşmaktadır. Bu grid proje sahasında güç yoğunluğu dağılımını ifade etmektedir.



Şekil 5.1 50m yükseklikte hesaplanmış kaynak grid

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 santralının kurulu güç kapasitesini belirlemelidir. Kaç tane rüzgar türbini kurulacak, bunların birim gücü ne olacak ve arazi üzerine nasıl konumlandırılacak gibi sorulara cevap bulunmalıdır.[14]

Çalışma aynı altlıklarla hem 36 MW'lık bir rüzgar santrali projesi düşünülerek, hem de ölçüm noktasında tek bir türbin düşünülerek, aynı işlemler tekrarlanmak suretiyle

yapılmıştır. Bundan amaç programların tahminlerinden kaynaklanabilecek hataları minimize etmek ve gerçeğe en yakın sonuçları elde etmektir.

Bu çalışma da aynı altlıklar aynı göbek yüksekliğine ancak farklı güce sahip 3 türbin markası ve modeli kullanılarak (Çizelge 5.2), farklı türbinlerin hesaplarda oluşturduğu farklılıklarda ortaya konulmuştur. Türbinlerin güç eğrileri üretici firmanın broşürlerinden temin edilmiş olup, sertifikalandırılmış güç eğrileridir. Türbinlerin kule yüksekliği 50m olarak seçilmiştir. Bunun sebebi ise 50m deki rüzgar hızı ölçüm değerlerimizi herhangi bir yükseltme işlemine tabi tutmadan kullanabilmektir.

Çizelge 5.2 Kullanılan türbinler

Türbin	Nominal Güç (kW)	Adet	Cut in (m/s)	Cut out (m/s)	Süpürme alanı (m ²)	Nominal Çalışma Hızı (m/s)	Göbek Yüksekliği (m)	Rotor Diameter (m)
Bonus	1000	36	4	25	2290	18	50	54
Enercon E44	900	40	2	25	1521	16	50	44
Nordex N50	800	45	4	25	1962	16	50	50

Santralin kurulu gücü belirlenirken birbirini en az etkileyecek minimum alana yayılmış maksimum kurulu güce sahip türbin yerleşimi dikkate alınmıştır. Buna göre 36, 40 ve 45 türbinden oluşan 3 ayrı mikro – konuşlandırma işlemi OpenWind programında yapılmış ve uygun koordinatlar elde edilmiştir. Bu yerleşimlere göre birbirine en yakın türbinler arasında 224m mesafe bulunmakta bu da yaklaşık 4,5 rotor çapı mesafeye tekabül etmektedir.

Bir sonraki adımda mikro – konuşlandırmadan kaynaklanabilecek tahmin hatalarını da minimize etmek için ölçüm noktasında aynı türbin modelleriyle yeniden analizler yapılmış ve sonuçlar ayrıca karşılaştırılmıştır.

Son adımda ise sahanın CFD analizleri yapılmış ve sonuçları WASP analizleriyle karşılaştırılmıştır.

5.2 36 MW Rüzgar Santrali Üzerinden Enerji Analizleri

Her türbin tipi için 10dk'lık, yarım saatlik ve saatlik veriler ayrı ayrı hesaplara katılarak toplam 21 durum için enerji hesapları yapılmıştır. Bu hesaplara ait özet tablolar Çizelge 5.3, Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'da gösterilmektedir.

Çizelge 5.3 : 10dk'lık veri setlerinin kullanılması durumu için enerji üretimleri ve kapasite faktörleri

	Veri Seti	Bonus 1MW		Nordex N50 800kW		Enercon E44 900kW	
		MWh/yıl	KF	MWh/yıl	KF	MWh/yıl	KF
10dk veriler	10	105977	33,6	100572	31,9	94759	30,0
	30	102410	32,5	96755	30,7	91981	29,2
	50	93694	29,7	88277	28,0	84124	26,7
	1/5 10>50	134157	42,5	128321	40,7	124548	39,5
	1/5 30>50	98682	31,3	93353	29,6	89523	28,4
	1/7 10>50	116933	37,1	111377	35,3	107322	34,0
	1/7 30>50	104481	33,1	99011	31,4	94803	30,1

Çizelge 5.4 : Yarım saatlik veri setlerinin kullanılması durumu için enerji üretimleri ve kapasite faktörleri

	Veri Seti	Bonus 1MW		Nordex N50 800kW		Enercon E44 900kW	
		MWh/yıl	KF	MWh/yıl	KF	MWh/yıl	KF
Yarım Saatlik veriler	10	106834	33,9	100989	32,0	95411	30,3
	30	102813	32,6	97136	30,8	92242	29,2
	50	93935	29,8	88500	28,1	84241	26,7
	1/5 10>50	134629	42,7	128788	40,8	124886	39,6
	1/5 30>50	110336	35,0	104777	33,2	100401	31,8
	1/7 10>50	117332	37,2	111766	35,4	107600	34,1
	1/7 30>50	104995	33,3	99504	31,6	95170	30,2

Çizelge 5.5 : Saatlik veri setlerinin kullanılması durumu için enerji üretimleri ve kapasite faktörleri

	Veri Seti	Bonus 1MW		Nordex N50 800kW		Enercon E44 900kW	
		MWh/yıl	KF	MWh/yıl	KF	MWh/yıl	KF
Saatlik veriler	10	106894	33,9	101025	32,0	95354	30,2
	30	102769	32,6	97078	30,8	92114	29,2
	50	93986	29,8	88535	28,1	84207	26,7
	1/5 10>50	134592	42,7	128754	40,8	124792	39,6
	1/5 30>50	110328	35,0	104759	33,2	100303	31,8
	1/7 10>50	117132	37,1	111574	35,4	107353	34,0
	1/7 30>50	104799	33,2	99309	31,5	94931	30,1

Bu tabloları kendi içinde 3 farklı kategoride değerlendirmek gerekmektedir.

- **Veri aralığına göre:**

10 dakikalık veriler, yarım saatlik veriler ve saatlik verilerle aynı türbin modeli için yapılan analiz sonuçlarındaki farklılık %1 mertebesinde. Örneğin 10 dakikalık veri aralığına sahip 10m deki veriler kullanılarak Bonus türbiniyle yapılan analizde yıllık üretim 106 GWh olurken, aynı analiz saatlik periyotlu verilerle yapıldığında 106,9 GWh olmaktadır.

- **Wasp'a veri olarak girilen OWC dosyasına göre:**

Aynı veri aralığındaki OWC dosyaları kullanılarak yapılmış analizlere kendi içinde bakıldığında ise farklılık yüzdesel olarak daha yüksektir. Bunun sebebi ölçülen değerlerin türbin göbek yüksekliğine çıkartılma işlemi sırasında kabul edilen α değeridir. Farklı α değerleri üretim miktarlarının daha geniş bir aralıkta oynamasına sebep olmaktadır. 50m de ölçülmüş veri ile yapılan analiz (93,7 GWh) ile $\alpha = 1/5$ kabulü ile elde edilen 50m ölçümün analiz (134,2 GWh) sonucu arasında %40'a varan farklar oluşabilmektedir. Bu da göbek yüksekliğinde ölçüm yapmanın önemine işaret etmektedir.

- **Türbin modeline göre:**

Tablolarda aynı satır boyunca farklı türbinlerin üretim miktarlarına baktığımız zaman değişimin ortalama %10 olduğunu görüyoruz. Bu da bir rüzgar santrali projesi

planlanırken türbin seçiminin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Aynı güce sahip farklı marka/model türbinler çok farklı üretim değerlerini yakalayabilirler. Bu durum tamamen türbinin güç eğrisi ile alakalıdır.

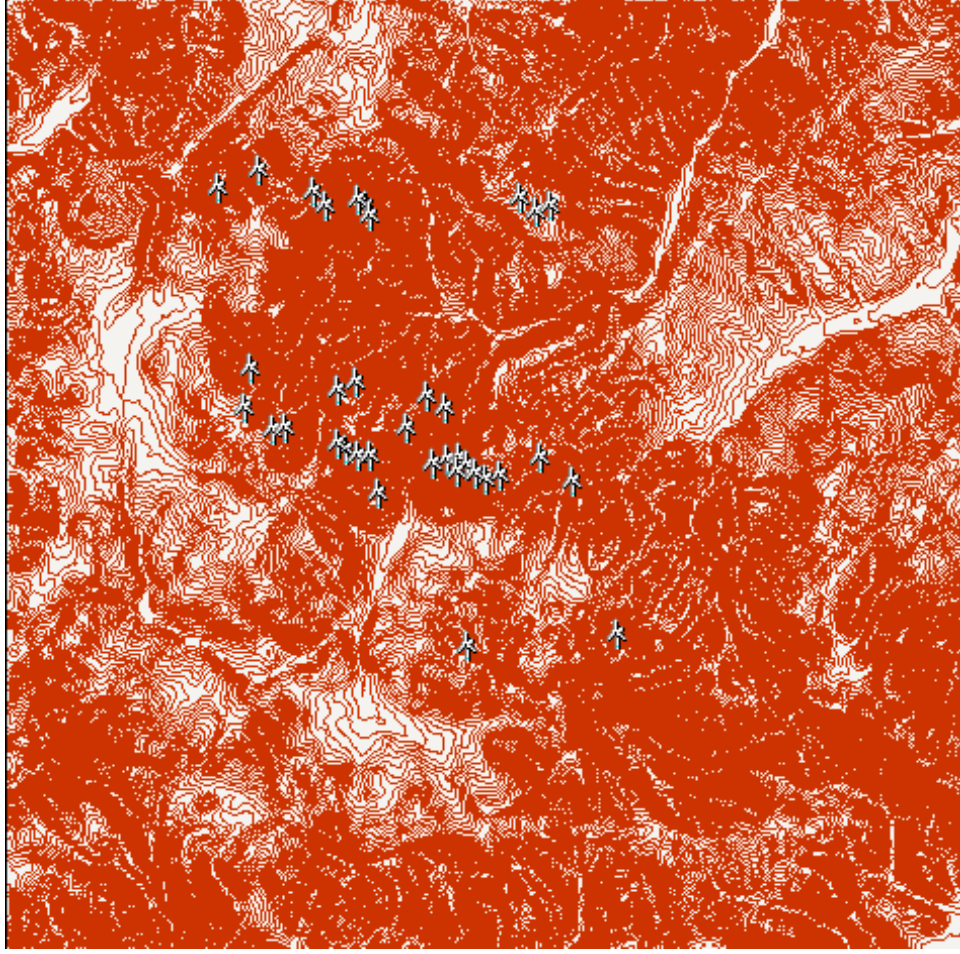
Bununla birlikte enerji üretimindeki bu değişimler kapasite faktörüne geçildiği zaman yüzde olarak çok daha değerlerle ifade edilmektedirler.

5.2.1 36 x 1 MW Bonus Analiz Sonuçları

Çizelge 5.6'da 10 dakikalık aralıklarla 50m'de alınmış ölçümler ile yapılan analiz sonuçları gösterilmektedir. Buna göre en yüksek yıllık üretim 3393 GWh ile 437m rakımda bulunan 9 numaralı türbinde, en az üretim ise 2.033 GWh ile 320m rakımda bulunan 36 numaralı türbinde gerçekleşmiştir (Şekil 5.2).

Çizelge 5.6 : 36 x Bonus türbini kullanılması durumu için türbinlerin parametreleri

Türbin No	Göbek Yükseklği [m a.g.l.]	A [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m ²]	Rakım [m a.s.l.]	Net AEP [GWh]	dRIX [%]
Bonus 001	50	8.9	1.99	7.85	568	437	3.260	4.8
Bonus 002	50	8.6	2.00	7.65	524	505	3.122	1.4
Bonus 003	50	8.1	2.00	7.16	429	492	2.746	0.8
Bonus 004	50	7.7	2.00	6.79	366	365	2.493	0.1
Bonus 005	50	7.8	2.01	6.94	390	343	2.620	0.7
Bonus 006	50	8.1	1.97	7.16	435	479	2.774	0.7
Bonus 007	50	8.6	1.94	7.60	530	331	3.102	4.4
Bonus 008	50	7.3	1.94	6.46	324	359	2.260	-3.6
Bonus 009	50	9.1	1.97	8.04	615	437	3.393	3.4
Bonus 010	50	7.9	2.00	7.00	401	383	2.639	2.4
Bonus 011	50	8.6	2.00	7.61	516	488	3.088	3.1
Bonus 012	50	8.2	2.02	7.26	444	580	2.863	0.4
Bonus 013	50	8.2	1.97	7.31	462	391	2.869	1.6
Bonus 014	50	7.4	2.01	6.59	332	507	2.312	-2.1
Bonus 015	50	7.8	2.01	6.92	385	532	2.553	-1.1
Bonus 016	50	7.7	2.02	6.78	361	396	2.436	3.7
Bonus 017	50	7.6	1.98	6.78	368	448	2.459	3.2
Bonus 018	50	7.7	1.97	6.82	376	456	2.532	-0.1
Bonus 019	50	7.6	1.93	6.75	372	255	2.490	0.1
Bonus 020	50	7.3	1.97	6.44	318	326	2.185	-0.9
Bonus 021	50	7.5	2.01	6.64	340	444	2.358	3.7
Bonus 022	50	7.9	1.99	7.03	409	569	2.679	-1.1
Bonus 023	50	8.3	1.96	7.36	476	409	2.779	1.5
Bonus 024	50	7.4	2.01	6.59	334	432	2.306	3.0
Bonus 025	50	7.9	1.99	7.01	404	390	2.646	-0.2
Bonus 026	50	7.2	1.98	6.41	312	365	2.208	-4.2
Bonus 027	50	8.2	1.98	7.26	452	525	2.853	1.5
Bonus 028	50	7.3	1.97	6.46	320	475	2.243	-2.7
Bonus 029	50	7.6	1.96	6.74	365	543	2.440	-2.8
Bonus 030	50	8.2	1.96	7.29	462	466	2.862	0.4
Bonus 031	50	7.5	1.99	6.67	349	471	2.390	-1.2
Bonus 032	50	8.1	1.97	7.14	432	374	2.773	0.3
Bonus 033	50	8.0	1.97	7.06	418	382	2.623	4.6
Bonus 034	50	7.2	1.97	6.40	311	351	2.209	-3.3
Bonus 035	50	7.1	1.96	6.33	302	337	2.096	-3.7
Bonus 036	50	7.0	1.97	6.20	283	320	2.033	-3.7



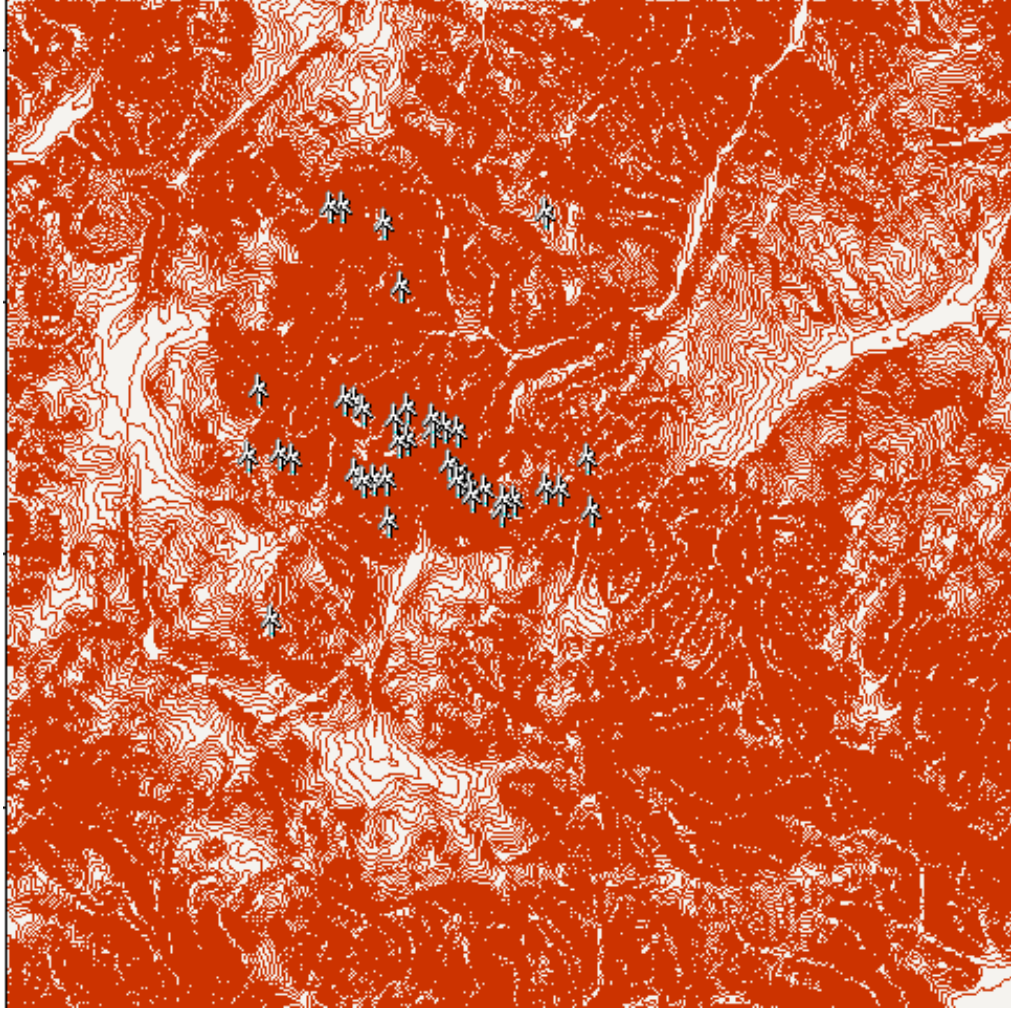
Şekil 5.2 : 36 x Bonus türbininin saha içindeki dağılımı

5.2.2 40 x 900 kW Enercon E44 Analiz Sonuçları

Çizelge 5.7’de 10 dakikalık aralıklarla 50m’de alınmış ölçümler ile yapılan analiz sonuçları gösterilmektedir. Buna göre en yüksek yıllık üretim 2.859 GWh ile 440m rakımda bulunan 6 numaralı türbinde, en az üretim ise 1.555 GWh ile 405m rakımda bulunan 37 numaralı türbinde gerçekleşmiştir (Şekil 5.3).

Çizelge 5.7 40 x Enercon türbin kullanılması durumuna göre türbin parametreleri

Türbin No	Yükseklik [m a.g.l.]	A [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m ²]	Rakım [m a.s.l.]	Net AEP [GWh]	dRIX [%]
Enercon E44 01	50	9.0	1.98	7.96	596	437	2.723	4.2
Enercon E44 02	50	8.5	2.00	7.58	509	505	2.472	1.0
Enercon E44 03	50	7.7	2.01	6.78	364	531	1.947	-1.5
Enercon E44 04	50	7.6	2.00	6.73	357	363	1.938	0.2
Enercon E44 05	50	7.9	2.00	7.00	401	326	2.109	1.0
Enercon E44 06	50	9.2	1.97	8.17	648	440	2.859	3.6
Enercon E44 07	50	8.6	1.94	7.59	527	332	2.523	4.4
Enercon E44 08	50	8.7	1.97	7.75	553	419	2.595	4.9
Enercon E44 09	50	7.9	1.97	6.98	403	378	2.123	1.5
Enercon E44 10	50	7.8	2.01	6.89	382	435	1.991	3.3
Enercon E44 11	50	8.3	2.01	7.34	461	477	2.270	3.3
Enercon E44 12	50	7.9	2.01	7.04	405	534	2.157	0.7
Enercon E44 13	50	8.1	1.97	7.19	441	353	2.265	2.8
Enercon E44 14	50	7.4	2.01	6.55	327	501	1.825	-2.1
Enercon E44 15	50	7.3	1.97	6.46	321	483	1.784	-3.5
Enercon E44 16	50	7.3	2.01	6.43	309	382	1.664	3.5
Enercon E44 17	50	8.1	1.99	7.14	429	450	2.220	4.0
Enercon E44 18	50	7.8	2.01	6.95	392	407	2.078	2.8
Enercon E44 19	50	7.7	1.94	6.79	377	260	2.017	0.6
Enercon E44 20	50	7.3	1.96	6.49	327	334	1.768	-1.0
Enercon E44 21	50	7.8	2.00	6.93	389	457	2.081	3.2
Enercon E44 22	50	8.1	2.01	7.21	437	452	2.179	3.5
Enercon E44 23	50	8.0	1.92	7.11	439	338	2.204	4.6
Enercon E44 24	50	7.2	1.99	6.42	310	277	1.753	-1.5
Enercon E44 25	50	7.5	1.98	6.61	341	367	1.777	-0.6
Enercon E44 26	50	7.3	2.01	6.49	317	460	1.699	3.6
Enercon E44 27	50	8.5	2.01	7.50	492	577	2.466	0.8
Enercon E44 28	50	7.1	1.99	6.26	289	409	1.638	-4.3
Enercon E44 29	50	8.7	2.00	7.74	544	438	2.470	5.0
Enercon E44 30	50	8.1	1.97	7.14	433	466	2.235	0.4
Enercon E44 31	50	7.5	2.00	6.67	347	475	1.906	-1.1
Enercon E44 32	50	8.0	2.00	7.11	420	394	2.190	0.1
Enercon E44 33	50	7.8	2.01	6.89	381	460	2.014	4.2
Enercon E44 34	50	8.6	2.00	7.62	518	497	2.465	2.8
Enercon E44 35	50	7.1	1.95	6.28	298	347	1.686	-3.7
Enercon E44 36	50	8.1	1.99	7.15	431	441	2.232	3.6
Enercon E44 37	50	7.1	2.01	6.25	284	405	1.555	2.7
Enercon E44 38	50	7.4	1.97	6.60	341	350	1.879	0.4
Enercon E44 39	50	7.7	2.02	6.80	365	365	1.987	0.8
Enercon E44 40	50	8.5	1.97	7.49	500	415	2.379	2.0



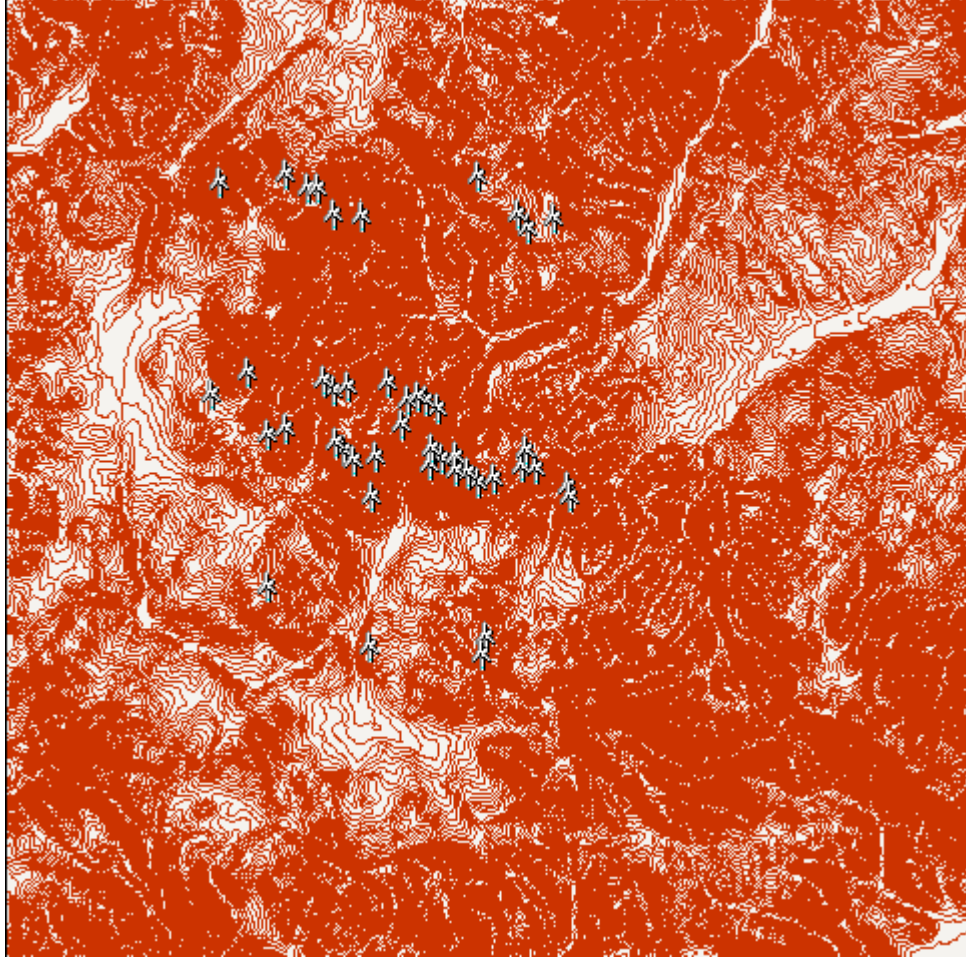
Şekil 5.3 : 40 x Enercon türbininin sahadaki dağılımı

5.2.3 45 x 800 kW Nordex N50 Analiz Sonuçları

Çizelge 5.8’de 10 dakikalık aralıklarla 50m’de alınmış ölçümler ile yapılan analiz sonuçları gösterilmektedir. Buna göre en yüksek yıllık üretim 2.761 GWh ile 445m rakımda bulunan 1 numaralı türbinde, en az üretim ise 1.407 GWh ile 305m rakımda bulunan 34 numaralı türbinde gerçekleşmiştir (Şekil 5.4).

Çizelge 5.8 : 45 x Nordex türbini kullanılması durumu için türbin parametreleri

Türbin No	Height [m a.g.l.]	A [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m ²]	Rakım [m a.s.l.]	Net AEP [GWh]	dRIX [%]
Nordex N50Türbin 01	50	9.2	1.99	8.12	631	445	2.709	4.8
Nordex N50Türbin 02	50	8.6	2.00	7.66	526	505	2.441	1.8
Nordex N50Türbin 03	50	7.9	1.99	7.04	411	491	2.078	0.9
Nordex N50Türbin 04	50	7.7	2.00	6.79	366	365	1.952	0.1
Nordex N50Türbin 05	50	7.7	1.99	6.85	377	320	2.006	1.0
Nordex N50Türbin 06	50	7.8	1.98	6.91	389	462	2.056	1.8
Nordex N50Türbin 07	50	8.5	1.95	7.54	515	332	2.414	4.3
Nordex N50Türbin 08	50	7.1	1.97	6.29	295	308	1.665	-3.8
Nordex N50Türbin 09	50	8.1	2.00	7.17	432	409	2.182	2.8
Nordex N50Türbin 10	50	7.5	2.01	6.65	342	405	1.789	2.9
Nordex N50Türbin 11	50	8.5	2.00	7.50	495	483	2.345	2.9
Nordex N50Türbin 12	50	8.1	2.02	7.21	434	581	2.226	0.2
Nordex N50Türbin 13	50	7.9	1.98	7.00	405	358	2.088	2.3
Nordex N50Türbin 14	50	7.5	2.01	6.61	335	510	1.813	-2.4
Nordex N50Türbin 15	50	7.7	2.01	6.80	366	516	1.918	-1.0
Nordex N50Türbin 16	50	7.6	2.02	6.76	358	402	1.796	4.0
Nordex N50Türbin 17	50	7.9	1.98	6.96	399	452	2.052	3.4
Nordex N50Türbin 18	50	7.6	2.00	6.72	355	390	1.874	2.4
Nordex N50Türbin 19	50	7.7	1.94	6.81	381	261	1.994	0.3
Nordex N50Türbin 20	50	7.3	1.96	6.49	327	334	1.735	-1.0
Nordex N50Türbin 21	50	7.8	2.01	6.91	384	453	2.027	3.5
Nordex N50Türbin 22	50	7.1	1.97	6.29	296	325	1.642	-3.7
Nordex N50Türbin 23	50	8.4	1.96	7.45	494	390	2.340	4.9
Nordex N50Türbin 24	50	7.2	1.97	6.40	311	275	1.708	-0.3
Nordex N50Türbin 25	50	8.0	1.99	7.10	420	397	2.134	-0.1
Nordex N50Türbin 26	50	6.8	2.00	6.05	259	300	1.502	-4.3
Nordex N50Türbin 27	50	8.1	2.01	7.18	431	572	2.206	0.5
Nordex N50Türbin 28	50	7.3	1.97	6.47	321	414	1.754	-4.2
Nordex N50Türbin 29	50	7.9	1.97	7.01	409	556	2.104	-2.6
Nordex N50Türbin 30	50	8.3	1.96	7.38	481	471	2.330	1.2
Nordex N50Türbin 31	50	7.5	1.99	6.66	346	476	1.875	-1.1
Nordex N50Türbin 32	50	8.1	1.96	7.15	436	373	2.198	0.7
Nordex N50Türbin 33	50	7.8	2.01	6.93	389	456	2.032	4.3
Nordex N50Türbin 34	50	6.6	1.97	5.89	243	325	1.407	-4.1
Nordex N50Türbin 35	50	7.5	1.94	6.63	351	351	1.883	-3.6
Nordex N50Türbin 36	50	7.2	1.97	6.40	310	395	1.737	-3.3
Nordex N50Türbin 37	50	7.1	2.00	6.25	285	385	1.558	2.8
Nordex N50Türbin 38	50	7.1	1.97	6.27	293	474	1.644	-3.3
Nordex N50Türbin 39	50	7.5	2.02	6.65	342	363	1.749	0.7
Nordex N50Türbin 40	50	8.9	1.97	7.85	575	422	2.548	2.1
Nordex N50Türbin 41	50	7.7	1.98	6.84	377	542	2.012	-0.9
Nordex N50Türbin 42	50	6.8	1.99	6.03	258	332	1.467	0.3
Nordex N50Türbin 43	50	7.5	1.99	6.62	342	386	1.680	3.8
Nordex N50Türbin 44	50	7.6	1.99	6.72	357	421	1.924	2.4
Nordex N50Türbin 45	50	7.3	1.98	6.43	313	372	1.683	-4.1



Şekil 5.4 : 45 x Nordex türbininin sahadaki dağılımı

5.3 Ölçüm Noktasında Tek Türbin İle Yapılan Analizler

Bu işlemin amacı hesaplarda Wasp'ın minimum hata yapacağı noktada, yani ölçüm noktasında enerji analizi yaparak gerçeğe en yakın sonucu görebilmektir. Ölçüm noktasında delta RIX = 0 olduğundan Wasp daha gerçekçi tahminler yapacaktır. Çizelge 5.9, Çizelge 5.10 ve Çizelge 5.11 bu çalışmanın sonuçlarını özetlemektedir.

Çizelge 5.9 : 10dk'lık veri setlerinin kullanılması durumu için enerji üretimleri ve kapasite faktörleri

		Bonus 1 MW		Nordex N50 800kW		Enercon E44 900kW	
		MWh/yıl	KF	MWh/yıl	KF	MWh/yıl	KF
10dk veriler	10	2899	33,1	2296	32,8	2317	29,4
	30	2844	32,5	2251	32,1	2279	28,9
	50	2618	29,9	2069	29,5	2095	26,6
	1/5 10>50	3764	43,0	2976	42,5	3128	39,7
	1/5 30>50	2776	31,7	2195	31,3	2245	28,5
	1/7 10>50	3277	37,4	2594	37,0	2688	34,1
	1/7 30>50	2924	33,4	2314	33,0	2367	30,0

Çizelge 5.10 : Yarım saatlik veri setlerinin kullanılması durumu için enerji üretimleri ve kapasite faktörleri

		Bonus 1 MW		Nordex N50 800kW		Enercon E44 900kW	
		MWh/yıl	KF	MWh/yıl	KF	MWh/yıl	KF
Yarım Saatlik veriler	10	2909	33,2	2304	32,9	2324	29,5
	30	2842	32,4	2249	32,1	2277	28,9
	50	2613	29,8	2065	29,5	2089	26,5
	1/5 10>50	3762	42,9	2976	42,5	3126	39,6
	1/5 30>50	3076	35,1	2435	34,7	2500	31,7
	1/7 10>50	3275	37,4	2593	37,0	2686	34,1
	1/7 30>50	2925	33,4	2315	33,0	2368	30,0

Çizelge 5.11 : Saatlik veri setlerinin kullanılması durumu için enerji üretimleri ve kapasite faktörleri

		Bonus 1 MW		Nordex N50 800kW		Enercon E44 900kW	
		MWh/yıl	KF	MWh/yıl	KF	MWh/yıl	KF
Saatlik veriler	10	2903	33,1	2299	32,8	2318	29,4
	30	2835	32,4	2244	32,0	2270	28,8
	50	2608	29,8	2062	29,4	2085	26,4
	1/5 10>50	3752	42,8	2968	42,4	3118	39,5
	1/5 30>50	3068	35,0	2430	34,7	2494	31,6
	1/7 10>50	3262	37,2	2584	36,9	2675	33,9
	1/7 30>50	2914	33,3	2307	32,9	2358	29,9

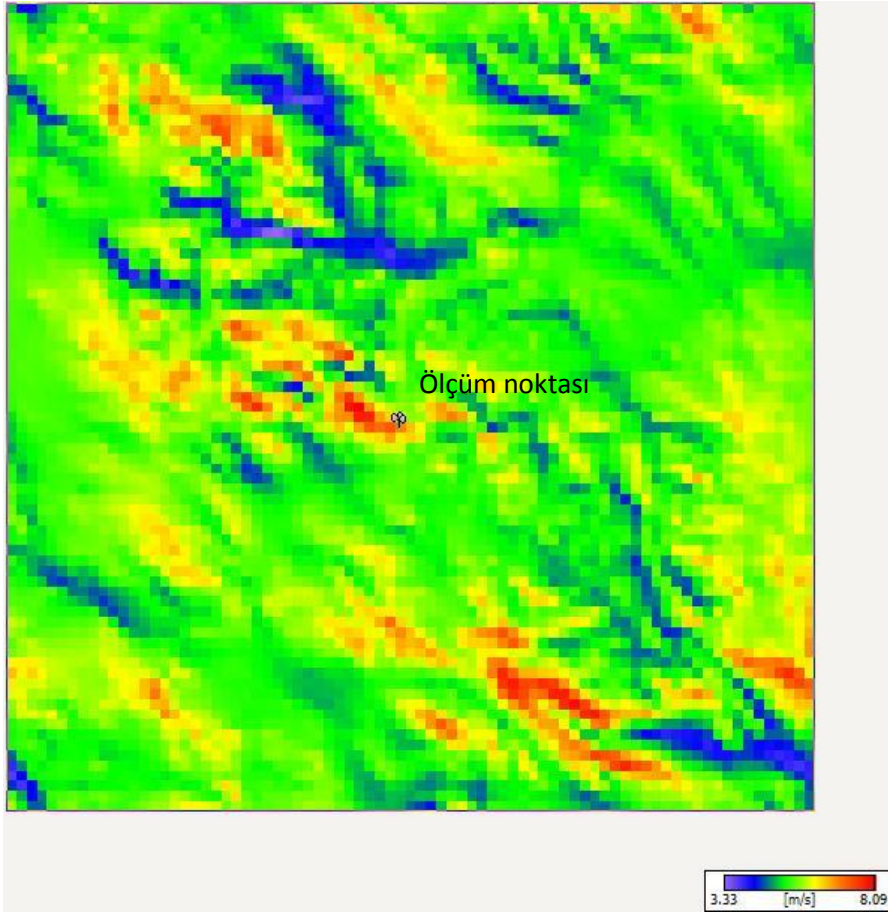
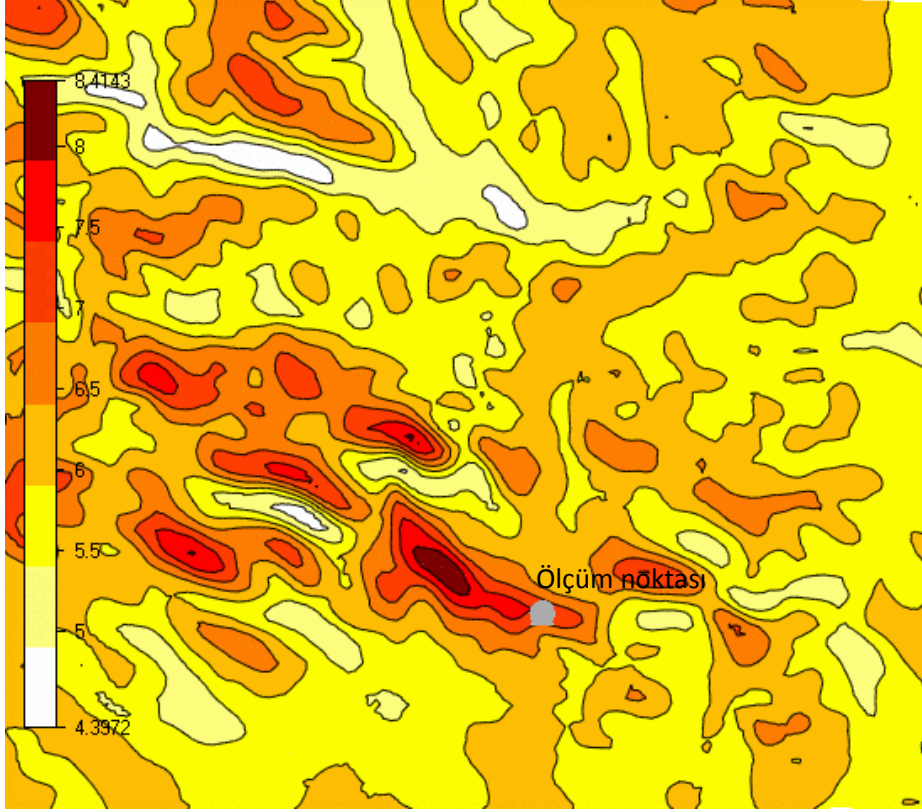
Bu iki tabloya beraber bakıldığında birbirine karşılık gelen kapasite faktörlerinin birbirine çok yakın olduğu görülecektir.

Bu çalışmanın sonucu olarak söyleyebiliriz ki sahaya özel bir durum olmakla birlikte rüzgar enerjisi analizinde periyodu 1 saat olan verilerin kullanılması sonucu fazla değiştirmeyecektir.

5.4 Ölçüm Noktasında CFD Analizleri

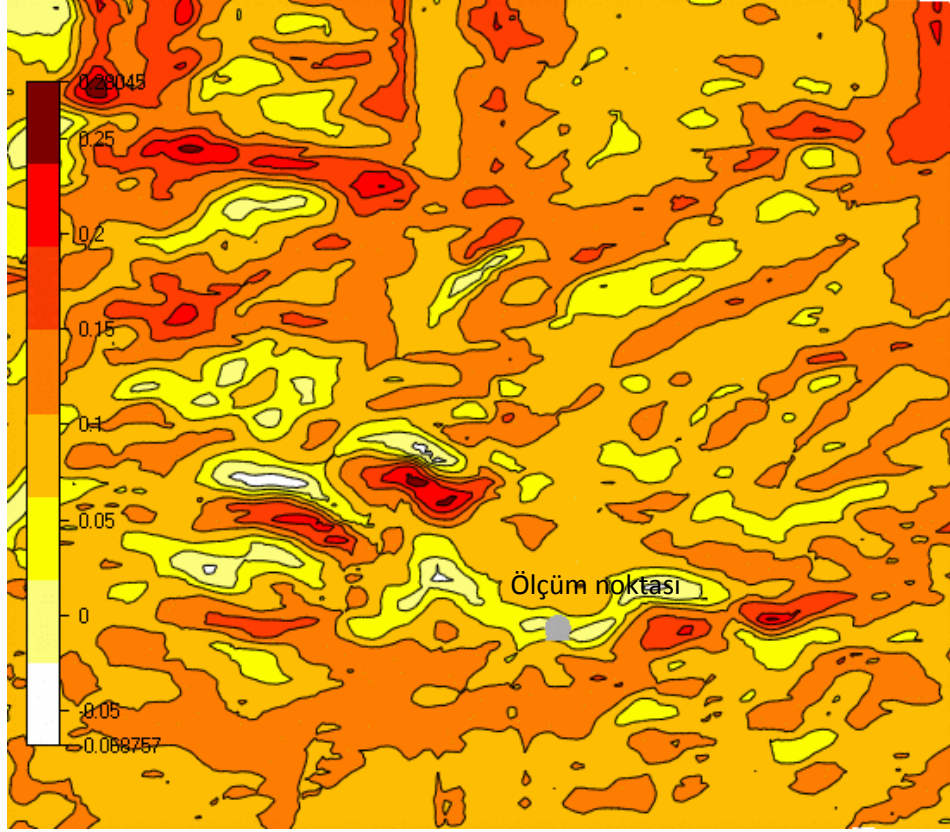
Wasp ile mukayese amaçlı olmak üzere Wasp'ın daha güvenilir tahmin yaptığı ölçüm noktasında WindSim ile CFD analizi sadece hiçbir işleme maruz kalmamış olan (10m, 30m ve 50m'de ölçülen) 10 dakikalık veriler ve aynı türbin modelleri ile yapılmıştır.

Şekil 5.5'de sahanın CFD ve Wasp analizleri sonucu elde edilen 50m'de rüzgar hızının haritası görülmektedir.



Şekil 5.5 : Sahanın 50m CFD ve Wasp rüzgar hızı haritası

CFD analizi sonucu üretilen güç kanunundaki “wind shear” katsayısının hakim rüzgar yönünden değişimini gösteren harita Şekil 5.6’da gösterilmektedir. Ölçüm noktasında gerçekleşen “wind shear” ile sahanın daha önce hesaplanan 3 boyutlu modeli üzerinde analizi yapılmıştır.



Şekil 5.6 : Sahanın α katsayısının hâkim rüzgar yönünden CFD analizi

Çizelge 5.12, 10 dakikalık veriler kullanılarak 50m kule yüksekliğine sahip Bonus 1 MW, Nordex N50 800 kW ve Enercon E44 900 kW türbinleri ile yapılan çalışmanın sonuçlarını göstermektedir.

Çizelge 5.12 : 10dk'lık veri setinin kullanılması durumu için üretim değerleri ve kapasite faktörleri (CFD)

	Veri Seti	Bonus 1 MW		Nordex N50 800kW		Enercon E44 900kW	
		MWh/yıl	KF (%)	MWh/yıl	KF (%)	MWh/yıl	KF (%)
10dk veriler	10	2297	26,2	1816	25,9	1834	23,3
	30	2501	28,6	1978	28,2	2003	25,4
	50	2531	28,9	2001	28,5	2021	25,6
	1/5 10>50	3601	41,1	2846	40,6	2994	38,0
	1/5 30>50	2974	34,0	2357	33,6	2419	30,7
	1/7 10>50	3142	35,9	2489	35,5	2579	32,7
	1/7 30>50	2825	32,2	2237	31,9	2286	29,0

Görüldüğü gibi alfa = 1/5 kabulüyle 10m'deki verileri 50m'ye yükseltmek suretiyle elde edilen veri seti kullanıldığında enerji üretimi, 50m orijinal veri setinin kullanılarak elde edilen enerji üretim değerinden %44 fazla çıkmıştır. Bunun sebebi büyük ölçüde alfa = 1/5 kabulüyle 50m'de elde edilen veri setinin ortalamasının (8,5 m/s), 50m'de ölçülmüş verilerin ortalamasından (6,9 m/s) %23 fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

Sonuçları Wasp 10dk'lık veri seti sonuçları ile karşılaştırdığımız zaman yapılan hesaplara göre üretim ve kapasite faktörü değerlerinin ortalama %6 azaldığı görülmüştür.

6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Rüzgar enerjisi sektörü dünyada en hızlı gelişen sektörlerden bir tanesidir. Çevreye duyarlı olması, emisyon azaltımlarına olan katkısı, türbinlerin uzun ömürlü olması, birim enerji üretim maliyetlerinin diğer enerji santralleriyle rekabet edebilir seviyelerde olması, rüzgar enerjisinin ülkemizin ve dünyanın artan enerji talebinin karşılanmasında önemli bir yere sahip olacağını göstermektedir.

Her ne kadar sektörün ülkemizdeki durumu EPDK'nın 2007 yılına kadar vermiş olduğu lisansların henüz üretime geçmemiş olması ve 1 Kasım 2007 başvurularının çözüme kavuşturulmasının geciktirilmesi gibi sebeplerle biraz karamsar görünse de, önümüzdeki birkaç yıl içinde TEİAŞ'ın üretim projeksiyonlarında da belirttiği gibi 10.000 MW'tan fazla toplam kurulu güce sahip rüzgar santrali üretime geçecektir.

Bu çalışmada ülkemizin en önemli doğal kaynaklarından olan rüzgar potansiyelinin yüksek olduğu Balıkesir civarının rüzgar enerjisi analizleri tüm dünyada yaygın olarak kullanılan WASP ve WindSim programları ile yapılarak, sonuçları verilmiştir.

Sonuç itibarıyla bir bölgenin enerji analizi yapılmak istendiğinde birden fazla ölçüm istasyonu kurulması tavsiye edilmekle birlikte, sahayı temsil etmek noktasında şüphe bırakmayan bir noktada kurulmuş, üzerinde farklı yüksekliklerde çok sayıda anemometre ve yön sensörü bulunan tek ölçüm istasyonu da standartlar dahilindeki bir yaklaşımla güvenilir analizler yapılmasını sağlayacaktır. Bununla birlikte eldeki veri çevrede bulunan uzun dönemli meteoroloji verileri ve varsa havalimanı verileri ile korole edilmesi gerekmektedir.[15]

Bu çalışma sonuçları göstermiştir ki rüzgar santrali kurulması planlanan sahamızda bir yıl süre ile her 10 dakikada bir yapılan ölçümler, her saatte bir olarak yapılsaydı, bu durum enerji analizleri açısından bir problem oluşturmayacaktı. Bunun sebebi üzerinde düşünüldüğünde sahanın rüzgar karakteristiğinin her ne kadar türbülanslı da olsa nispeten düzenli olduğu sonucu çıkartılabilir. Aynı çalışma günlük rüzgar hızı ortalamaları ile de yapıldığında sonuçların benzer şekilde çıkması sürpriz olmayacaktır. Ancak bu bizim sahamıza özgü bir durumdur. Literatürde bu alanda

yapılan çalışmaların sonuçlarına göre on dakikalık veriler ve saatlik ortalamalar ile yapılmış analizler arasında büyük farklar olabildiği görülmüştür.[16]

Enerji analizine yönelik yapılan rüzgar ölçümlerinde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da ölçüm yüksekliğidir. Ölçümlerin en azından türbin göbek yüksekliğinin $\frac{2}{3}$ oranında yapılması yeterli görülmekle birlikte, göbek yüksekliğinde yapılmayan ölçümlerin enerji analizlerine bir belirsizlik katacağı unutulmamalıdır.

Bu çalışmada bu belirsizliğin önüne geçmek amacıyla göbek yüksekliği 50m olan türbinler kullanılması yoluna gidilmiştir. Böylelikle alfa katsayısının farklı değerleri ile yapılmış analizleri karşılaştırma yapmamıza imkan sağlayan bir değer elde edilmiştir.

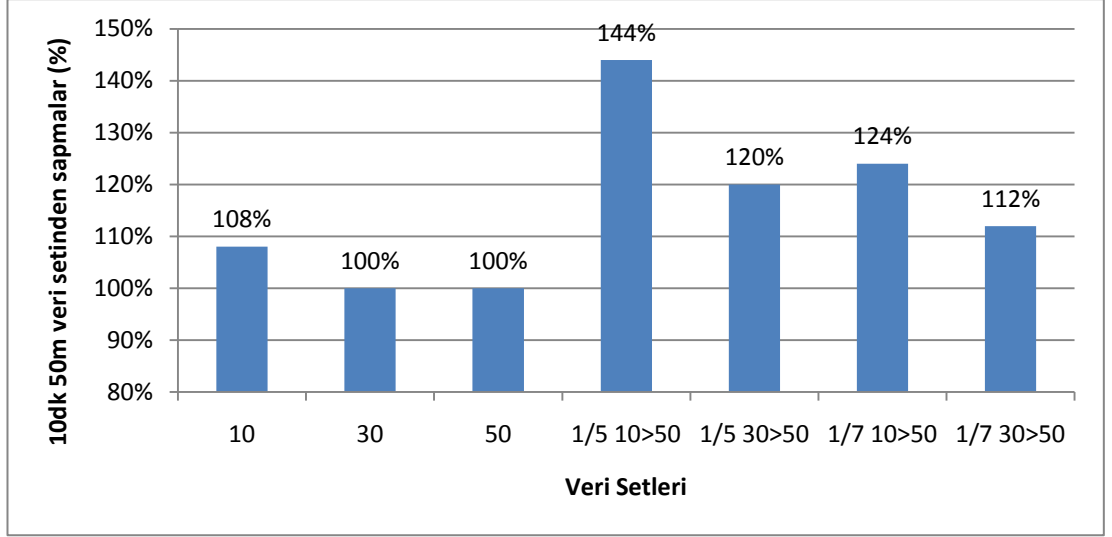
Çizelge 6.1 Ölçüm noktası Wasp analizlerinde Bonus türbinine göre veri setlerinin 10dk 50m veri setinden sapmalarını göstermektedir.

Çizelge 6.1 : Bonus türbinine göre Wasp analizlerinde 10dk 50m veri setinden sapmalar

Veri Seti	10	30	50	1/5 10>50	1/5 30>50	1/7 10>50	1/7 30>50
10dk'lık	111%	107%	100%	146%	107%	127%	111%
Yarım Saatlik	111%	107%	100%	146%	119%	127%	111%
Saatlik	111%	107%	100%	146%	119%	127%	111%

Çizelge 6.1'in sonuçlarına göre yer seviyesine yaklaştıkça yapılan ölçümlerde enerji analizine yönelik programlardan kaynaklanan hatalar artmaktadır. Wasp programı 10m ve 30m'de sırasıyla %11 ve %7 'lik hatalar (overestimate) vermiştir. Aynı şekilde güç kanunu kullanılarak farklı alfa değerleri ile yapılan analizlerde de %46'ya varan sapmalar oluşmuştur. Bütün bu sonuçlar türbin göbek yüksekliğinde ölçüm yapmanın ne kadar önemli olduğunu gösteriyor.

Dikkat edilmesi gereken bir diğer konu da, çalışmalara konu olan sahamızın özelliklerinden olsa gerek, farklı veri aralıkları arasında bir sapma görülmemiştir. Dolayısıyla saatlik veriler kullanılarak analiz yapılması, bizi gerçek sonuçlardan çok da uzaklara götürmeyecektir.[17]

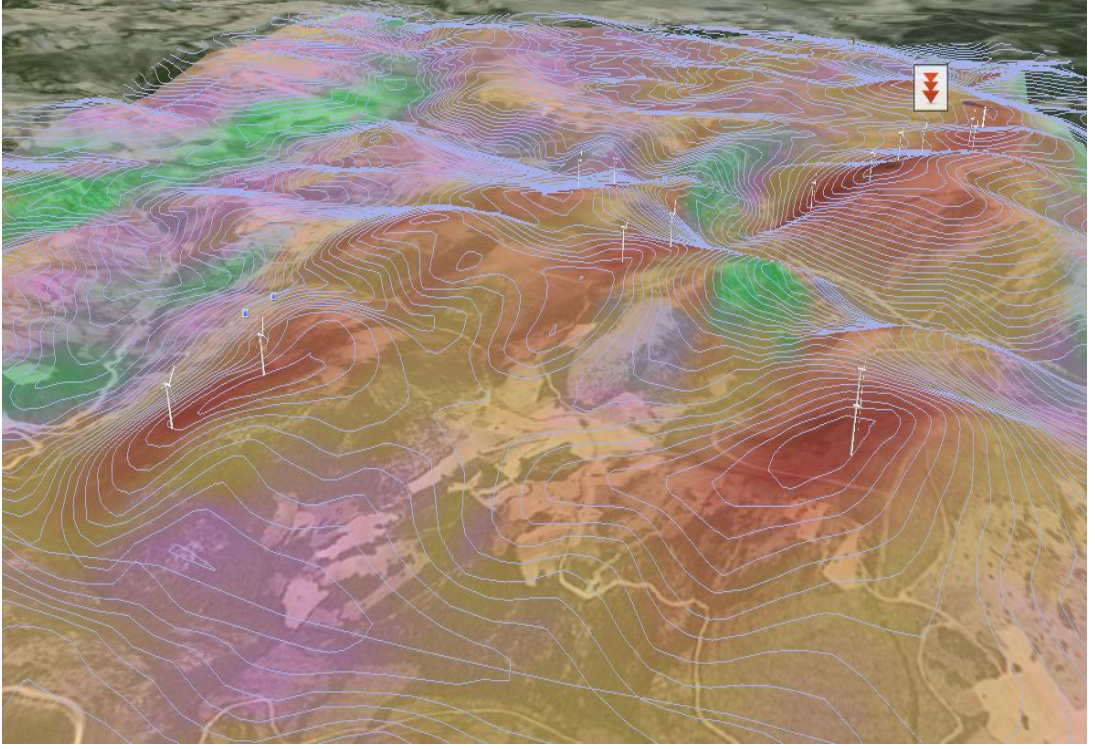


Şekil 6.1 : Bonus türbinine göre WindSim analizlerinde 10dk 50m veri setinden sapmalar

Çizelge 6.1 ve Şekil 6.1'den açıkça görülmektedir ki WindSim sonuçları Wasp sonuçlarına göre daha az sapma göstermiştir. Yine aynı tablolar Wasp ve WindSim programlarının kullanılan veri seti değişikçe orijinal veri setimizin ürettiğinden (10 dakika aralıklı 50m'de ölçülmüş veri) daha fazla enerji üretimi gerçekleşeceği tahmin edilmiştir. (overestimate).

EKLER

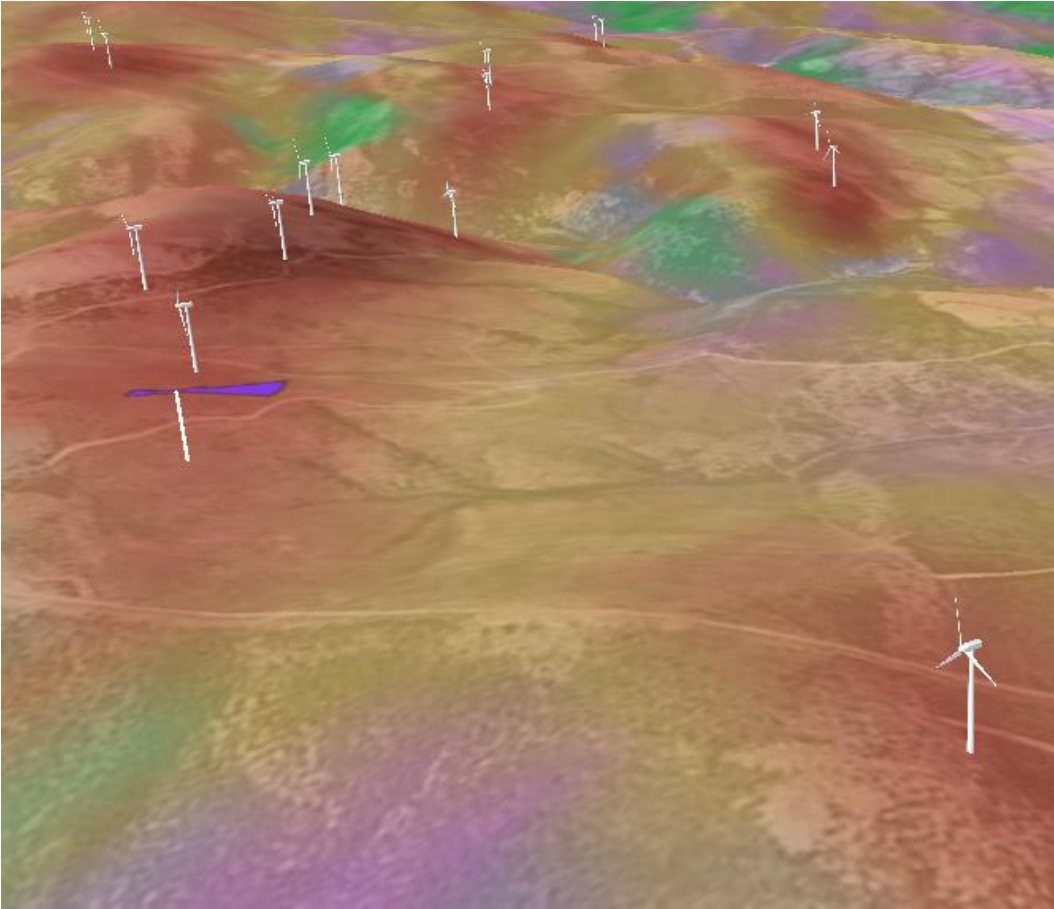
EK A Santral Sahasından Google Earth Uygulamaları



Şekil A.1 : Türbinlerin sahada güç yoğunluğuna göre dağılımı

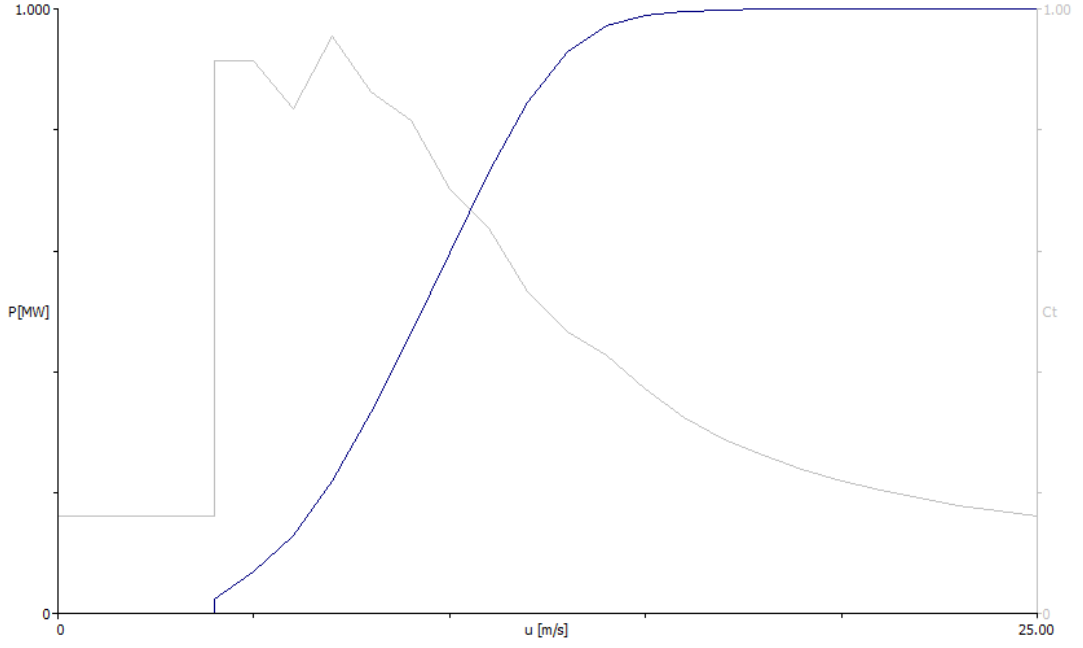


Şekil A.2 : Bir başka açıdan türbinlerin sahada dağılımı ve ölçüm direği

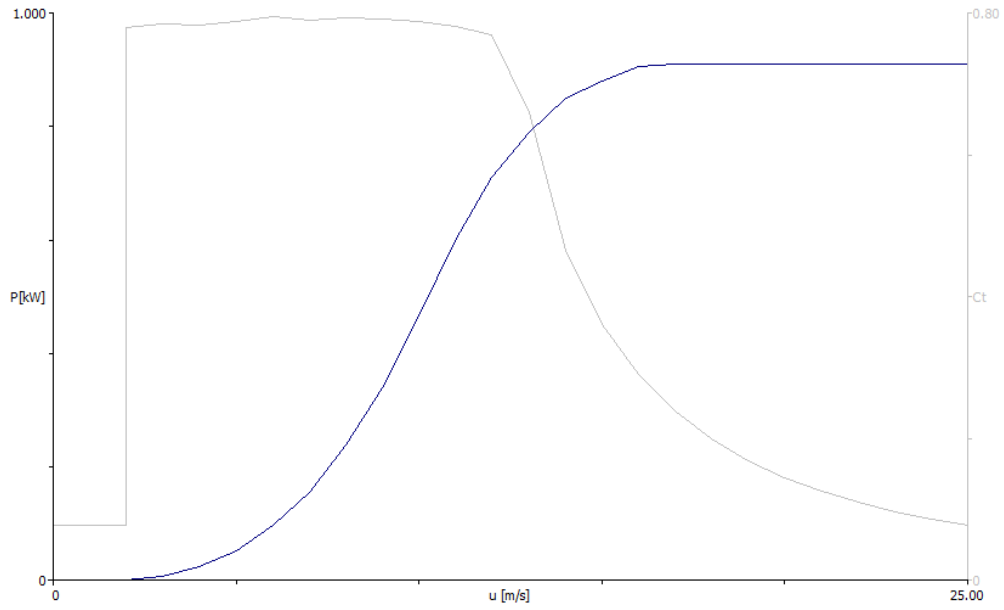


Şekil A.3 : Bir başka açıdan sahada türbinler

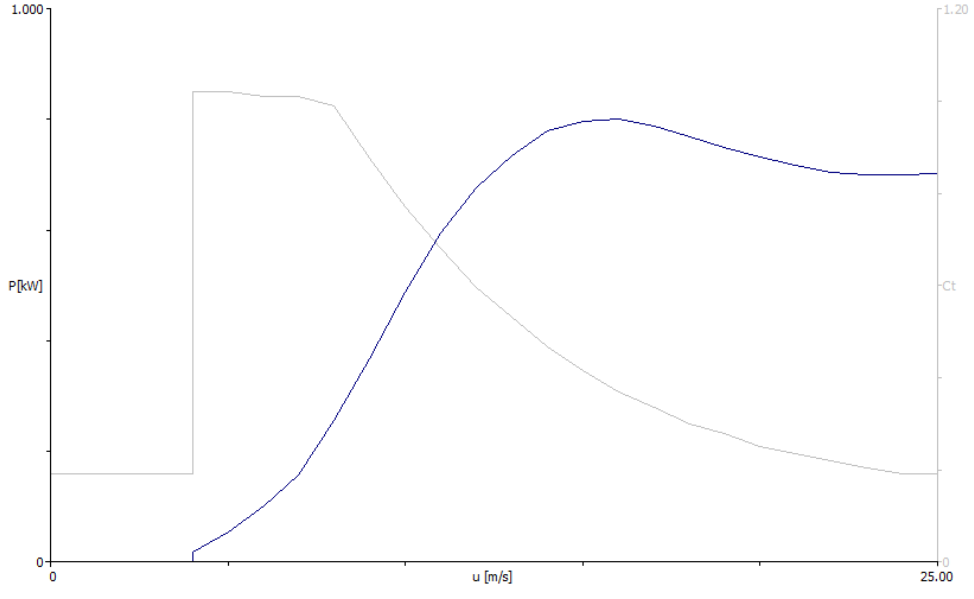
EK B Kullanılan Türbinlerin Güç Eğrileri



Şekil B.1 : Bonus 1 MW türbinin güç eğrisi

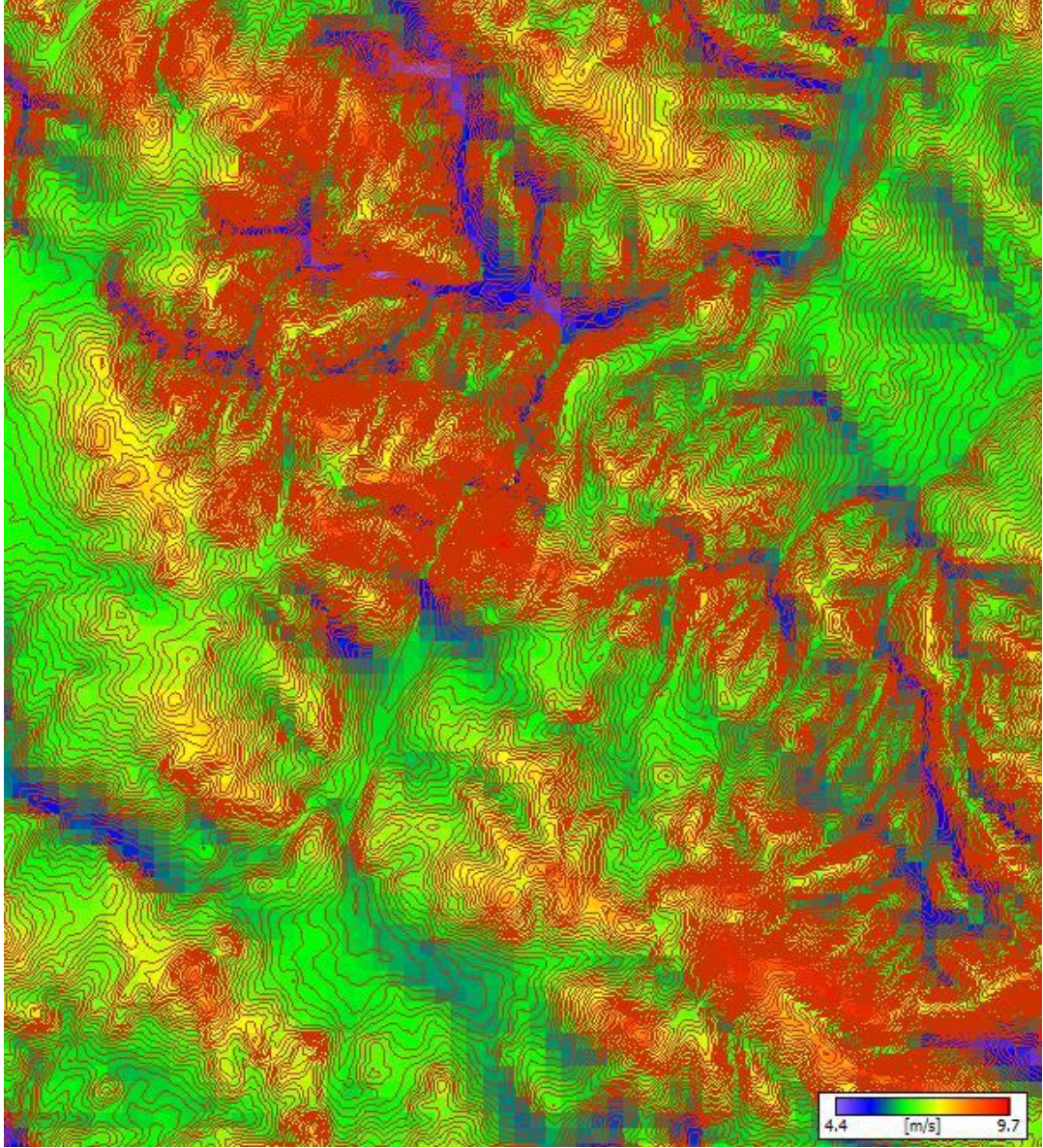


Şekil B.2 : Enercon E44 900 kW türbininin güç eğrisi

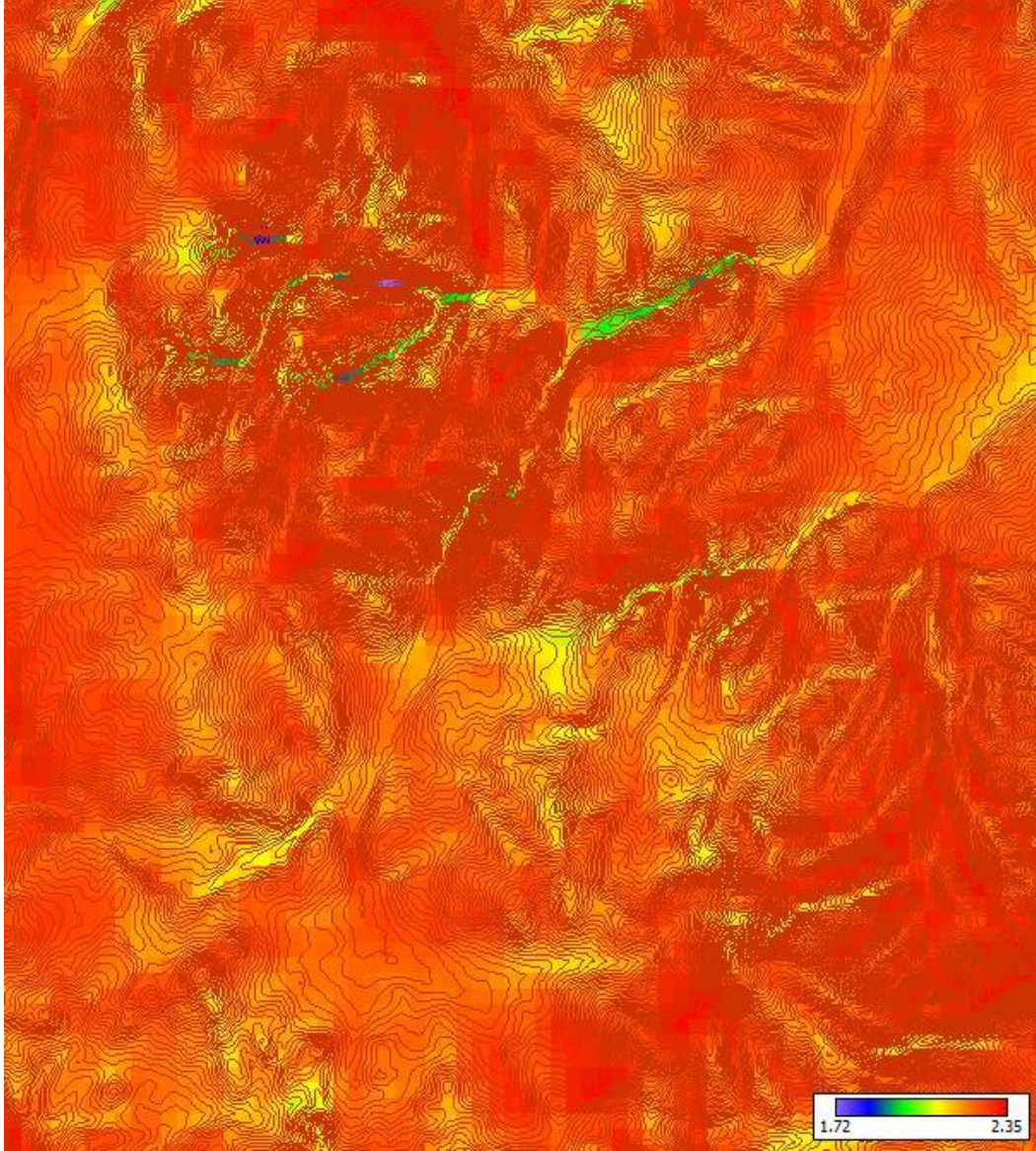


Şekil B.3 : Nordex N50 800 kW türbininin güç eğrisi

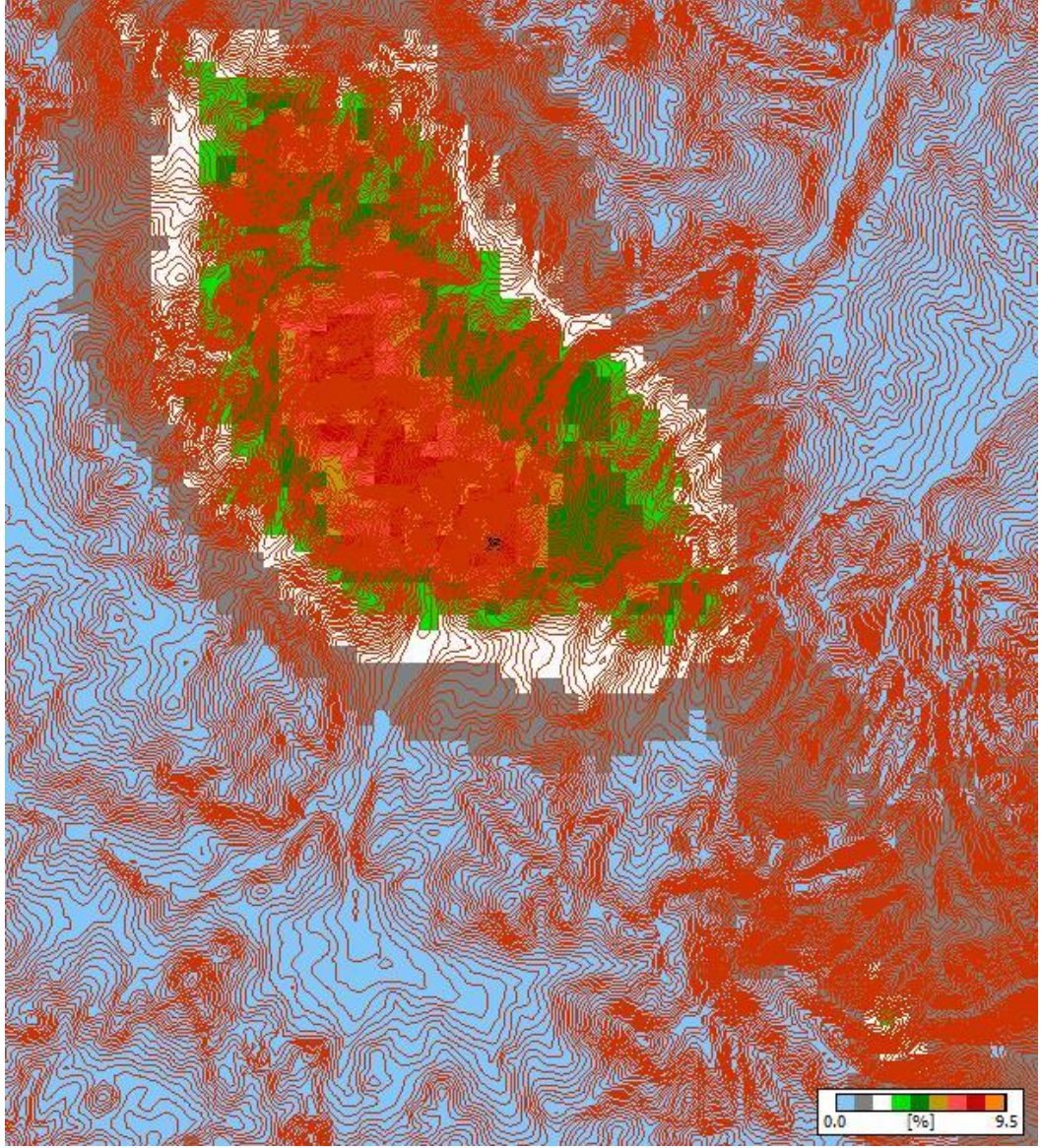
EK C Wasp Rüzgar Atlası Sonuçları



Şekil C.1 : Weibull A parametresinin değışimi

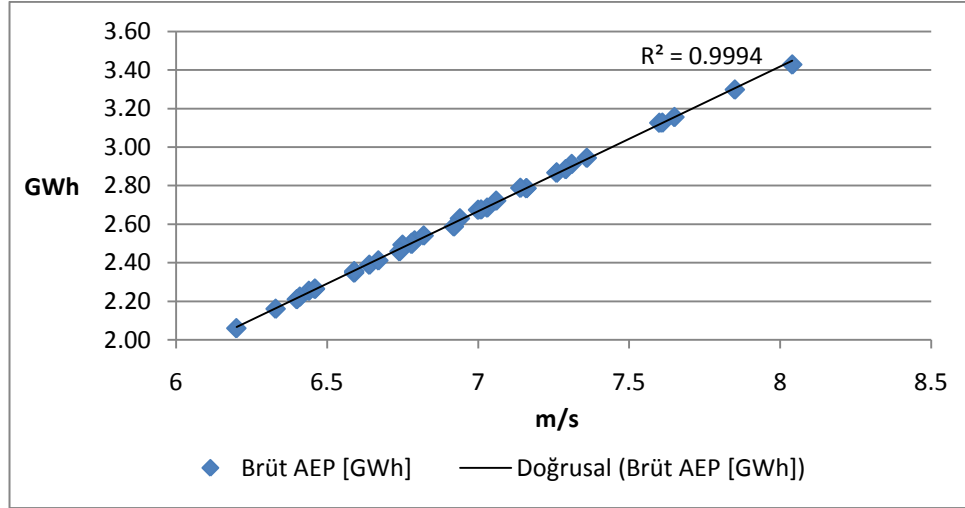


Şekil C.2 : Weibull k parametresinin değişimi

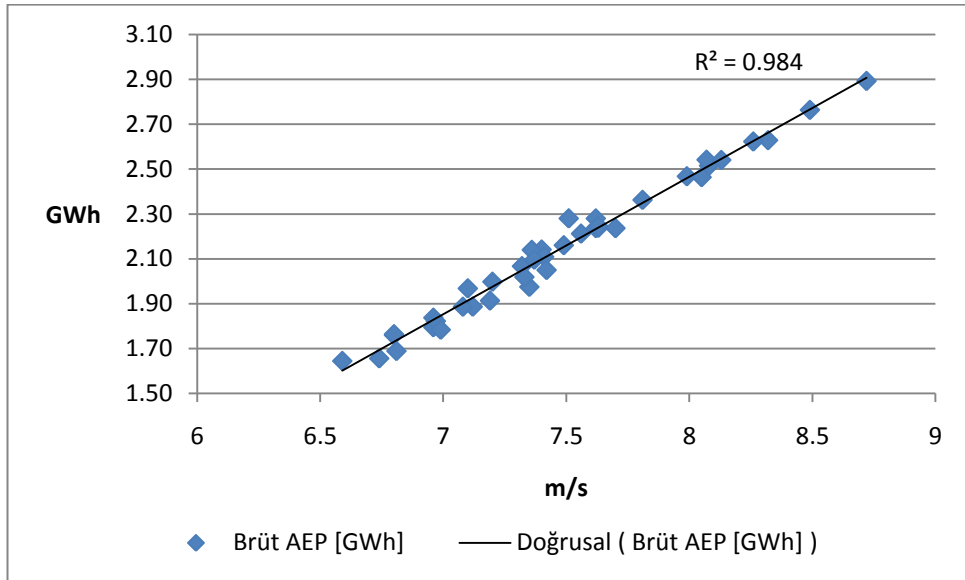


Şekil C.3 : Pürüzlülük indeksinin değışimi

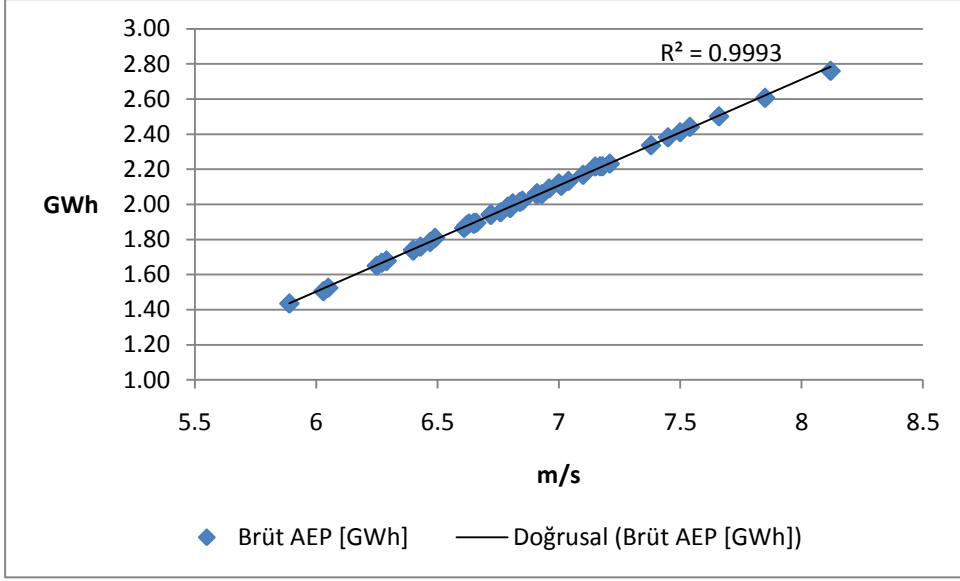
EK D Rüzgar Hızı – Üretim Değerleri Grafikleri



Şekil D.1 : Bonus türbinlerinin 10dk 50m veri setinde rüzgar hızına göre üretim değerleri

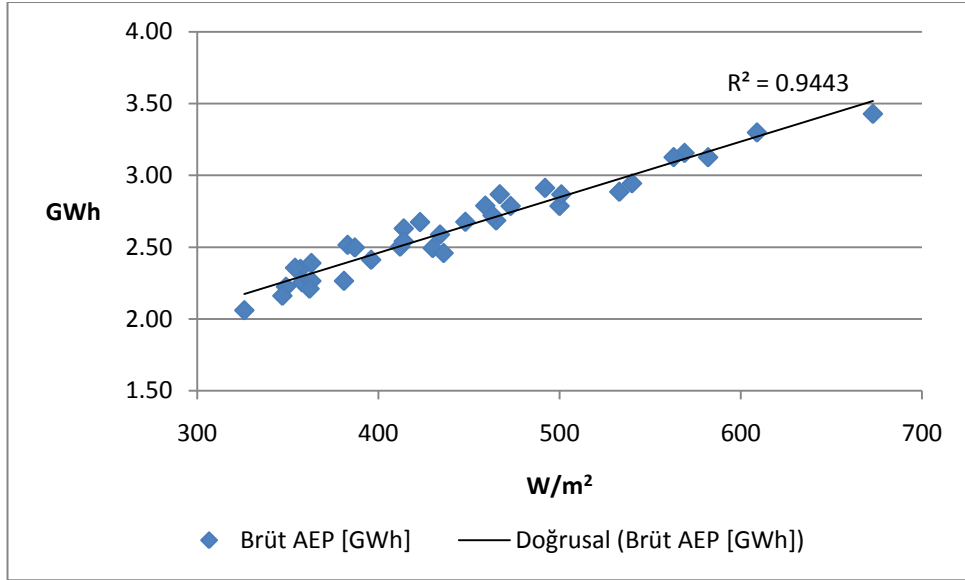


Şekil D.2 : Enercon türbinlerinin 10dk 50m veri setinde rüzgar hızına göre üretim değerleri

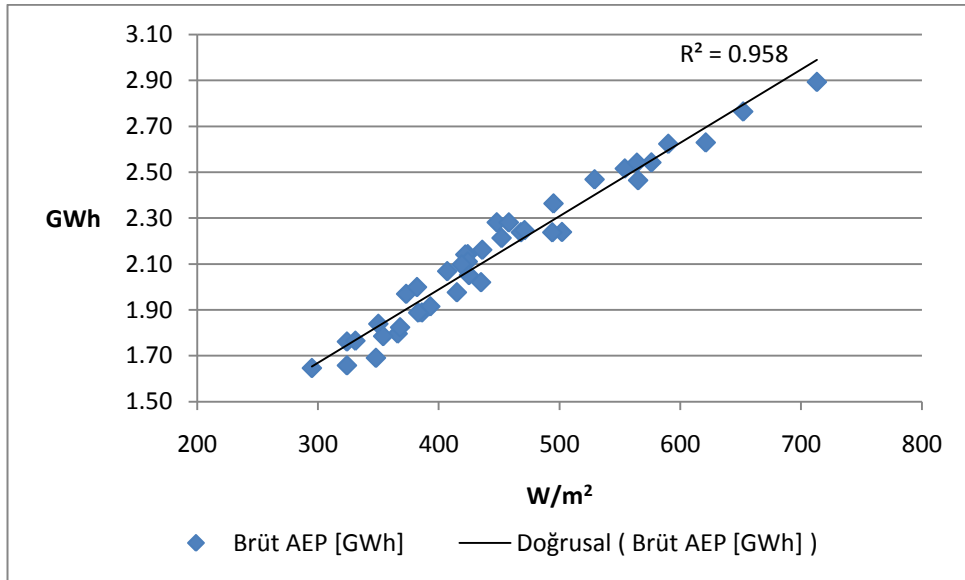


Şekil D.3 : Nordex türbinlerinin 10dk 50m veri setinde rüzgar hızına göre üretim değerleri

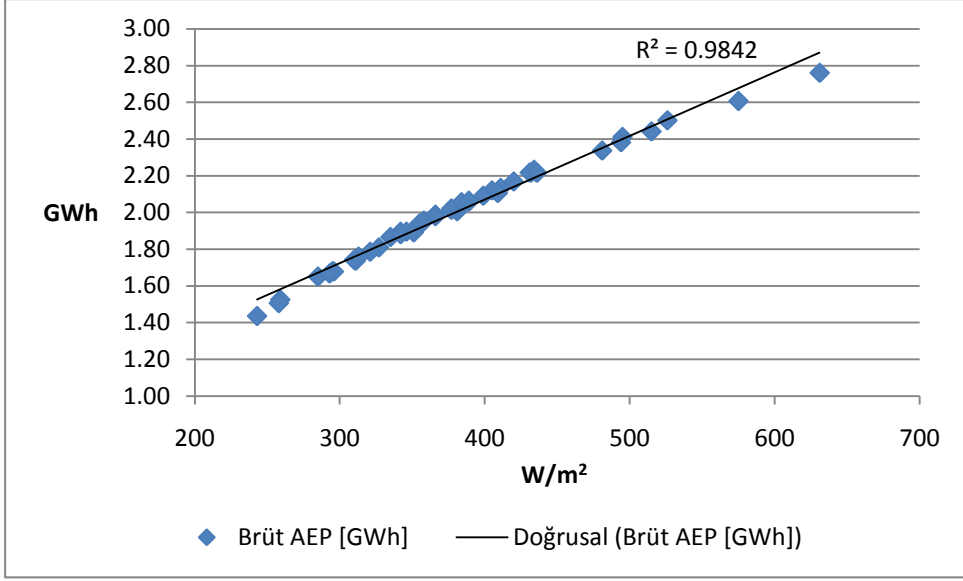
EK E Güç Yoğunluğu – Üretim Değerleri Grafikleri



Şekil E.1 : Bonus türbinlerinin 10dk 50m veri setinde güç yoğunluğuna göre üretim değerleri

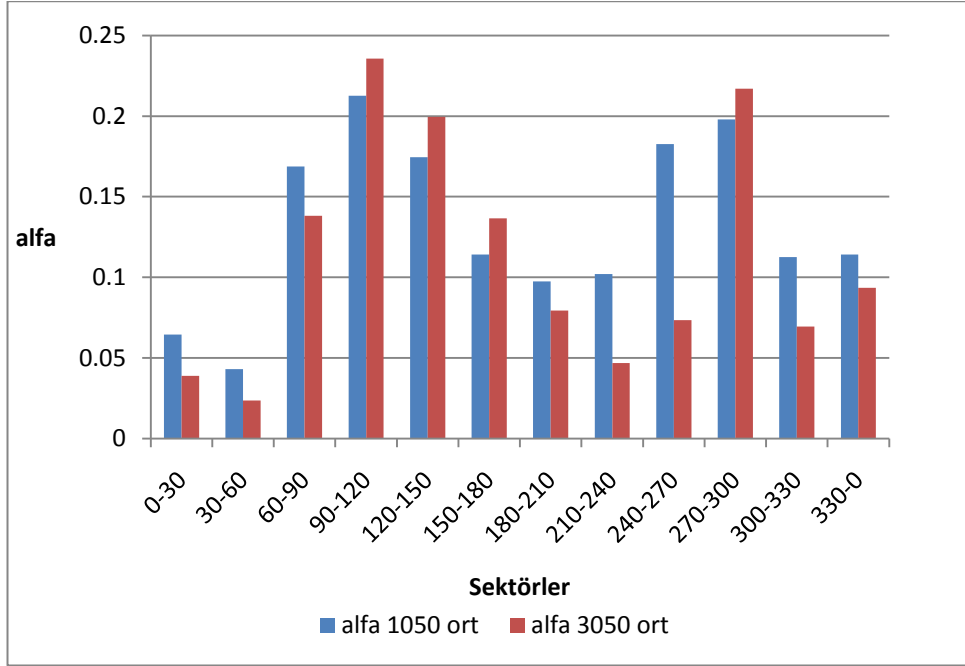


Şekil E.2 : Enercon türbinlerinin 10dk 50m veri setinde güç yoğunluğuna göre üretim değerleri

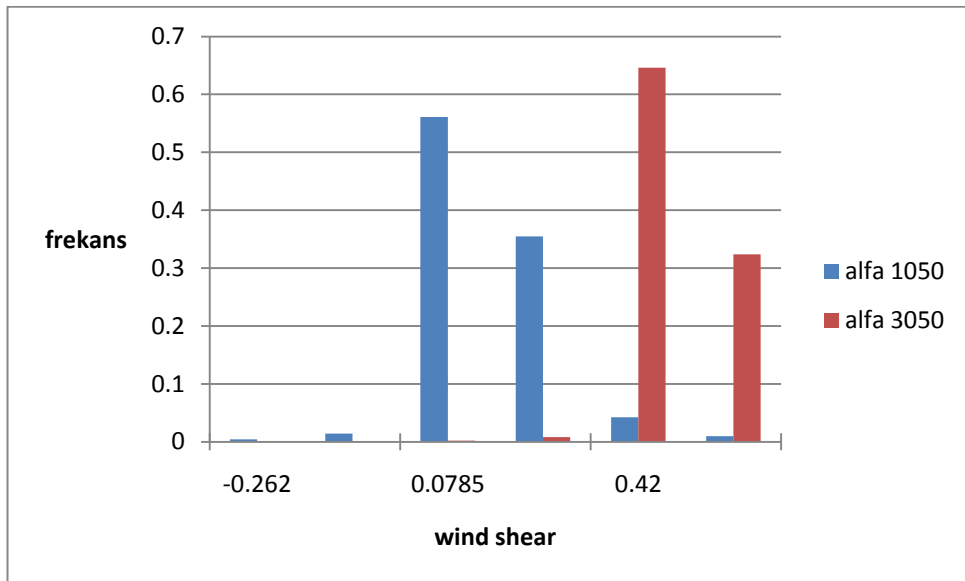


Şekil E.3 : Nordex türbinlerinin 10dk 50m veri setinde güç yoğunluğuna göre üretim değerleri

EK F Alfa Katsayısı Grafikleri



Şekil F.1 : Alfa katsayısının sektörlere göre değişimi



Şekil F.2 : Alfa katsayısının frekans grafiği

EK G 3 Saatlik ve Günlük Enerji Hesapları

	Veri Seti	Bonus 1MW		Nordex N50 800kW		Enercon E44 900kW	
		MWh/yıl	KF	MWh/yıl	KF	MWh/yıl	KF
Günlük Veriler	10	103767	32,9	97670	31,0	91328	29,0
	30	98509	31,2	92678	29,4	87262	27,7
	50	88889	28,2	83374	26,4	78776	25,0
	1/5 10>50	130767	41,5	125052	39,7	120126	38,1
	1/5 30>50	105033	33,3	99486	31,5	94630	30,0
	1/7 10>50	111688	35,4	106177	33,7	101326	32,1
	1/7 30>50	99541	31,6	99007	31,4	89199	28,3
3 saatlik veriler	10	108132	34,3	102557	32,5	96818	30,7
	30	103294	32,8	97872	31,0	92641	29,4
	50	94197	29,9	89044	28,2	84428	26,8
	1/5 10>50	130815	41,5	125096	39,7	120827	38,3
	1/5 30>50	109769	34,8	104406	33,1	99691	31,6
	1/7 10>50	114679	36,4	109301	34,7	104857	33,2
	1/7 30>50	107441	34,1	99177	31,4	94512	30,0

Çizelge G.1 : 3 Saatlik ve Günlük rüzgar hızları kullanılarak yapılan enerji hesaplamaları

EK H Güç Yoğunlukları

	Veri aralığı	10dk	30dk	1 saat	3 saat	1 gün
Veri Seti	10m	287	284	282	275	236
	30m	374	371	367	359	311
	50m	385	381	378	369	322
	alfa 1/5 1050	752	745	740	722	621
	alfa1/5 3050	508	503	498	487	424
	alfa 1/7 1050	571	566	561	550	473
	alfa 1/7 3050	465	462	458	447	387

Çizelge H.1 : Her durum için hesaplanan güç yoğunlukları (W/m²)

KAYNAKLAR

- [1] www.teias.gov.tr , alındığı tarih 16/11/2009
- [2] www.epdk.gov.tr , alındığı tarih 16/11/2009
- [3] **WWEA Wind Energy Report 2008**
- [4] www.eie.gov.tr , alındığı tarih 16/11/2009
- [5] **EER Research Company**, Global Wind Market Report 2008
- [6] **Wind Turbine Supply Chain Report 2008**
- [7] **Mortensen, Niels G.** 2004 Wasp Prediction Errors Due to Site Orography
- [8] **Wasp User Manuel, 2008.** Wasp 9 Help Facility, Riso National Laboratory
- [9] **Shafiqur Rehman, Abbadi Naif**, 2008. Wind shear coefficient, turbulence intensity and wind power potential assessment for Dhulom.
- [10] www.wasp.dk
- [11] www.awsopenwind.org
- [12] **Graeme Watson.** Comparison of wind flow models in complex terrain
- [13] **Erik Berge, Arne R. Gravdahl.** Wind in complex terrain: Acomparison of Wasp and two CFD models
- [14] **Durak Murat, Özer Serra.** Rüzgar Enerjisi (EİE)
- [15] Garrad Hassan Mast Inspection Notes
- [16] **Shafiqur Rehman, Abbadi Naif**, 2006. Wind shear coefficients and energy yield for Dhahran
- [17] **Rolando Soler – Bientz, Simon Watson, David Infield**, 2009. Evaluation of the Wind Shear at a Site in the North West of the Yucatan Peninsula, Mexico

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Ebubekir FIRTIN
Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul / 12/01/1985
Adres : Altunizade - Üsküdar / İSTANBUL
Lisans Üniversite : Yıldız Teknik Üniversitesi / Elektrik Mühendisliği