

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL HESAPLAMASINDA KULLANILAN
BİLGİSAYAR PROGRAMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Semih GÜZEL

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL HESAPLAMASINDA KULLANILAN
BİLGİSAYAR PROGRAMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Semih GÜZEL
(301101058)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Önder GÜLER

MAYIS 2014

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301101058 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Semih GÜZEL** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL HESAPLAMASINDA KULLANILAN BİLGİSAYAR PROGRAMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Önder GÜLER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **05 Mayıs 2014**
Savunma Tarihi : **26 Mayıs 2014**

Aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bana zamanını ayırarak beni en iyi şekilde yönlendiren, benimle tecrübelerini paylaşarak karşılaştığım problemleri aşmamı sağlayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Önder GÜLER'e, çalışmama büyük katkıları olan Sayın Arş. Gör. Seyit Ahmet AKDAĞ'a ve eğitim hayatım boyunca beni sürekli destekleyerek buralara gelmemdeki en büyük paya sahip olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2014

Semih GÜZEL
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE RÜZGAR ENERJİSİNİN DURUMU	7
2.1 Dünyada Rüzgar Enerjisi	7
2.2 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi	10
3. RÜZGAR ENERJİSİ İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER	17
3.1 Temel Denklemler.....	17
3.2 Güç Kanunu	19
3.3 Pürüzlülük Katsayısı	20
3.4 Weibull Dağılımı.....	21
4. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN HESAPLANMASINDA KULLANILAN BİLGİSAYAR PROGRAMLARI	25
4.1 WAsP	25
4.2 WindPRO	28
4.3 WindFarmer	31
4.4 Windographer.....	34
4.5 Homer.....	35
4.6 RETScreen	38
4.7 WindSim	40
5. BİR ÖLÇÜM DİREĞİNDEN ALINAN VERİLERİN BAŞKA BİR ÖLÇÜM DİREĞİNE ÖTELENMESİYLE YAPILAN RÜZGAR HIZI VE GÜÇ YOĞUNLUĞU HESABI	43
5.1 WAsP Programı Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar.....	44
5.2 WindPRO Programı Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar.....	47
5.3 WindFarmer Programı Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar.....	48
5.4 Sonuçların Değerlendirilmesi	48
6. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL HESAPLAMA PROGRAMLARINDAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....	51
6.1 Tek Türbin İçin Enerji Hesabı.....	52
6.1.1 WAsP programından elde edilen sonuçlar.....	53
6.1.2 WindPRO programından elde edilen sonuçlar.....	56
6.1.3 WindFarmer programından elde edilen sonuçlar.....	58
6.1.4 Windographer programından elde edilen sonuçlar	60
6.1.5 Homer programından elde edilen sonuçlar	61
6.1.6 RETScreen programından elde edilen sonuçlar.....	63

6.1.7 WindSim programından elde edilen sonuçlar	64
6.1.8 Sonuçların değerlendirilmesi.....	66
6.2 Rüzgar Çiftliği İçin Enerji Hesabı.....	68
6.2.1 Rüzgar çiftliği için WAsP programından elde edilen sonuçlar	71
6.2.1.1 WAsP programında ölçüm direği verileri kullanılarak	72
6.2.1.2 WAsP programında türbin yüksekliğindeki veriler kullanılarak	72
6.2.2 Rüzgar çiftliği için WindPRO programından elde edilen sonuçlar.....	73
6.2.2.1 WindPRO programında ölçüm direği verileri kullanılarak.....	74
6.2.2.2 WindPRO programında türbin yüksekliğindeki veriler kullanılarak ..	74
6.2.3 Rüzgar çiftliği için WindFarmer programından elde edilen sonuçlar	75
6.2.3.1 WindFarmer programında ölçüm direği verileri kullanılarak	76
6.2.3.2 WindFarmer programında türbin yüksekliğindeki veriler kullanılarak	76
6.2.4 Rüzgar çiftliği için WindSim programından elde edilen sonuçlar	77
6.2.4.1 WindSim programında ölçüm direği verileri kullanılarak	78
6.2.4.2 WindSim programında türbin yüksekliğindeki veriler kullanılarak ..	78
6.2.5 Sonuçların karşılaştırılması	79
7. SONUÇLAR	85
KAYNAKLAR.....	89
EKLER.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	97

KISALTMALAR

CFD (HAD)	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
GWEC	: Uluslar arası Rüzgar Enerjisi Konseyi
OECD	: Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
DMİ	: Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
REPA	: Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası
NREL	: Uluslar arası Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
CDM	: Temiz Kalkınma Mekanizması
LIDAR	: Lazer Tanıma Sistemi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Rüzgar enerjisi kurulu gücünde ilk 10 ülke.....	9
Çizelge 2.2 : Tekno – ekonomik rüzgar potansiyelinin rüzgar hızlarına göre dağılımı	13
Çizelge 3.1 : Alfa katsayısının saha koşullarına göre değişimi	20
Çizelge 5.1 : Ölçüm noktaları arası kuş uçuşu mesafe	43
Çizelge 5.2 : WAsP programından alınan rüzgar hızları	45
Çizelge 5.3 : WAsP programından alınan güç yoğunlukları	47
Çizelge 5.4 : WindPRO programından alınan rüzgar hızları.....	47
Çizelge 5.5 : WindPRO programından alınan güç yoğunlukları	47
Çizelge 5.6 : WindFarmer programından alınan rüzgar hızları	48
Çizelge 6.1 : Hesaplamalarda kullanılan türbinler ve teknik özellikleri	52
Çizelge 6.2 : WAsP programından farklı yükseklikteki 3 anemometre datası kullanılarak 10 değişik türbin için elde edilen enerji üretim değerleri (MWh)	55
Çizelge 6.3 : WindPRO programından farklı yükseklikteki 3 anemometre datası kullanılarak 10 değişik türbin için elde edilen enerji üretim değerleri (MWh)	57
Çizelge 6.4 : WindFarmer programından farklı yükseklikteki 3 anemometre datası kullanılarak 10 değişik türbin için elde edilen enerji üretim değerleri (MWh)	59
Çizelge 6.5 : Windographer programından farklı yükseklikteki 3 anemometre datası kullanılarak 10 değişik türbin için elde edilen enerji üretim değerleri (MWh)	61
Çizelge 6.6 : Homer programından farklı yükseklikteki 3 anemometre datası kullanılarak 10 değişik türbin için elde edilen enerji üretim değerleri (MWh)	62
Çizelge 6.7 : RETScreen programından farklı yükseklikteki 3 anemometre datası kullanılarak 10 değişik türbin için elde edilen enerji üretim değerleri (MWh)	63
Çizelge 6.8 : WindSim programından farklı yükseklikteki 3 anemometre datası kullanılarak 10 değişik türbin için elde edilen enerji üretim değerleri (MWh)	66
Çizelge 6.9 : WAsP programında 10, 30 ve 50 metredeki ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri	72
Çizelge 6.10 : WAsP programında 2009, 2010 ve 2011 yılları için Türbin 2’de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri	73
Çizelge 6.11 : WindPRO programında 10, 30 ve 50 metredeki ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri	74

Çizelge 6.12 : WindPRO programında 2009, 2010 ve 2011 yılları için Türbin 2’de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri	75
Çizelge 6.13 : WindFarmer programında 10, 30 ve 50 metredeki ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri	76
Çizelge 6.14 : WindFarmer programında 2009, 2010 ve 2011 yılları için Türbin 2’de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri	77
Çizelge 6.15 : WindFarmer programında 10, 30 ve 50 metredeki ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri	78
Çizelge 6.16 : WindSim programında 2009, 2010 ve 2011 yılları için Türbin 2’de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri.....	79
Çizelge 6.17 : Ölçüm verileri kullanılarak elde edilen üretim değerleri ve santralin gerçek üretimi [MWh]	80
Çizelge 6.18 : Ölçüm verileri kullanılarak elde edilen üretim değerleri ile santralin gerçek üretimi arasındaki bağıl hata oranları (%)	81
Çizelge 6.19 : Türbin yüksekliğindeki ölçüm verileri kullanılarak elde edilen üretim değerleri ve santralin gerçek üretimi [MWh]	83
Çizelge 6.20 : Türbin yüksekliğindeki ölçüm verileri kullanılarak elde edilen üretim değerleri ile santralin gerçek üretimi arasındaki bağıl hata oranları	84

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dünya enerji tüketiminin kaynak bazında yıllara göre değişimi.....	2
Şekil 1.2 : Dünya elektrik enerjisi tüketiminin kaynak bazında yüzdeleri.....	3
Şekil 1.3 : Yenilenebilir enerji üretimleri ve yenilenebilir enerjinin toplam elektrik içerisindeki payı	3
Şekil 1.4 : Yenilenebilir enerjinin kaynaklara göre dağılımı.....	4
Şekil 2.1 : Rüzgar enerjisi kurulu gücünün yıllara göre değişimi (MW)	8
Şekil 2.2 : Rüzgar enerjisi kurulu gücünün yıllık artış miktarları (MW)	8
Şekil 2.3 : Rüzgar enerjisi kurulu gücünün yıllık artışının kıtalara göre dağılımı	10
Şekil 2.4 : Global piyasada 2014 - 2017 arası rüzgar enerjisi kapasitesi tahminleri .	10
Şekil 2.5 : Türkiye Rüzgar Atlası	11
Şekil 2.6 : 50 metrede yıllık ortalama rüzgar hızlarını gösteren Türkiye Rüzgar Atlası	12
Şekil 2.7 : 70 metrede yıllık ortalama rüzgar hızlarını gösteren Türkiye Rüzgar Atlası	12
Şekil 2.8 : Ocak 2014 itibariyle Türkiye rüzgar enerjisi kapasitesi kümülatif artışı .	13
Şekil 2.9 : Bölgelere göre rüzgar enerjisi kurulu gücü dağılımı.....	14
Şekil 2.10 : İllere göre rüzgar enerjisi kurulu gücü dağılımı.....	14
Şekil 3.1 : Rüzgarın türbine girişi ve çıkışı	18
Şekil 3.2 : Betz Limitinin değişimi.....	19
Şekil 3.3 : Pürüzlülük uzunluğu ve pürüzlülük sınıfları	22
Şekil 3.4 : Farklı c katsayılarına göre Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu	23
Şekil 3.5 : Farklı k katsayılarına göre Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu	24
Şekil 4.1 : WAsP programının ana işleyişi.....	27
Şekil 4.2 : WAsP programı ara yüzü	28
Şekil 4.3 : WindPRO programı modül tanıtımları.....	29
Şekil 4.4 : WindPRO programı harita ve obje ara yüzü	30
Şekil 4.5 : WindPRO programı modül ara yüzü.....	31
Şekil 4.6 : WindFarmer programı ara yüzü	33
Şekil 4.7 : Windographer ara yüzü	35
Şekil 4.8 : Homer programının ana başlıkları.....	36
Şekil 4.9 : Homer programı ara yüzü.....	37
Şekil 4.10 : RETScreen programı model akış diyagramı	38
Şekil 4.11 : RETScreen programı ara yüzü	40
Şekil 4.12 : WindSim programına ait modüller.....	41
Şekil 4.13 : WindSim programı ara yüzü	42
Şekil 5.1 : Dört ölçüm direğinin harita üzerindeki konumu	44
Şekil 5.2 : A noktasında yer alan anemometreden 30 metrede alınan ölçümlerden elde edilen 30 metre yüksekliğindeki rüzgar haritası.....	45
Şekil 5.3 : C noktasında yer alan anemometreden 30 metrede alınan ölçümlerden elde edilen 30 metre yüksekliğindeki rüzgar haritası.....	46

Şekil 5.4 : D noktasında yer alan anemometreden 30 metrede alınan ölçümlerden elde edilen 30 metre yüksekliğindeki rüzgar haritası	46
Şekil 5.5 : Dört ölçüm direğinden yedi anemometreden alınan veriler kullanılarak diğer noktalardaki rüzgar hızlarının karşılaştırılması (m/s)	49
Şekil 6.1 : WAsP'tan alınan iki yıllık 10 dakikalık verilere ait rüzgar gülü.....	53
Şekil 6.2 : WAsP'tan alınan iki yıllık 10 dakikalık 10, 30 ve 50 metredeki verilerin sektörlere göre ortalama hız dağılımı	54
Şekil 6.3 : WAsP programında anemometre ve türbin yerlerini gösteren harita	55
Şekil 6.4 : WindPRO'dan alınan iki yıllık 10 dakikalık verilere ait rüzgar gülü	56
Şekil 6.5 : WindPRO'dan alınan iki yıllık 10 dakikalık 10, 30 ve 50 metredeki verilerin sektörlere göre ortalama hız dağılımı	57
Şekil 6.6 : WindPRO programında anemometre ve türbin yerlerini gösteren harita	57
Şekil 6.7 : WindFarmer'dan alınan iki yıllık 10 dakikalık verilere ait rüzgar gülü...	58
Şekil 6.8 : WindFarmer programında anemometre ve türbin yerlerini gösteren harita	59
Şekil 6.9 : Windographer'dan alınan iki yıllık 10 dakikalık verilere ait rüzgar gülü	60
Şekil 6.10 : Windographer'dan alınan iki yıllık 10 dakikalık 10, 30 ve 50 metredeki verilerin aylara göre ortalama hız dağılımı	60
Şekil 6.11 : Homer'den alınan iki yıllık 10 dakikalık 10, 30 ve 50 metredeki verilerin aylara göre ortalama hız dağılımı	62
Şekil 6.12 : WindSim'den alınan iki yıllık 10 dakikalık verilere ait rüzgar gülü.....	64
Şekil 6.13 : WindSim'den alınan iki yıllık 10 dakikalık 10, 30 ve 50 metredeki verilerin sektörlere göre ortalama hız dağılımı	65
Şekil 6.14 : WindSim programında anemometre ve türbin yerlerini gösteren harita.....	65
Şekil 6.15 : WAsP, WindPRO ve WindFarmer'a ait bir yıllık 10 dakikalık 10, 30 ve 50 metredeki ölçüm verilerinin sektörlere göre ortalama hız dağılımı ..	69
Şekil 6.16 : WindSim'e ait bir yıllık 10 dakikalık 10, 30 ve 50 metredeki ölçüm verilerinin sektörlere göre ortalama hız dağılımı	70
Şekil 6.17 : WAsP, WindPRO ve WindFarmer için Türbin 2'de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verilerinin sektörlere göre ortalama hız dağılımı	70
Şekil 6.18 : WindSim için Türbin 2'de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verilerinin sektörlere göre ortalama hız dağılımı.....	71
Şekil 6.19 : WAsP'tan alınan rüzgar çiftliğine ait harita	71
Şekil 6.20 : WindPRO'dan alınan rüzgar çiftliğine ait harita.....	73
Şekil 6.21 : WindFarmer'dan alınan rüzgar çiftliğine ait harita	75
Şekil 6.22 : WindSim'den alınan rüzgar çiftliğine ait 3 boyutlu harita	77
Şekil A.1 : Enercon E48 800 kW türbininin güç eğrisi	92
Şekil A.2 : Enercon E82 2000 kW türbininin güç eğrisi	92
Şekil A.3 : Alstom ECO3000 3000 kW türbininin güç eğrisi	93
Şekil A.4 : Gamesa G83 2000 kW türbininin güç eğrisi	93
Şekil A.5 : GE 600a 600 kW türbininin güç eğrisi	94
Şekil A.6 : Nordex N50 800 kW türbininin güç eğrisi	94
Şekil A.7 : RE Power 5000 kW türbininin güç eğrisi.....	95
Şekil A.8 : Siemens SWT-2.3 2300 kW türbininin güç eğrisi.....	95
Şekil A.9 : Vestas V47 660 kW türbininin güç eğrisi	96
Şekil A.10 : Vestas V90 2000 kW türbininin güç eğrisi	96

RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL HESAPLAMASINDA KULLANILAN BİLGİSAYAR PROGRAMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Enerji kullanımının her geçen gün artmaya devam etmesi fosil kaynakların yanında alternatif enerji kaynaklarının da gündeme gelmesini sağlamıştır. Gelişmekte olan ülkeler gelişimlerini sürdürebilmek, gelişmiş ülkeler ise konumlarını koruyabilmek için daha çok enerjiye ve enerji kaynağına ihtiyaç duymaktadırlar. Bu enerjinin büyük bir kısmı fosil yakıtlar olarak bilinen kömür, petrol ve doğalgazdan karşılanmaktadır. Fosil yakıtlara olan bu bağımlılık sahip olunan rezervlerde azalmaya neden olmuş ve yeni rezervler arama ihtiyacını doğurmuştur. Yeni rezervlere ulaşmada yaşanan güçlükler ve fosil yakıt kaynaklı çevreye verilen zararlar alternatif enerji kaynakları olarak bilinen başta rüzgar ve güneş enerjisini ön plana çıkarmıştır. Alternatif enerji kaynakları içerisinde yıllık bazda en fazla artış rüzgar enerjisinde görüldüğü gibi diğer kaynaklara nazaran global anlamda kümülatif kurulu güç bakımından da rüzgar enerjisi ilk sırada yer almaktadır. Bu sebeplerden ötürü rüzgar enerjisi alanına olan yatırımların artması ile birlikte rüzgar enerjisinin toplam enerji üretimindeki payı gün geçtikçe gözle görülür şekilde artış göstermektedir.

Rüzgar, sürekli olarak ve aynı seviyede esmediğinden dolayı rüzgar enerjisinden elektrik üretiminin tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu tahmin işlemleri değişik yöntemler kullanan bilgisayar programları vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu alanda pek çok program bulunmaktadır. Bu çalışmada incelenen programlar ise WAsP, WindPro, WindFarmer, WindSim, Windographer, Homer ve RetScreen'dir.

Bu çalışmada ilk olarak rüzgar enerjisinin dünyadaki ve ülkemizdeki son durumundan bahsedilmiş ve güncel verilerle rüzgar enerjisinin önemine değinilmiştir. İkinci bölümde rüzgar enerjisi ile ilgili teorik bilgilendirme yapılmıştır. Rüzgar enerjisi hesaplamalarında kullanılan ana denklemler ve genel kurallar bu kısımda yer almaktadır. Üçüncü bölümde kullanılan yedi programın detayları, hesaplama yöntemleri ve özelliklerinden bahsedilmiştir.

Hesaplamaların yapıldığı bölüm olan dördüncü bölümde WAsP, WindPro ve WindFarmer programları vasıtasıyla beş farklı rüzgar ölçüm direği verisi kullanılarak, programların bir ölçüm direğinden diğerine rüzgar hızını ne ölçüde doğru tahmin ettiği ölçülmüştür. Yapılan hesaplamalar neticesinde elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmış ve programların bir tutarlılık içerisinde hareket edip etmediği incelenmiştir. Beşinci bölümde, yedi farklı programla öncelikle on farklı türbin tipi için ölçüm direğinden alınan veriler kullanılarak yıllık enerji üretimi hesaplamaları yapılmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Programların 10, 30 ve 50 metreden alınan verileri kullanarak birbirlerine kıyasla ne derece tutarlı tahmin

yaptıkları incelenmiştir. Altıncı bölümde, on iki adet türbinden oluşan 24 MW kurulu gücündeki rüzgar santral sahası için yıllık enerji üretimleri programlar vasıtasıyla hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda hem ölçüm direğinden alınan hem de türbin göbek yüksekliğindeki veriler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar santral sahasının gerçek üretimleriyle karşılaştırılmış ve programların tutarlılıkları sorgulanmıştır.

COMPARISON OF SOFTWARE PROGRAMS USED FOR THE CALCULATION OF WIND ENERGY POTENTIAL

SUMMARY

The increase of the utilization of energy brings about necessity of reaching alternative energy sources except fossil energy sources. Developing countries for continuing to develop and developed countries for maintaining their position need more and more energy and energy sources. The majority of this energy is generally covered from coal, oil and natural gas known as fossil fuels. This dependence of fossil fuels have caused a decrease in reserves and this situation has led to the need of seeking new reserves. Seeking new reserves have become a need for countries who depend on another countries for energy. Difficulties in seeking new reserves and environmental effects of fossil fuels have featured especially wind and solar energy known as alternative energy sources.

Wind energy is free and limitless. Because of that investments of wind energy is growing every year. Every year more capacity is activating from investors according to the year before. Wind energy is the number one of cumulative installed power for alternative sources and has the highest increase on annual scale as alternative sources of energy. The rising of wind energy's share of total energy production increases the investments for this sector.

When starting a wind energy project, first thing is choosing the right place. If investor think the place is the right place, second thing is installing a wind measurement system to this place. In Turkey, for getting a wind energy license, investors must get minimum one year wind measurement for the area. But recommended measurement period is two or three year. After that, these measurements should be used for the right way which is appropriate for measurement site.

Due to the changes in the amount of wind, energy production from the wind must be predicted. This forecast procedures are made by computer programs which use different methods. Some of them use statistical methods and some of them use wind flow models. Although there are many programs in this field, the most widely used seven of them investigated in this study. These programs are WAsP, WindPRO, WindFarmer, WindSim, Windographer, Homer and RETScreen. Every program has advantages and disadvantages to each other.

WAsP is for the vertical and horizontal extrapolation of wind climate statistics. It contains several physical models to describe the wind flow over different terrains and close to sheltering obstacles.

WindPRO is for the design and planning of both single wind turbines and wind farms. The program's software package consists of several modules, each with specific purpose. The different modules in WindPRO are fully integrated, which means that a change in input data in one of the modules will automatically been recorded on all other modules.

WindFarmer has been developed to facilitate the design of wind farms to maximizing the power produced by the wind farm and minimizing environmental impact.

Windographer is for analyzing wind resource data measured by met tower, SoDAR, or LiDAR. It imports virtually every data format, allows rapid quality control and statistical analyses including MCP, and exports to all wind flow models.

Homer is a program for microgrid and hybrid applications. The program has different options like wind, solar, hydropower, fuel cells and combine them together. Homer has ability to make economic analyses and carbon emissions for application.

RETScreen is an Excel-based clean energy project analysis software. Also it is used for determining the technical and financial viability of potential renewable energy, energy efficiency and cogeneration projects.

WindSim is a CFD based program that combines advanced numeric processing with compelling 3D visualization. The program optimizes park layouts by identifying turbine locations with the highest wind speeds and low turbulence to maximize production.

In this study, first of all an introduction is given about energy and wind energy.

At the second stage, the national and international status of wind energy are investigated with current statistics of year 2013.

At the third stage, theoretical information is given. Main expressions and general rules are given for basic wind energy.

At the fourth stage, general information, calculation methods and details of seven program's are given.

At the fifth stage, five different set of measured data from four different wind measuring system which are located at different regions are used for prediction of wind speed by mast to mast. At this stage, three different programs are used for calculations. These are WAsP, WindPro and WindFarmer. Results are compared with each other and consistency of programs are investigated.

At the sixth stage, for ten different types of turbines, annual energy production calculations are made with using the set of measured data. Measured data is chosen for two years, 2008 and 2009. Results for seven programs and ten turbines compared with each other.

The seventh and last stage, for the wind farm which consists twelve turbines with an installed capacity of 24 MW, annual energy production calculations were made for both the set of measured data and turbine hub height data. When turbine hub height data is used, results are much better than measured data.

Lastly, all of these wind farm calculations which are results of set of measured data and turbine hub height data is compared with wind farm real productions. When 10 meter data is used, results are not good for all programs. When 30 meter and 50 meter data is used, results are much better than 10 meter data results. We have wind farm real data and we compare our results with the real production data at the sixth stage.

All programs give really good results when we use turbine hub height data. Turbine hub height data is in accordance with real productions much more than the set of measured data. The calculations which are made for seven programs can be different

for another site and another wind regime. This should not be ignored for calculations of seven program.

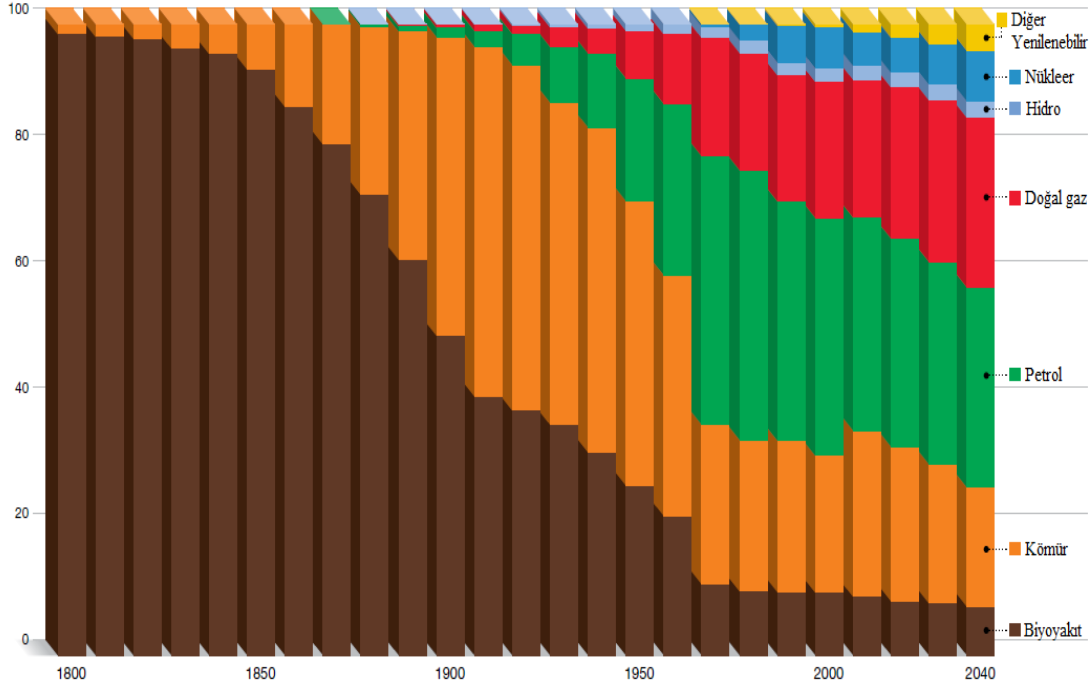
1. GİRİŞ

Bir işin, bir hareketin ya da bir oluşumun meydana gelebilmesi için enerjiye ihtiyaç vardır. Bu enerji de dünya üzerinde var olan farklı enerji türlerinin birbirlerine dönüştürülmesi ile elde edilebilir. Yani termodinamiğin birinci kanununa göre “Enerji yoktan var edilemez ve yok edilemez, sadece bir şekilden diğerine dönüşür.” [1]. En genel haliyle enerji, bir sisteme eklendiğinde ya da çıkartıldığında sistem parametrelerinden herhangi birinde değişikliklere neden olan etken olarak tanımlanabilir.

Enerji, üretildiği kaynaklar bakımından konvansiyonel ve yenilenebilir olmak üzere ikiye ayrılır. Konvansiyonel kaynaklar, fosil kökenli yakıtlardan oluşmaktadır. Fosil yakıtlar, ölen canlı organizmaların oksijensiz ortamda milyonlarca yıl boyunca çözülmesi ile oluşur ve yanma reaksiyonuyla enerjiye dönüşür. Yenilenebilir kaynaklar ise doğada bulunan ve belli koşullar dahilinde kendini yenileyebilen tükenmeyen kaynaklardır.

Globalleşen dünyada insan nüfusunun artmasına bağlı olarak enerji ihtiyacı da artmakta ve artan enerji ihtiyacını karşılayacak kaynaklara ulaşmak gün geçtikçe zorlaşmaktadır. Küresel ısınmanın etkilerinin artması ve insanoğlunun doğaya kendi istekleri doğrultusunda yön verme çabası da enerjinin elde edilme çeşitlerinde değişiklik yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Artan enerji ihtiyacı ve fosil kaynaklı yakıtlara ulaşmada yaşanan zorluklar, enerji fiyatlarında dalgalanmalara neden olmaktadır. Bu dalgalanmaların yaşanması da yenilenebilir enerjilerin ülkelerin hem ekonomik hem de siyasi anlamda gündemine girmesini sağlamıştır. 1800 ile 2040 yılları arasında enerji kaynaklarına olan talepte meydana gelen ve gelmesi düşünülen değişimleri Şekil 1.1’de görmek mümkündür [2]. 1800’lerin başında ana enerji kaynağı olarak kullanılan geleneksel biyoyakıtlar 1900’lerden sonra yerini kömüre bırakmıştır. Daha sonra ise 1950’lere kadar artarak devam eden kömür kullanımı yerini yavaş yavaş petrole bırakmaya başlamıştır. Petrol nedeniyle çıkan savaşlar ve kolay rezervlere ulaşma imkanının azalması neticesinde 1970’ten sonra doğal gaz

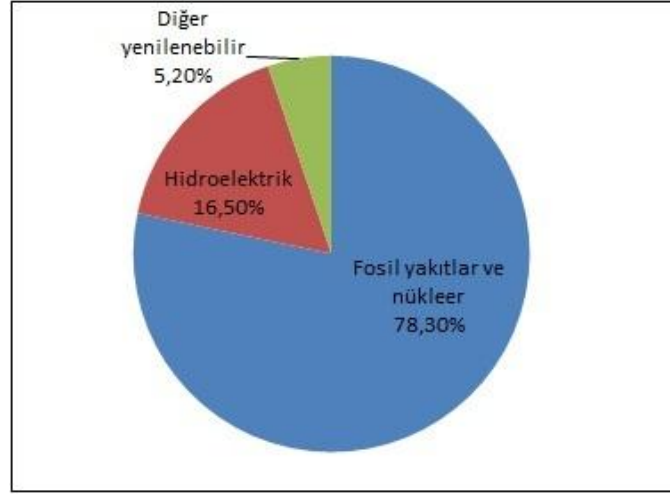
kullanımı artmaya başlamıştır. Doğal gazın önümüzdeki yıllarda da artışını sürdürmesi beklenmektedir. Özellikle 1970’den sonra petrolde yaşanan sıkıntı yeni enerji kaynaklarının keşfine imkan tanıdığından yenilenebilir enerji alanında da gelişme yaşanmıştır ve gelecek projeksiyonlarında da önemli bir yere sahip olacakları öngörülmektedir [2].



Şekil 1.1 : Dünya enerji tüketiminin kaynak bazında yıllara göre değişimi [2].

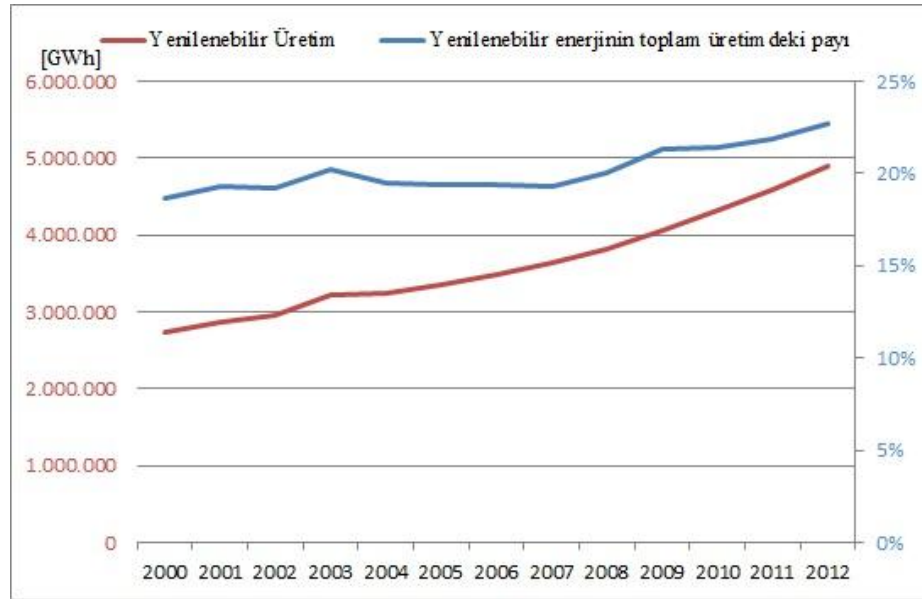
2011 yılı verilerine göre dünya enerji tüketiminde kaynak bazında kullanım oranlarında yenilenebilir enerjiler %19'luk ve nükleer enerji %2.8'lik bir paya sahipken fosil yakıtlar %78.2'lik oranla halen açık ara önde yer almaktadır [3].

2012'de dünya genelinde elektrik kurulu kapasitesi 5654 GW seviyelerindedir. Bu kapasitenin 1470 GW'lık kısmını yenilenebilir enerjiler oluşturmasına karşın büyük hidroelektrik santraller çıkartıldığında diğer yenilenebilir enerji kapasitesi 480 GW seviyesine düşmektedir. Bu 480 GW'lık kapasitenin 283 GW'lık kısmını ise rüzgar enerjisi oluşturmaktadır. Kapasite olarak toplam kurulu gücün %26'sını oluşturan yenilenebilir enerji kaynakları, sürekli olmamaları nedeniyle enerji üretiminde daha düşük oranlarda etkili olmaktadır. Elektrik üretimi açısından bakıldığında yenilenebilir enerjiler 4892 TWh ile dünya elektrik üretiminin %23'ünü karşılamaktadır [4]. Kaynak bazında elektrik üretimine ait veriler Şekil 1.2'de yer almaktadır [3].



Şekil 1.2 : Dünya elektrik enerjisi tüketiminin kaynak bazında yüzdeleri [3].

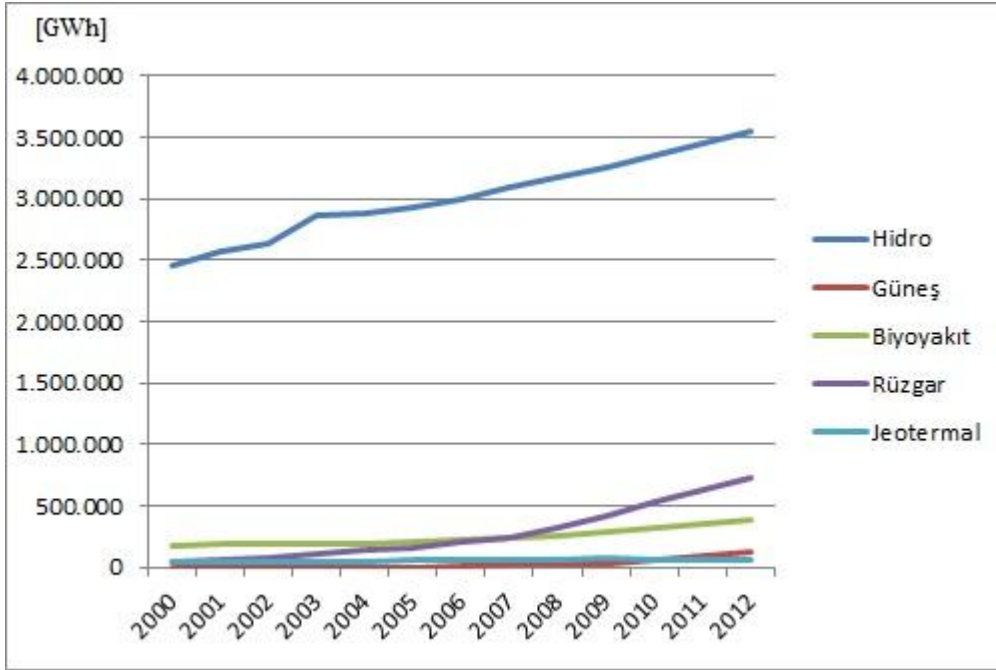
Yenilenebilir enerji kaynaklarından yapılan üretimin toplam üretim içerisindeki payını gösteren grafik Şekil 1.3'te yer almaktadır [4]. 2000 ile 2012 yılları arasında yenilenebilir enerjilerden elde edilen elektrik üretimi her geçen yıl artmıştır. Bu artışa paralel olarak yenilenebilir enerjilerin toplam elektrik üretimi içerisindeki payı da artmaktadır [4].



Şekil 1.3 : Yenilenebilir enerji üretimleri ve yenilenebilir enerjinin toplam elektrik içerisindeki payı [4].

Yenilenebilir enerjiler arasındaki dağılım ise Şekil 1.4'te gösterildiği gibidir [4]. Hidroelektrik kaynaklar 2012 itibarıyla %22,7 seviyesinde olan yenilenebilir üretimde %16,5'lik oranla ilk sırada yer almaktadır. Rüzgar enerjisi %3,4'lük üretimi karşılarken, güneş enerjisi sadece %0,6'luk üretime karşılık gelmektedir. 2000'den

2012'ye kadar geçen 12 yıllık süre içerisinde rüzgar enerjisinin gösterdiği gelişim dikkat çekicidir.



Şekil 1.4 : Yenilenebilir enerjinin kaynaklara göre dağılımı [4].

Rüzgar enerjisi kurulu gücünün ve elektrik üretimindeki payının her yıl artması bu alanda yapılan yatırımların da hız kazanmasını sağlamıştır. Yatırımlar arttıkça maliyetler düşmekte ve buna paralel olarak da daha fazla şirket bu alana yönelmektedir. Bir rüzgar yatırımına başlandığında öncelikle rüzgar hızlarının yüksek olduğu ve yatırıma uygun yerler tespit edilerek bu alanlara yönelik potansiyel hesaplama çalışmaları yapılmaktadır.

Rüzgar enerjisi potansiyelini hesaplama üzerine çeşitli yöntemler kullanan pek çok program bulunmaktadır. Sadece lineer yöntemlerle hesaplama yapan Windographer, Homer, RETScreen, akış alan modellemesi ile çalışan WAsP, WindPRO, WindFarmer, Openwind ve CFD yani Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemini kullanan WindSim, Meteodyn gibi isteğe ve projeye göre kullanılabilecek çok çeşitli programlar bulmak mümkündür. Bu programlar kullanılarak hazırlanan ön fizibilite ve fizibilite raporları sayesinde yatırımların teknik ve ekonomik açıdan uygunlukları tespit edilmekte ve yatırımcının buna göre hareket etmesi sağlanmaktadır. Hesaplamaların gerçeğe yakın çıkması için uzman kişilerle ve doğru yöntemlerle çalışılmalıdır. Aksi halde uygun olmayan alanlarda yapılacak olan yatırımlar neticesinde ciddi kayıplar meydana gelebilir.

Rüzgar enerjisi potansiyel hesaplama programları üzerine yapılan çalışmaların sayısı çok azdır. Danimarka'nın Torrid bölgesi için hazırlanan bir vaka çalışmasına göre enerji hesaplamalarında WindSim programı WAsP'a göre %9 daha düşük değerlerde sonuç vermektedir [5]. Berge ve diğerlerinin hazırladığı ve iki sektör için yapılan çalışmada, bir sektör için WAsP ve WindSim hata oranları yüzde olarak 11 ve 10 çıkarken, diğer sektör için ise 14 ve 24 olarak bulunmuştur [6]. Nielsen tarafından WindFarmer ve WindPRO kullanılarak yapılan rüzgar santrallerinde iz etkisi hesabında gerçek iz etkisi değeri %10 iken WindFarmer %8 ve WindPRO ise %9 oranlarına sahiptir[7]. Pauen tarafından hazırlanan 3 farklı bölgede değişik yüksekliklerde alınan ölçümler kullanılarak yapılan çalışmada WAsP ve WindSim'in dikey rüzgar hızı hesaplama sonuçları karşılaştırılmış ve sektör bazında değişmekle birlikte programların birbirlerine yakın sonuç verdikleri kanaatine varılmıştır. Ayrıca dikey yükseltme işleminde orografi etkisi az olduğunda WindSim programının problemler yaşadığı belirtilmiştir [8]. Steinbach tarafından hazırlanan çalışmada ise 4 farklı yükseklikte yer alan anemometreden alınan verilerle dikey yükseltme işlemi rüzgar hızı ve güç yoğunluğu için gerçekleştirilmiştir [9]. Güç yoğunluğu açısından bakıldığında WindSim yükseklik arttıkça gerçekleşen değere göre daha düşük sonuçlar vermektedir. Elde edilen sonuçların WAsP'a göre daha iyi olduğu belirtilmiştir. Rüzgar hızı açısından ise WindSim, 50 metrenin üzerinde ölçülen değere göre daha düşük sonuçlar vermektedir.

Yapılan çalışmaların genelde iki programla kısıtlı olduğu görüldüğünden bu çalışmada, farklı yöntemlerle çalışan 7 program için aynı koşullar altında hem türbin hem de santral bazında hesaplamalar yapılması ve bu hesaplamalar neticesinde programların hem birbirleriyle hem de gerçek üretim değerleriyle karşılaştırılarak tutarlılıklarının kontrol edilmesi amaçlanmıştır.

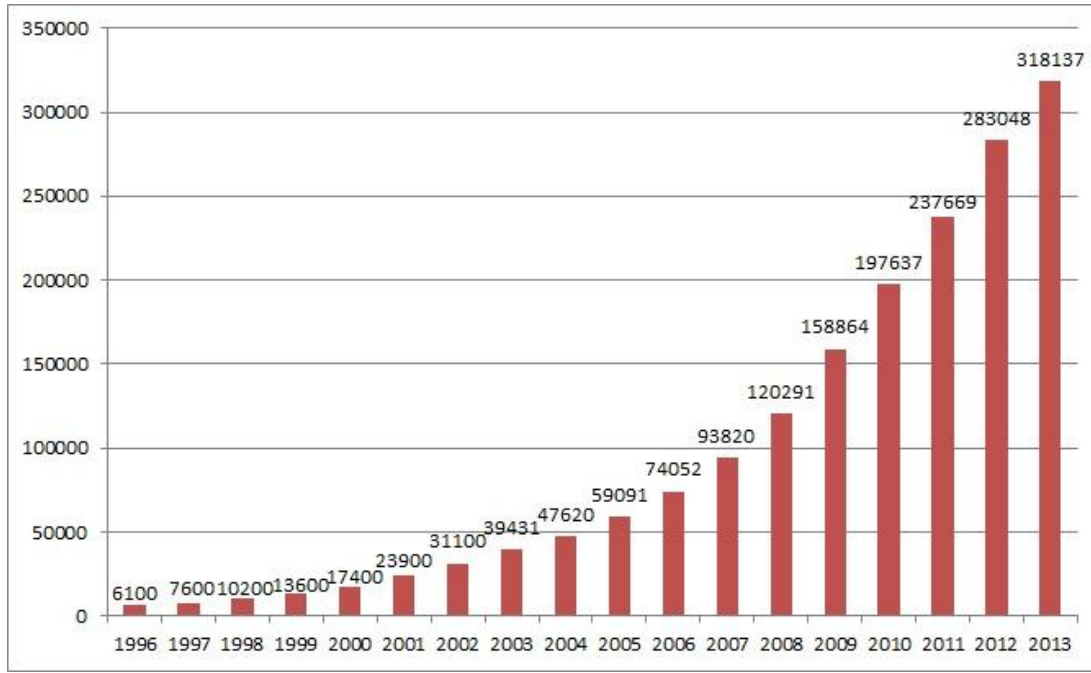
2. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE RÜZGAR ENERJİSİNİN DURUMU

2.1 Dünyada Rüzgar Enerjisi

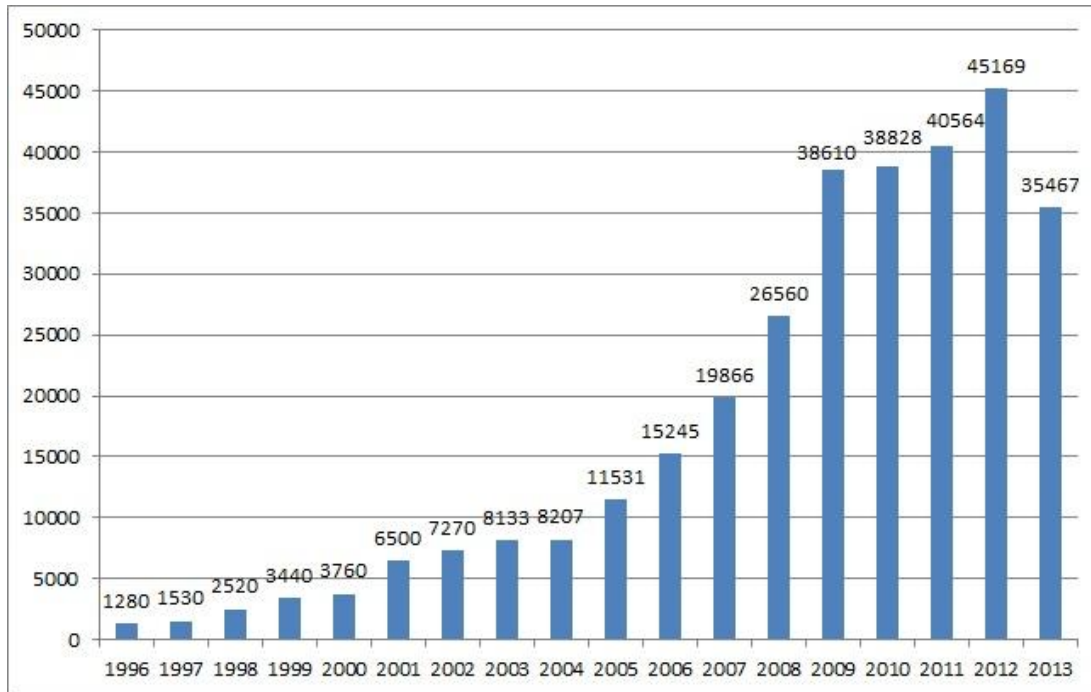
Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi ilk defa 1881 yılında Danimarka’da gerçekleştirilmiştir [10]. Daha sonra fosil kaynakların rezerv miktarlarında meydana gelen artışlar neticesinde 1920’lerin sonuna doğru rüzgar enerjisinden elektrik üretimi çalışmaları yavaşlamıştır. 1950’li yıllarda rüzgar enerjisi konusundaki çalışmalar tekrar önem kazanmıştır. Bunun en önemli nedeni, 2. Dünya savaşı sırasında enerji kaynaklarında yaşanan sıkıntılar ve enerjide kendi kendine yetebilir olmanın öneminin anlaşılmasıdır. Fakat aynı dönemde konvansiyonel enerji kaynaklarının fiyatlarının düşük olması ve bu kaynaklara ulaşma konusundaki sıkıntıların aşılmış olduğu fikri, rüzgar enerjisi konusunda yapılan çalışmaların yavaşlamasına neden olmuştur. 1970’lerde yaşanan petrol krizleri ülkelerin kendi öz kaynaklarını kullanmasının önemini bir kez daha ortaya koymuş ve rüzgar enerjisi konusunda yapılan çalışmalar tekrar hızlanmıştır. Yaşanan bu son krizden sonra rüzgar enerjisinden elektrik üretimi katlanarak artmış ve 2013 sonu itibariyle de 318137 MW’lık kapasiteye ulaşmıştır [11]. Şekil 2.1’de rüzgar enerjisi kurulu gücünün 1996 – 2013 yılları arasında yıllık bazda kapasite artışı MW olarak görülmektedir [11].

1996 ile 2013 arasında rüzgar enerjisi kurulu gücü yıllık bazda ortalama %26 seviyelerinde artış göstermiştir. Her üç yılda bir rüzgar enerjisi kurulu gücü iki katına çıkarak 1996’da 6100 MW olan kapasite 2013’te yani 17 yıl sonra 318137 MW olmuştur. Rüzgar kapasitesinde yıllık bazda yapılan yatırımlar neticesinde meydana gelen artış Şekil 2.2’de gösterilmektedir [11]. Önümüzdeki 5 yıl içerisinde de her yıl %13 seviyelerinde artış olması beklenmektedir [11].

Rüzgar enerjisi kapasitesi her yıl ciddi miktarlarda artış göstermesine rağmen toplam enerji tüketimi içerisindeki payı yaklaşık %3,5 civarındadır. Yaklaşık 318 GW’lık kurulu güçten 700 TWh’lik enerji elde edilmesi planlanmaktadır [11].



Şekil 2.1 : Rüzgar enerjisi kurulu gücünün yıllara göre değişimi (MW) [11].



Şekil 2.2 : Rüzgar enerjisi kurulu gücünün yıllık artış miktarları (MW) [11].

Kurulu güç içerisinde en fazla kapasiteye sahip olan 10 ülkeye ait verilere Çizelge 2.1’de yer verilmektedir [11].

Rüzgar enerjisi kurulu gücünde ilk sırada 91,4 GW’lık kurulu güç ile toplam kapasitenin %28,7’sine sahip olan Çin bulunmaktadır. Ancak bu kapasite Çin’in elektrik ihtiyacının sadece %2’sini karşılamaktadır. İkinci sırada yer alan ABD 61

GW ile elektrik ihtiyacının %3,5'ini rüzgardan sağlamaktadır. Avrupa'da ise kıta bazındaki toplam kapasitenin yarıdan fazlası Almanya ve İspanya'da yer almaktadır.

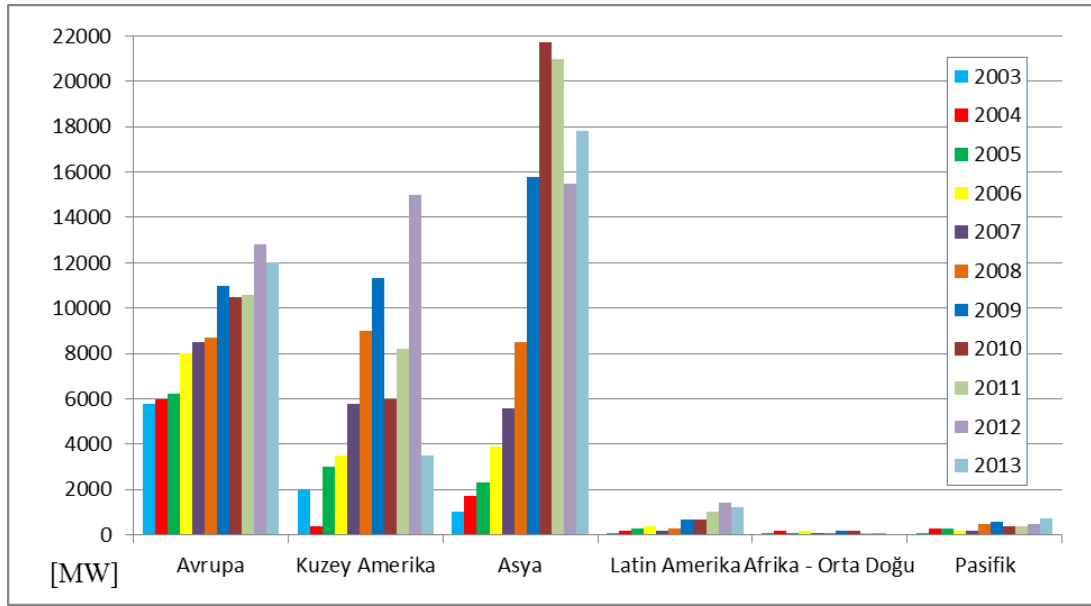
Çizelge 2.1 : Rüzgar enerjisi kurulu gücünde ilk 10 ülke [11].

Ülke	Kapasite (MW)	Kapasite yüzdesi
Çin	91.424	%28,7
ABD	61.091	%19,2
Almanya	34.250	%10,8
İspanya	22.959	%7,2
Hindistan	20.150	%6,3
Birleşik Krallık	10.531	%3,3
İtalya	8.552	%2,7
Fransa	8.254	%2,6
Kanada	7.803	%2,5
Danimarka	4.772	%1,5
Dünya ülkeleri	48.352	%15,2
İlk 10 toplamı	269.785	%84,8
TOPLAM	318.137	%100

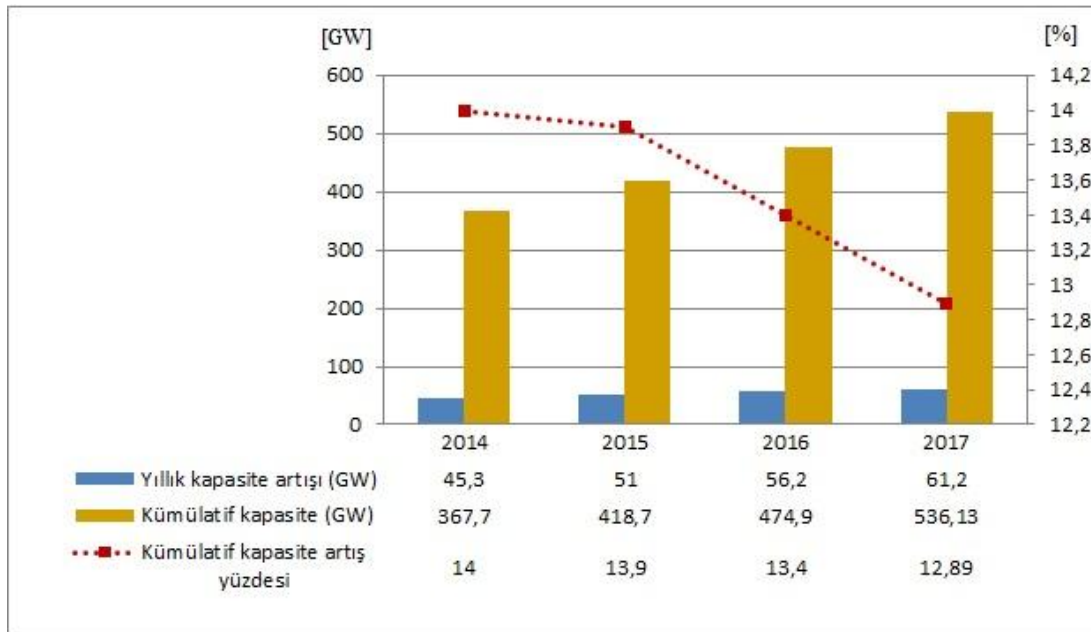
2013 yılı içerisinde Çin ve Hindistan'ın başı çektiği Asya ülkelerinin rüzgar enerjisi yatırımları, Avrupa ve ABD de dahil olmak üzere diğer rüzgar enerjisi yatırımlarının toplamından daha fazladır. Şekil 2.3'te kıtalara göre 2003 - 2013 yılları arasındaki rüzgar kurulu güçlerinin yıllık bazda artışları görülmektedir [11].

Rüzgar enerjisi alanında GWEC tarafından yapılan gelecek projeksiyonlarına ait tahminler Şekil 2.4'te yer almaktadır [11].

2014 sonu itibariyle 368 GW olması beklenen rüzgar enerjisi kurulu gücünün, 2017'de 540 GW'lar seviyesinde olacağı tahmin edilmektedir. Yıllık bazda rüzgar enerjisi yatırımlarının ise 40 – 60 GW seviyesinde seyredeceği öngörülmektedir [11].



Şekil 2.3 : Rüzgar enerjisi kurulu gücünün yıllık artışının kıtalara göre dağılımı [11].

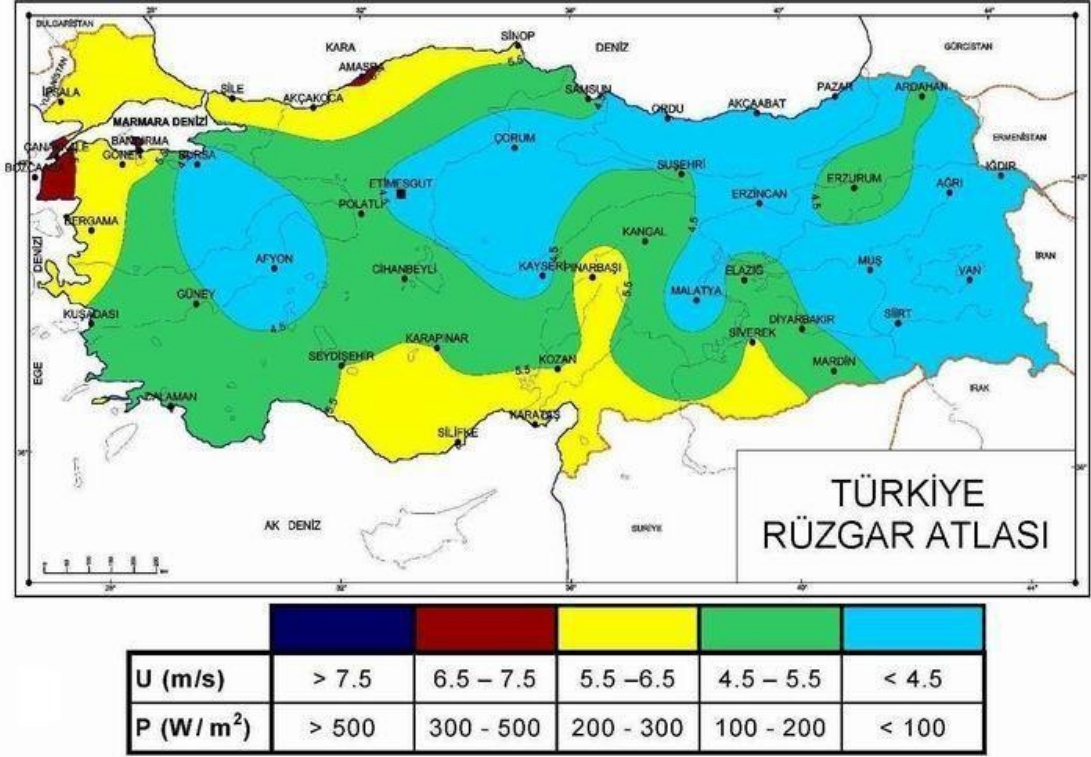


Şekil 2.4 : Global piyasada 2014 - 2017 arası rüzgar enerjisi kapasitesi tahminleri [11].

2.2 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi

Türkiye’nin rüzgar enerji potansiyeli ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır, bununla birlikte bu çalışmalarda ağırlıklı olarak kullanılan teknik, ekonomik ve üretim potansiyeli ile ilgili rakamların temeli 1993 yılında Wijk ve Coelingh tarafından yapılan ve OECD ülkelerinin rüzgar enerjisi potansiyelini inceleyen çalışmaya dayanmaktadır. Bu çalışmada ülkemiz teknik potansiyelinin 83000 MW, ekonomik

potansiyelinin ise 10000 MW olduğu belirtilmiştir. 2002 yılında ise Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün (DMİ) ülke çapındaki ölçüm istasyonu verileri kullanılarak Türkiye Rüzgar Haritası çıkartılmıştır. Şekil 2.5'te 50 metre yükseklik için Türkiye Rüzgar Atlası gösterilmektedir. Haritanın sonuçlarına göre Wijk ve Coelingh tarafından yapılan çalışmaya benzer sonuçlar elde edilmiş olup, 10000 MW ekonomik ve 88000 MW teknik potansiyelin olduğu belirtilmiştir [12].

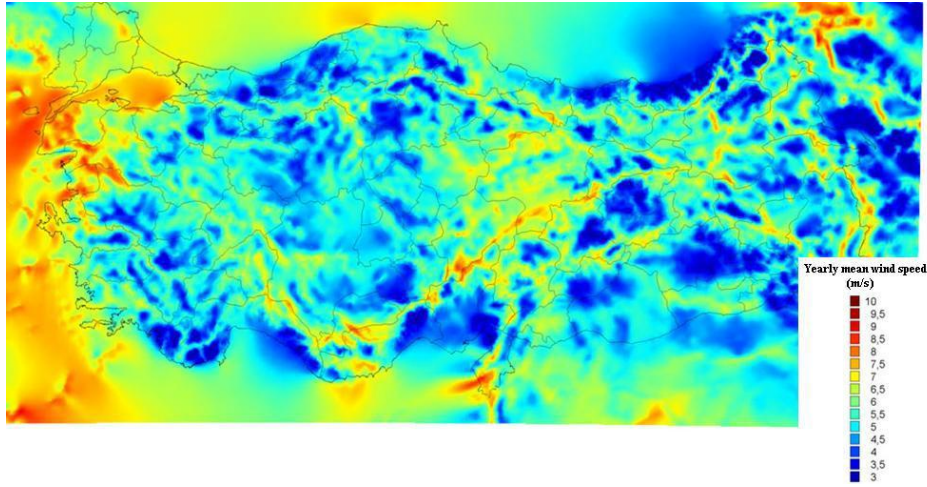


* Açık yüzeyler için (yer düzeyinden 50 m yükseklikteki) rüzgar potansiyeli sınıf aralıkları

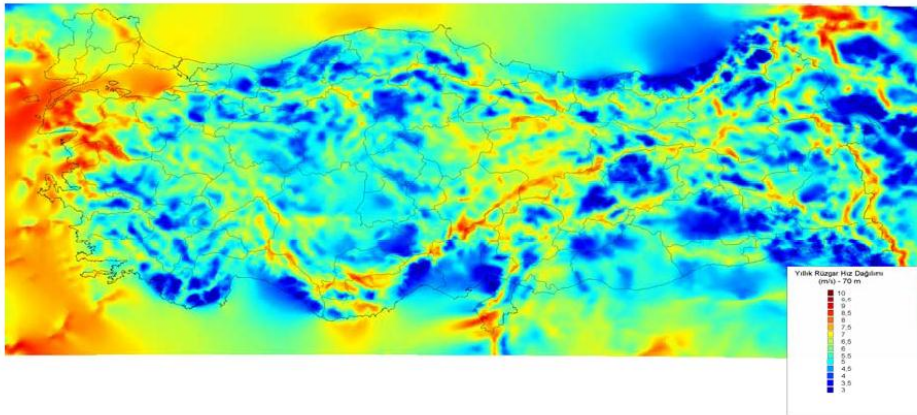
Şekil 2.5 : Türkiye Rüzgar Atlası [12].

Bununla birlikte, teknik potansiyel kavramının zamanla değişme ihtimali azdır fakat ekonomik potansiyel kavramı alternatif yakıt türlerine göre değişmektedir. Bu nedenle rüzgar enerjisinden daha iyi bir şekilde faydalanmak için zaman içinde değişen ekonomik potansiyel kavramının tekrar değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, 2006 yılında uydu verileri kullanılarak Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) hazırlanmıştır. REPA ile 50 m yükseklikte kara bölgelerinde 300 W/m²' den büyük olan 131756 MW'lık, derinliği 50 metreye kadar olan denizlerde ise 17393 MW'lık potansiyelin olduğu hesaplanmıştır [13]. REPA rüzgar atlası çalışmaları sadece karasal alanlar ile sınırlı değildir, ayrıca denizlerdeki potansiyel için de hesaplamalar yapılmıştır. 50 metre derinliğe kadar olan yerler için yapılan

Çalışma sonucunda 300 W/ m²’ den büyük potansiyel toplamı 83906 MW olarak belirtilmektedir.



Şekil 2.6 : 50 metrede yıllık ortalama rüzgar hızlarını gösteren Türkiye rüzgar atlası [14].



Şekil 2.7 : 70 metrede yıllık ortalama rüzgar hızlarını gösteren Türkiye rüzgar atlası [14].

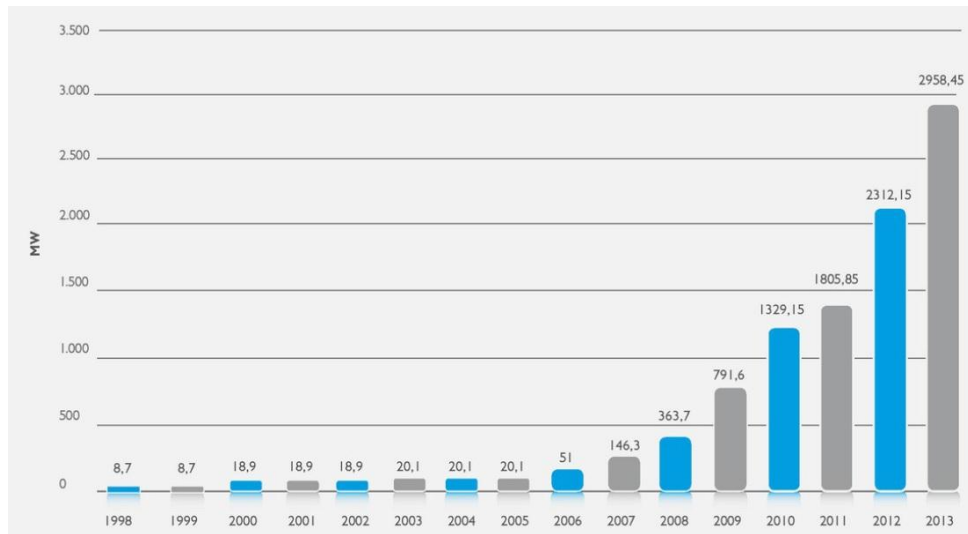
REPA rüzgar atlasının 50 metre yükseklik için ortalama hızları Şekil 2.6’da, 70 metre yükseklik için ortalama hızlar Şekil 2.7’de gösterilmektedir [14].

Türkiye’nin tekno-ekonomik rüzgar potansiyeli ise Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü’nün çalışmaları neticesinde 48 GW olarak tespit edilmiştir. Ekonomik olarak uygun ve ortalama rüzgar hızı 7 m/s’nin üzerinde olan alanlar bu çalışma kapsamında tekno-ekonomik olarak kabul edilmiştir. Özellikle Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz rüzgar potansiyeli yüksek yerlerdir. 48 GW olan tekno-ekonomik kapasitenin rüzgar hızlarına göre dağılımı Çizelge 2.2’de görüldüğü gibidir [14].

Çizelge 2.2 : Tekno – ekonomik rüzgar potansiyelinin rüzgar hızlarına göre dağılımı [14].

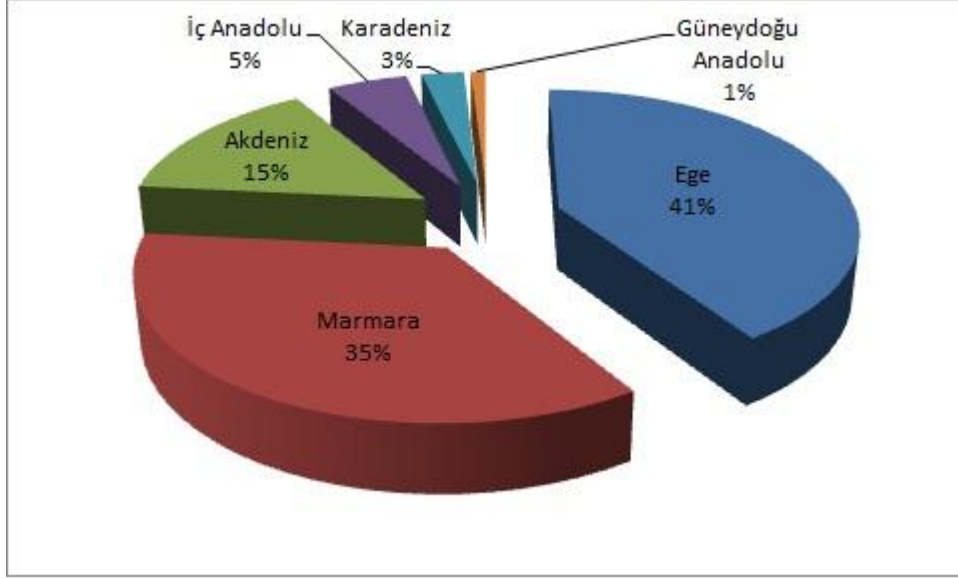
Rüzgar Hızı (m/s)	Rüzgar gücü yoğunluğu (W/m²)	Kullanılabilir alanlar (km²)	Tekno-ekonomik potansiyel güç (MW)
7 – 7.5	400 – 500	5852	29259
7.5 – 8	500 – 600	2599	12994
8 – 9	600 – 800	1080	5400
> 9	> 800	39	196
Toplam		9570	47849

1998 yılında 8,7 MW’lık kapasite ile Türkiye elektrik üretimi içerisinde çok küçük bir paya sahip olan rüzgar enerjisi, 2013 yılına geldiğimizde 2958,45 MW’lık kapasitesiyle Türkiye’nin elektrik üretiminde %3’lük bir paya sahiptir. 2013 itibariyle 2958,45 MW’lık kapasite işletmede, 980,9 MW’lık kapasite inşa halinde, 5776 MW’lık kapasite ise lisanslı olmak üzere toplamda 9715,35 MW’lık kapasite bulunmaktadır. Özellikle 2005 yılında çıkarılan 5346 sayılı kanun neticesinde rüzgar enerjisi alanındaki yatırımlar hız kazanmıştır. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi Türkiye’de rüzgar enerjisi kapasitesi 2006 ile 2013 yılları arasında ortalama olarak %95’ten fazla artış göstermiştir [15].



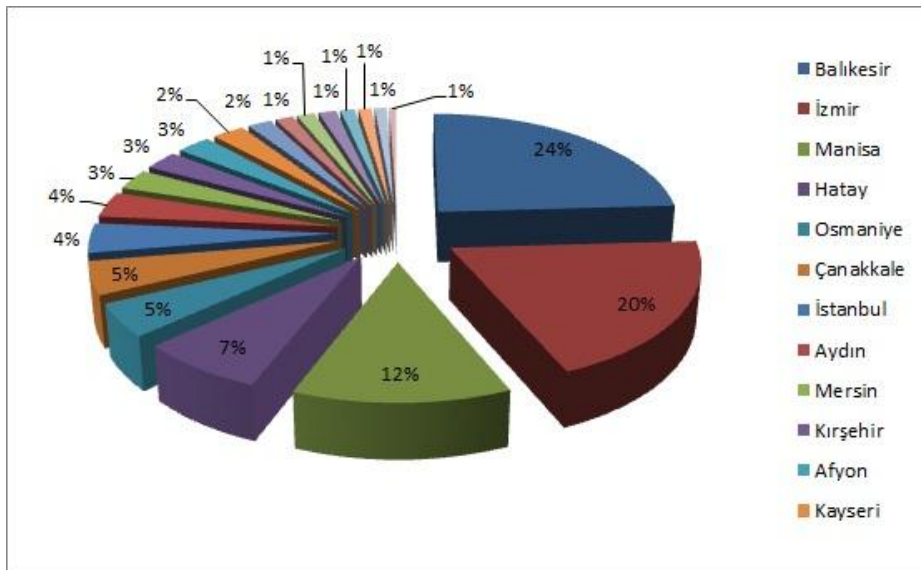
Şekil 2.8 : Ocak 2014 itibariyle Türkiye rüzgar enerjisi kapasitesi kümülatif artışı [15].

Rüzgar kurulu gücü, özellikle Marmara ve Ege bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Yatırım maliyetlerinin düşmesine paralel olarak rüzgar hızı daha düşük olan yerlerde de rüzgar santralleri kurulmaya başlanmıştır. Şekil 2.9’da bölgelere göre rüzgar enerjisi kurulu gücünün dağılımı gösterilmektedir [15].



Şekil 2.9 : Bölgelere göre rüzgar enerjisi kurulu gücü dağılımı [15].

İl bazında baktığımızda ise yoğunluğun Balıkesir, Manisa ve İzmir illerinde olduğu görülmektedir. 2958,45 MW’lık kurulu gücün yarısından fazlası bu illerde bulunan santrallerde yer almaktadır. İllere göre rüzgar kurulu gücünün dağılımı Şekil 2.10’da yer almaktadır [15].



Şekil 2.10 : İllere göre rüzgar enerjisi kurulu gücü dağılımı [15].

Gelecek projeksiyonlarına baktığımızda 2020 sonrası için Türkiye'nin 20000 MW'lık rüzgar santrali kurma hedefi bulunmaktadır [16]. 2020 sonrası için koyulan bu hedefin gerçekleşebilmesi için yıllık ortalama 2000 MW'ın üzerinde kapasitede rüzgar enerjisi santralinin devreye alınması gerekmektedir.

3. RÜZGAR ENERJİSİ İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

3.1 Temel Denklemler

Hareket halindeki bir cismin sahip olduğu enerji kinetik enerjidir. Kinetik enerji ise denklem (3.1)'deki gibi ifade edilir.

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

Denklem (3.1)'de yer alan m kütleyi, v ise hızı ifade etmektedir. Denklemdaki m yerine birim zamandaki kütesel debi ifadesi yani denklem (3.2)'deki ifade kullanılır.

$$\dot{m} = \rho Av \quad (3.2)$$

Bu şekilde rüzgarın taşıdığı enerji formülü denklem (3.3)'teki gibi ifade edilir.

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

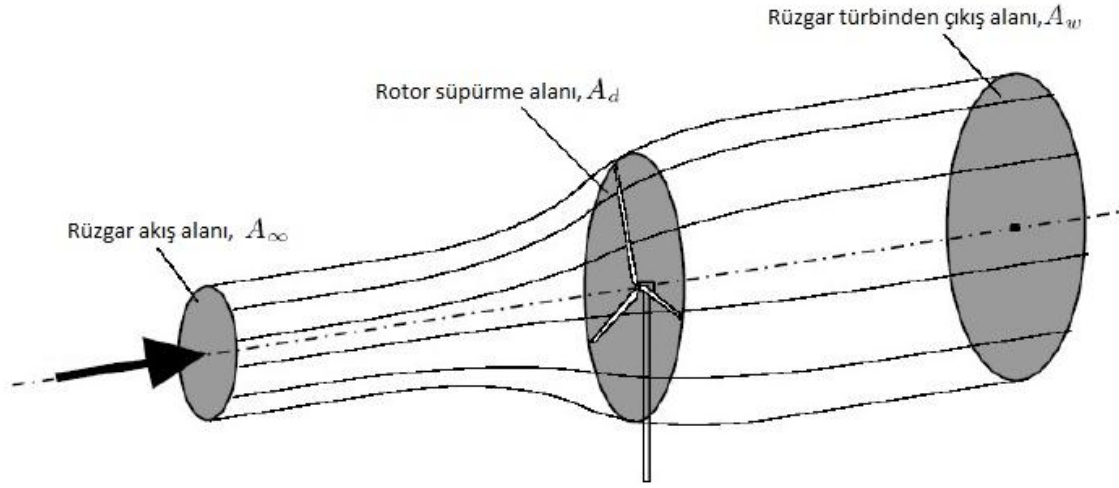
Denklem (3.3)'ten de görüleceği üzere rüzgardan elde edilebilecek enerji rüzgar hızının küpü ile doğru orantılıdır. Ayrıca hava yoğunluğu (ρ) ve rüzgar kanatlarının süpürme alanı (A) da rüzgar enerjisini belirleyen faktörlerdendir.

Bir rüzgar türbininden elde edilebilecek enerji ise denklem (3.4)'te ifade edildiği gibidir.

$$E = \frac{1}{2}\rho Av^3 C_p \quad (3.4)$$

Burada C_p kapasite faktörünü ifade etmektedir. Kapasite faktörü değeri Betz Limiti olan 0.59 değerinden büyük olamaz [17].

Bir rüzgar türbinine gelen hava kütlesi Şekil 3.1'de gösterildiği gibi hareket eder. Türbine doğru genişleyen ve hızı azalan hava kütlesi, türbinden çıktıktan sonra ise girdiği hızdan daha düşük bir seviyeye inmektedir. Bu iki hız arasındaki fark, türbinde enerjiye dönüşen rüzgar hızıdır. Hızdaki bu azalmanın sebebi rüzgarın türbine yaklaşması neticesinde daha geniş bir alana yayılması ve sahip olduğu enerjinin bir kısmının rotora aktarılmış olmasıdır.



Şekil 3.1 : Rüzgarın türbine girişi ve çıkışı [23].

Rüzgar türbininden elde edilecek güç ifadesi denklem (3.5)'te yer aldığı şekilde ifade edilebilir. V_1 türbine giren hızı, V_3 türbinden çıkan hızı ifade etmektedir.

$$P = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_3^2) \quad (3.5)$$

Rüzgar hızının rotordaki değerinin, rotora giriş ve çıkıştaki hızlarının ortalaması olduğu kabul edilir. Bu durumda güç formülünün son hali denklem (3.6)'daki gibi olur.

$$P = \frac{1}{4} \rho A (V_1 + V_3) (V_1^2 - V_3^2) \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'yı, rüzgarın sahip olduğu enerji (P_t) ile üretilebilecek enerji oranı olarak ifade edebileceğimiz kapasite faktörü yani C_p 'ye göre düzenleyecek olursak denklem (3.7) elde edilir.

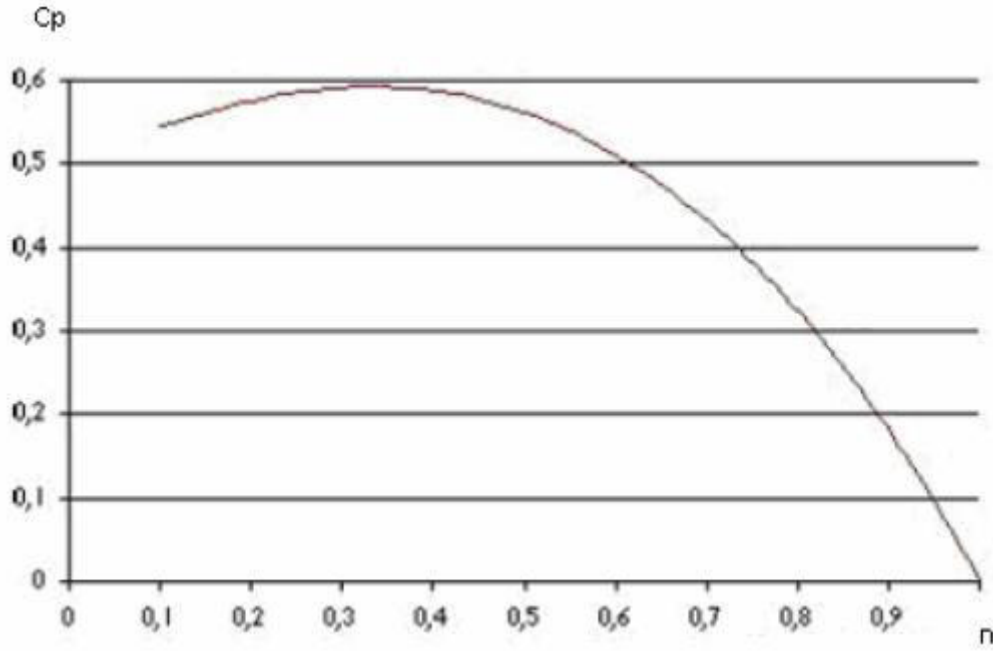
$$C_p = \frac{P_t}{P_u} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (V_1 + V_3) (V_1^2 - V_3^2)}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3} \quad (3.7)$$

Denklem (3.7) sadeleştirildikten sonra denklem (3.8) elde edilir.

$$C_p = \frac{1}{2} \frac{(V_1 + V_3)(V_1^2 - V_3^2)}{V_1^3} \quad (3.8)$$

$n = \frac{V_3}{V_1}$ olmak üzere, C_p 'nin maksimum olduğu değeri bulmak için türevinin alınıp

sıfıra eşitlenmesi gerekir. Bu işlem neticesinde $n = \frac{1}{3}$ olarak bulunur ve bu değer denklemde yerine konduğunda C_p 'nin 0.59 değerini aldığı görülür. Bu değere Betz limiti denir. Betz Limitinin n katsayısına göre değişimi Şekil 3.2'de yer almaktadır.



Şekil 3.2 : Betz Limitinin değişimi [23].

Şekil 3.2'de ifade edilen, bir rüzgar türbinine yaklaşan rüzgarın sahip olduğu enerjinin herhangi bir durumda en fazla %59'unun kullanılabileceğidir. Bu değer aynı zamanda türbinlerin ulaşabileceği maksimum verim değeridir. Ancak piyasada ticari olarak satılan türbinler genellikle bu değerinin altında bir performansla çalışırlar. Bunun sebebi rotor etrafında oluşan türbülans ve dişli kutusu gibi elemanlar ile elektrik sistemlerindeki kayıplardır.

3.2 Güç Kanunu

Rüzgar potansiyeli hesaplamaları için genel olarak 10, 30 ve 50 metre yüksekliklerinde bulunan anemometrelerle yapılan ölçüm değerleri kullanılır. Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte türbin yüksekliğinde ölçümler yapılmaya başlanmıştır. Ancak türbin yüksekliğinden daha düşük seviyelerde yapılan

ölçümlerin türbin yüksekliği seviyesine yükseltilebilmesi için güç kanunu olarak ifade edilen denklem (3.9)'dan yararlanılmaktadır.

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad (3.9)$$

Denklem (3.9)'da yer alan v_1 ölçüm yapılan yükseklikteki rüzgar hızını, v_2 belirlenmek istenen yükseklikteki rüzgar hızını, h_1 ölçüm yapılan referans yüksekliğini, h_2 hesaplanması istenen v_2 hızının yüksekliğini, α ise Hellmann katsayısı olarak da bilinen alfa katsayısını ifade etmektedir [17]. Alfa katsayısı bölgenin özelliklerine göre farklı değerler alabilmektedir. Bu değerler, Çizelge 3.1'de yer almaktadır.

Çizelge 3.1 : Alfa katsayısının saha koşullarına göre değişimi [17].

Bölge Özellikleri	Alfa Katsayısı
Açık denizler	0.10
Düz ve çalılık araziler	0.20
Ağaçlık bölgeler	0.30
Yüksek binalar ya da ormanlık alanlar	0.40

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{3\alpha} \quad (3.10)$$

Güç yoğunluğunu hesaplamak için denklem (3.10) kullanılmaktadır. Burada yer alan ifadelerden, h_1 yüksekliğinde hesaplanmış P_1 kullanılarak, h_2 yüksekliğinde hesaplanmak istenen P_2 güç yoğunluğu değerine ulaşılır.

3.3 Pürüzlülük Katsayısı

Alfa değeri genel olarak 0.14 olarak alınabilir. Ancak hesaplamaların daha tutarlı olması için bölgesel olarak ve kısa süreler için pürüzlülük katsayısı hesabı yapılmalıdır. Bu hesaplama için kullanılan yöntemler şunlardır;

- Pürüzlülük uzunluğu cinsinden pürüzlülük katsayısının bulunması

$$\alpha = 0.096 \log_{10} z_0 + 0.016 (\log_{10} z_0)^2 + 0.24 \quad [18]. \quad (3.11)$$

- Hız ve yükseklik cinsinden pürüzlülük katsayısının bulunması

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(v_{ref})}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{z_{ref}}{10}\right)} \quad [19]. \quad (3.12)$$

- Pürüzlülük uzunluğu ve hız cinsinden pürüzlülük katsayısının bulunması

$$\alpha = z_0 \left[1 - 0.55 \log(v_{ref}) \right] \quad [20]. \quad (3.13)$$

Pürüzlülük sınıfları 0, 1, 2 ve 3 olarak kabul edilir. Bu pürüzlülük sınıflarına karşılık gelen pürüzlülük uzunluğu değerleri ve yüzey yapısı karakteristikleri Şekil 3.3'te yer almaktadır [10].

3.4 Weibull Dağılımı

Belirli bir yerdeki rüzgar şiddetinin karakteristiğinin uzun dönemde yavaş bir değişim gösterdiği kanıtlanmıştır. Bir yıldan diğer bir yıla ortalama rüzgar şiddetindeki değişimi tahmin etmek zor olsa da, rüzgar verisi bulunan yılın olasılık dağılım fonksiyonu tanımlanarak, gelecek yılki varyasyon iyi bir şekilde tahmin edilebilir. Birçok bölgede, saatlik rüzgar verisinin yıllık değişimini göstermek için Weibull dağılımı iyi bir gösterge olarak kabul edilir.

Weibull dağılımı, boyutsuz şekil (k) ve rüzgar hızı ile aynı birime sahip ölçek (c) parametrelerinden oluşan iki parametrelili bir dağılımdır. İki parametrelili Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu denklem (3.14)'te verilmiştir [21].

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (3.14)$$

Denklem (3.14)'te yer alan v rüzgar hızını (m/s), k şekil parametresini, c ise ölçek parametresini (m/s) ifade etmektedir.

Weibull dağılımının kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonu ise denklem (3.15)'te yer almaktadır.

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3.15)$$

Z_0 (m)	Yüzey Yapısı Karakteristikleri	Pürüzlülük Sınıfı
1.00		
0.50	Büyük şehirlerin varoşları, taşra kentleri	3
0.30	Siper kuşakları, oman, küçük binalı şehir	
0.20	Birçok ağaç ve/veya çalılar, tek ya da iki katlı seyrek binalar	
0.10	Kapalı görünümlü çiftlik arazisi, seyrek ağaçlık	2
0.05	Açık görünümlü çiftlik arazisi, seyrek ağaçlık	
0.03	Çok seyrek bina ve ağaçlı çiftlik arazisi	1
	Havaalanları (binaları ve ağaçları ile birlikte)	
0.01	Havaalanı pistleri	
	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)	

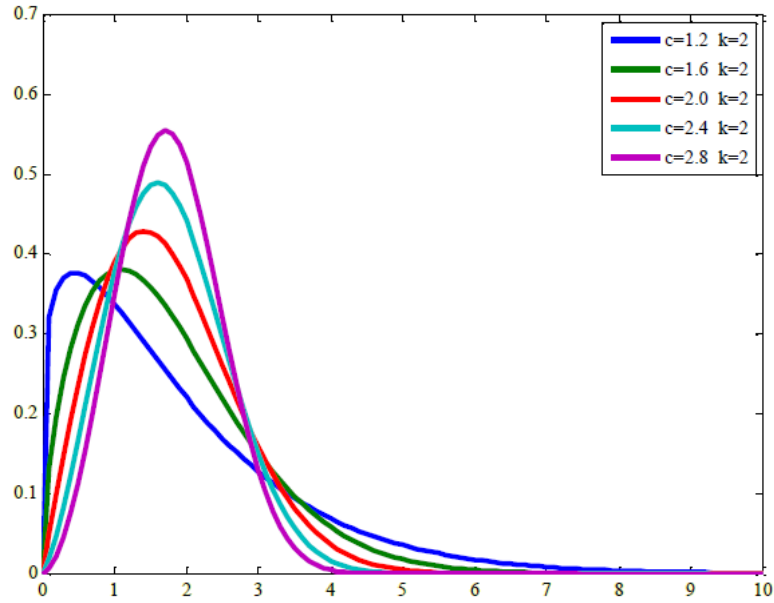
Şekil 3.3 : Pürüzlülük uzunluğu ve pürüzlülük sınıfları [10].

Weibull dağılımı rüzgar verilerine uygulandığı zaman, şekil parametresinin ekvator yakınlarında 1 civarında, ılıman enlemler için 2 ve sürekli rüzgar alanları için ise 3 civarında olduğu bilinmektedir [22].

Weibull dağılımında ölçek parametresinin 1 ve 2' ye eşit olduğu zaman, özel durumlar söz konusudur. Ölçek parametresinin 1'e eşit olması durumunda dağılım Gaussian dağılıma benzemektedir, 2' ye eşit olması durumunda ise Rayleigh dağılımı olarak bilinen tek parametrelili bir dağılıma dönüşmektedir [21].

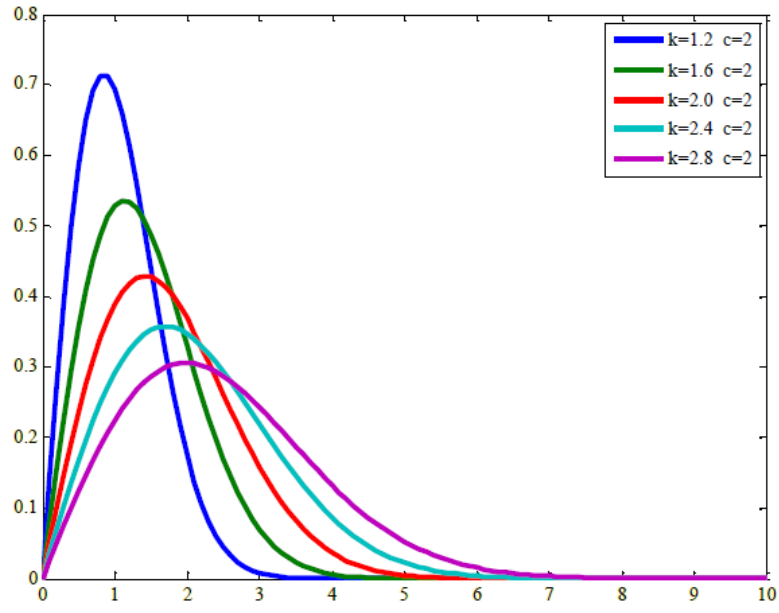
Şekil parametresinin sabit olduğu ve ölçek parametresinin değişken olduğu durumlara ait grafik Şekil 3.4'te yer almaktadır [24]. Ölçek parametresinin sabit olduğu ve şekil parametresinin değişken olduğu durumlar için ise Şekil 3.5'te yer alan durumlar meydana gelmektedir [24].

Ölçek parametresi c sabit tutularak; şekil parametresi küçültülürse Weibull dağılım fonksiyonu düşük hızlara doğru yaklaşır keskinleşir, şekil parametresi büyütülürse yüksek hızlara doğru genişler. Şekil parametresi k sabit tutularak; ölçek parametresi küçültülürse dağılım fonksiyonu genişler ve tepe noktası düşer. Ölçek parametresi yükselttilirse dağılım daralır ve tepe noktası yükselir [23].



Şekil 3.4 : Farklı c katsayılarına göre Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu [24].

Weibull dağılımının kullanılması bir sakınca 0-1 m/s gibi küçük hız verilerini bu dağılımın yeterince temsil edememesidir, fakat günümüz türbinlerinin enerji üretimine başlama hızları genelde 3-4 m/s arasında olması nedeni ile dağılımın kullanılması sonucundaki hata yok denecek kadar az olmaktadır.



Şekil 3.5 : Farklı k katsayılarına göre Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu [24].

4. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN HESAPLANMASINDA KULLANILAN BİLGİSAYAR PROGRAMLARI

Rüzgar enerjisinden elektrik üretiminde dikkat edilmesi gereken en önemli kısımlardan biri, santralin kurulacağı yerde yapılan ölçümlerde elde edilen veriler kullanılarak üretilen enerjinin doğru bir şekilde hesaplanmasıdır. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için pek çok farklı bilgisayar programı kullanılmaktadır. Bu bölümde, hesaplamalarda en çok kullanılan yedi programın genel içeriği hakkında bilgiler verilecektir. Bu programlar, WAsP, WindPRO, WindFarmer, Windographer, Homer, RETScreen ve WindSim'dir.

4.1 WAsP

WAsP (the Wind Atlas Analysis and Application Program) programı 1987 yılında DTU Risø National Laboratory Wind Energy and Atmospheric Physics bölümü tarafından oluşturulmuştur. Bu program sayesinde rüzgar data analizleri, rüzgar atlası oluşturma, rüzgar hızı tahmini, rüzgar tarlası enerji hesaplamaları ve türbin yerleşim işlemleri gerçekleştirilmektedir.

WAsP yazılımı, veri analizlerini, rüzgar hız verilerinin iki parametrelili Weibull dağılımına uygun bir dağılım gösterdiğini varsayarak yapmaktadır. Bu yazılım, dört değişik girdi bilgisini kendi alt modellerinde değerlendirerek, bölgesel rüzgar atlası istatistiklerini hesaplamaktadır [25]. WAsP yazılımının kullandığı temel bilgiler şunlardır:

- rüzgar verisi,
- bölge pürüzlülük bilgileri,
- yakın çevre engel bilgileri,
- bölgenin topoğrafyası.

Program beş ana hesaplama bloğuna sahiptir. Bunlar:

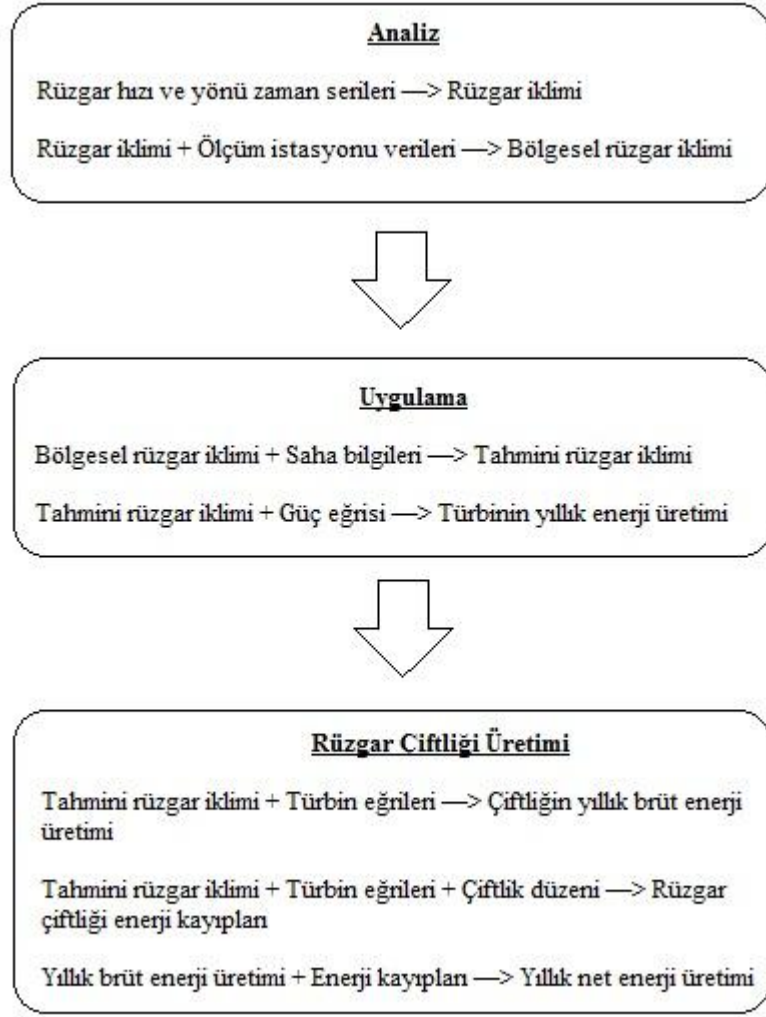
- Data analizi: rüzgar ölçümlerinde elde edilen verilerin analizinin yapıldığı kısımdır. İki şekilde analiz yapılabilir; OWC (Observed Wind Climate) ve WAsP İklim Analizi (Climate Analyst).
- Rüzgar atlası oluşturulması: analiz edilen rüzgar verileri standart koşullara göre düzenlenerek rüzgar atlasları meydana getirilir.
- Rüzgar hızı tahmini: bir bölge için hazırlanan rüzgar atlası ile istenilen bölgenin spesifik verileri girilerek o bölgenin rüzgar hızı tahminleri yapılır.
- Rüzgar gücü potansiyelinin hesaplanması: seçilen rüzgar türbininin güç eğrisine bağlı olarak hız tahmini yapılan bölge için rüzgar gücü hesabı yapılır.
- Rüzgar çiftliği oluşturma: rüzgar türbinlerinin konumları itibariyle hem net türbin güçleri hem de rüzgar çiftliğinin net gücü hesaplanır.

Meteoroloji istasyonlarından elde edilen veriler programa girilerek bölgenin rüzgar potansiyeli, ortalama rüzgar hızı, belli yükseklikteki hızlar gibi pek çok parametre elde edilebilir. Bu sayede istenilen bölge için hem hız hem de güç bakımından rüzgar atlasları meydana getirilebilir. Bu rüzgar atlasları, kullanılması düşünülen türbin verileri yardımıyla ister türbin üretimi ister de rüzgar tarlası üretimi değerlerinin bulunmasında kullanılabilir.

Programın ana olarak işleyişi Şekil 4.1’de yer alan şemada görülebilir [25].

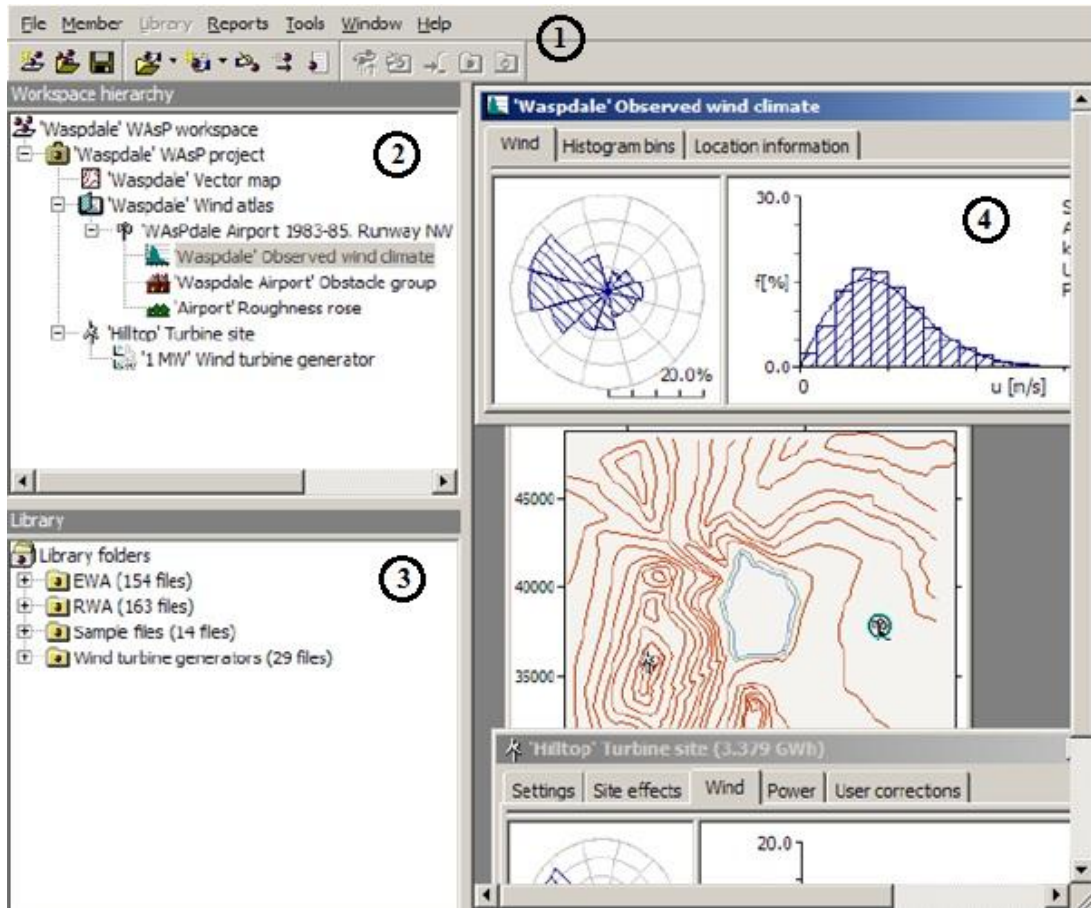
WAsP programı kompleks yapıdaki arazilerde önemli oranlarda tahmin hatası yapmaktadır. WAsP’in doğru tahminler yapabilmesi için, söz konusu saha için aşağıdaki parametrelerin WAsP performans kriterleri dâhilinde olması gerekmektedir:

- Referans saha (ölçüm noktası) ve tahmin edilen saha (türbin noktası) genel itibariyle 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.



Şekil 4.1 : WAsP programının ana işleyişi.

WAsP programının arayüzü ve programdan alınan ekran görüntüsü Şekil 4.2’te yer almaktadır [25]. Program temel olarak dört alandan oluşmaktadır. Bir numaralı kısımda, araç çubukları ve kısayollar yer almaktadır. Sol kısım iki bölmeye ayrılmış vaziyettedir. Sol üstte yer alan iki numaralı kısımda, çalışma alanı yani sisteme eklenen rüzgar dataları, rüzgar atlasları, haritalar, türbin verileri bulunmaktadır. Sol altta yer alan üç numaralı kısımda kütüphane yer almaktadır. Buradan da programın içinde bulunan rüzgar türbinlerine, generatörlere ve örnek uygulamalara ulaşılmaktadır. Sağ tarafta yer alan 4 numaralı kısımda ise, çalışma alanında bulunan öğelere ait verileri gösteren pencereler yer almaktadır.



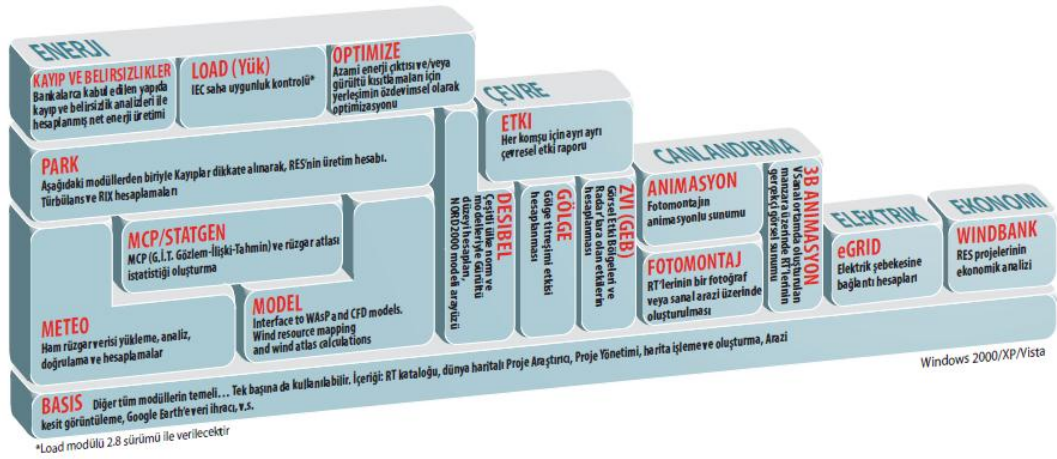
Şekil 4.2 : WAsP programı ara yüzü.

4.2 WindPRO

WindPRO, Danimarkalı rüzgar enerjisi danışmanlık firması olan EMD tarafından geliştirilmiştir. EMD, 1986 yılından beri rüzgar enerjisi alanında pek çok projede danışmanlık yapmış ve günümüzde de santral hesaplamaları için en fazla kullanılan programların başında gelen WindPRO'yu 20 yılı aşkın bir süredir geliştirmeye devam etmektedir.

WindPRO, WAsP'a benzer şekilde rüzgar data analizleri, enerji üretimi, rüzgar çiftliği hesaplamaları, şebeke analizleri, çevresel etkiler, ekonomik analizler vb işlemler için temelde beş farklı yapıdan (enerji, çevre, ekonomi, elektrik, animasyon) ve toplamda ise yaklaşık yirmi modülden oluşmaktadır [26]. Bu modüllere ait kısa açıklamaları da içeren şablon Şekil 4.3'te yer almaktadır [26].

Basis modülü, projelerin yönetilmesi, harita gösterimleri, rüzgar türbin katalogları gibi temel dokümanların bulunduğu ve diğer modüllerin çalışabilmesi için gerekli olan ana modüldür.



Şekil 4.3 : WindPRO programı modül tanıtımları [26].

Meteo modülü, ölçülen rüzgar verisinin gözden geçirilmesi ve ölçülmüş rüzgar verisi kullanılarak saha içerisinde herhangi bir yerde bulunan bir rüzgar türbininin üretiminin hesaplanması için kullanılır.

Model modülü, WAsP rüzgar modeli ile PARK üretim hesaplamaları için gerekli ara yüzü sağlar. Site data olarak adlandırılan ve içerisinde pürüzlülük, eş yükselti ve engel bilgilerini barındıran blokta ve Meteo bloğunda yüklü rüzgar dataları kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilir. Hesaplamalar tek bir noktada birden çok türbin tipi için gerçekleştirilebilir. Tek türbin hesabında basit ve düz araziler için Atlas modülü de kullanılabilir.

MCP modülü, açılımı “measure, correlate, predict” olan ve rüzgar datalarının ayıklanması ve analizi için kullanılan bir modüldür. Bu modül en yaygın olarak kullanılan dört yöntemi içermektedir: Lineer Regresyon, Matris, Weibull ölçekleme ve Rüzgar endeksi.

Park modülü, bir veya daha fazla rüzgar türbininin yıllık üretiminin hesaplanmasında kullanılır. Daha çok rüzgar santrali hesaplamaları için tercih edilir. Türbinlerin birbirlerine olan etkisi olarak ifade edilen iz etkisi, türbülans ve RIX hesaplamaları da Park modülü ile yapılır. Bu hesaplamalar rüzgar dataları, türbin üretimleri, engel, pürüzlülük bilgileri gibi pek çok veriyi de içeren kapsamlı raporlar haline dönüştürülebilmektedir.

Loss & Uncertainty modülü, Park modülü ile hesaplanan rüzgar çiftliğinin yıllık enerji üretiminin finansal açıdan değerlendirilmesi sırasında daha gerçekçi değerlere ulaşılabilmesi için bazı kayıp faktörlerini hesaba dahil etmek için kullanılır.

Bunlardan bazıları, yüksek rüzgar histerisi, rüzgar sektör yönetimi ve isteğe bağlı yapılacak kesintilerdir.

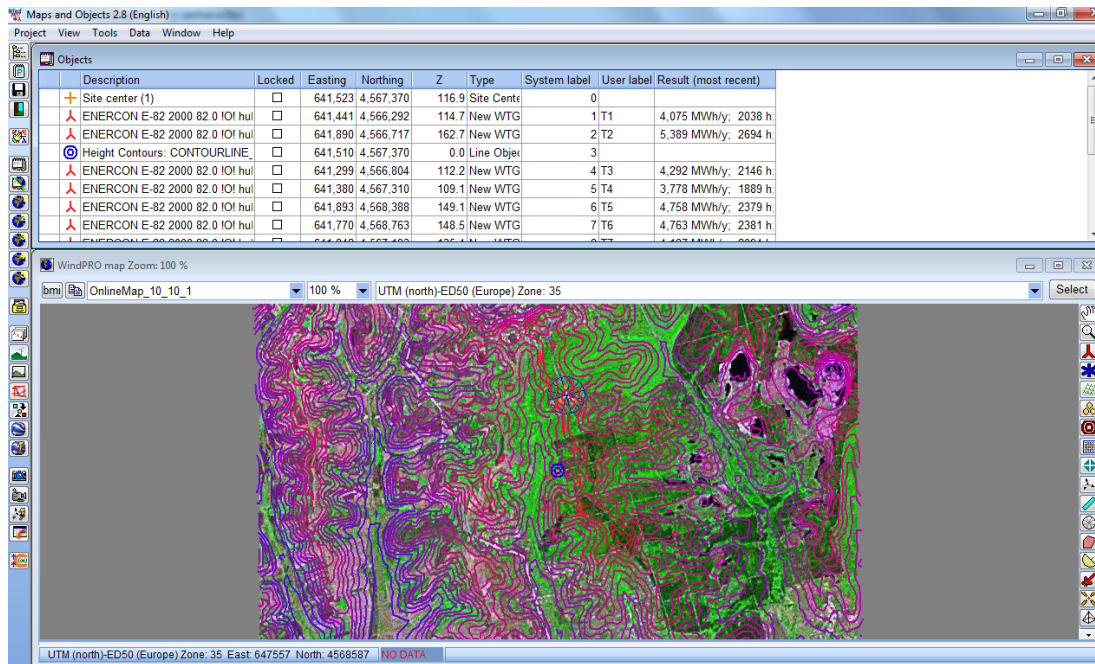
Optimize modülü, santral sahası içerisinde türbinlerin maksimum üretimi yapabileceği yerleri tespit etmek için belli koşullar dahilinde hesaplamaların gerçekleştirilmesini sağlar.

Santralde yer alacak olan türbinlerin çevre açısından gürültü, gölge etkisi ve görüntü kirliliği yaratmaması için Decibel ve Shadow gibi modüller kullanılabilir.

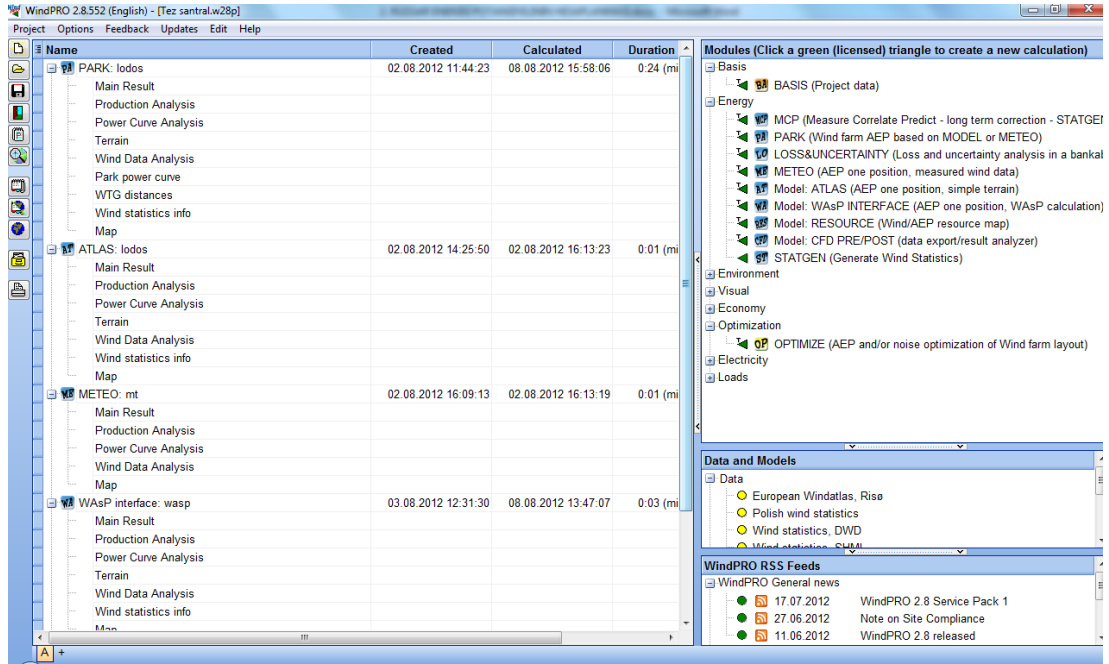
Santralin görsel animasyonu için Photomontage, Animation, 3D-Animator modülleri, şebeke planlaması için eGrid, ekonomik analiz için ise Windbank modülü kullanılabilir.

Programın ara yüzü iki ekrandan oluşmakta. Şekil 4.4'te harita ve objelerin tanımlandığı ara yüz görülmekte. Burada harita yüklemeleri ya da internet üzerinde yer alan datalardan harita indirmeleri yapılabilir. Santral sahası belirlenmesi, bölgenin eşyükselti eğrileri, engel ve pürüzlülük bilgileri, türbin ve ölçüm direği yerleri gibi bölgeye ve santrale ait bilgiler bu ekrandan girilmektedir.

Şekil 4.5'te görülen ekrandan ise ana menüler, program ayarları gibi seçeneklerin yanı sıra Park, Atlas, Meteo, Model gibi modüllerle yapılan hesaplamalar ve bu hesaplamalar sonucunda elde edilen raporlara ulaşılabilir.



Şekil 4.4 : WindPRO programı harita ve obje ara yüzü.



Şekil 4.5 : WindPRO programı modül ara yüzü.

4.3 WindFarmer

Windfarmer, GL Garrad Hassan enerji danışmanlık firması tarafından 25 yılı aşkın süredir geliştirilmekte olan bir rüzgar çiftliği tasarımı programıdır.

Windfarmer, WindPRO'ya benzer şekilde rüzgar çiftliği hesaplamalarını daha tutarlı hale getirmek için tasarlanmıştır. Bu yüzden de, enerji hesaplamalarını gerçekleştirebilmek için WAsP benzeri bir rüzgar akış programına ihtiyaç duyar. Rüzgar akış modeli vasıtasıyla türbin noktalarındaki rüzgar hızları bulunur. Rüzgar akış modelinin kullanılmasıyla her bir nokta için rüzgar hızına ve yönüne ait olasılık dağılımlarını içeren Weibull A ve k parametreleri yani ölçek ve şekil parametreleri tespit edilir. Windfarmer, Weibull A ve k parametrelerini rüzgar akış modeli ile birlikte kullanarak rüzgar enerjisi tahminini gerçekleştirir. Sahada yapılan ölçüm verileri rüzgar akış modellerinin olasılık fonksiyonları ile birlikte işlenerek Windfarmer'ın enerji tahminine ulaşılır [27].

Windfarmer, rüzgar enerjisi tahminini gerçekleştirebilmesi için aşağıdaki verilere ihtiyaç duyar:

- Santral sahasının tamamını kapsayacak şekilde türbin yüksekliğinde hesaplanmış rüzgar kaynağı haritası (WAsP wind resource grid yani WRG

dosyası) ya da türbin noktalarındaki rüzgar hızlarını içeren ayrık kaynak haritası (WAsP discrete resource format yani RSF dosyası)

- Türbin koordinatları
- Türbin güç eğrileri
- Türbinin göbek yüksekliği ve çapı.

Ayrıca hesaplamaların gerçekleştirilebilmesi için ölçüm direği koordinatlarında anemometre yüksekliğinde tek nokta için rüzgar kaynak haritası ile rüzgar hızının ve yönünün frekans dağılımını ifade eden tab formatında WAsP rüzgar atlasına da WindFarmer tarafından ihtiyaç duyulmaktadır. Bu dosyaların bulunmaması durumunda WindFarmer rüzgar dağılımını Weibull'a göre kabul edecektir.

WindFarmer da WindPRO'da olduğu gibi değişik modüllerden meydana gelmektedir. Bu modüllerden bazıları temel, görselleştirme, finans, türbülans yoğunluğu, elektrik, gölgeleme ve MCP+ (Measure – Correlate - Predict / Ölç – İlişkilendir - Tahmin Et) olarak sıralanabilir.

Temel Modül, rüzgar çiftliği enerji hesaplaması, gürültü modellemesi ve türbin yerleşimi optimizasyon fonksiyonları dahil olmak üzere rüzgar çiftliği temel yerleşim tasarımı ve optimizasyonu araçlarını içermektedir. Temel Modül içinde aynı zamanda WindFarmer Denetim Paneli, Rüzgar Türbin Stüdyosu, tüm veriler, grafik çizim birimleri, dosya işlevleri, rapor üretimi ve ara birim denetim seçenekleri bulunmaktadır.

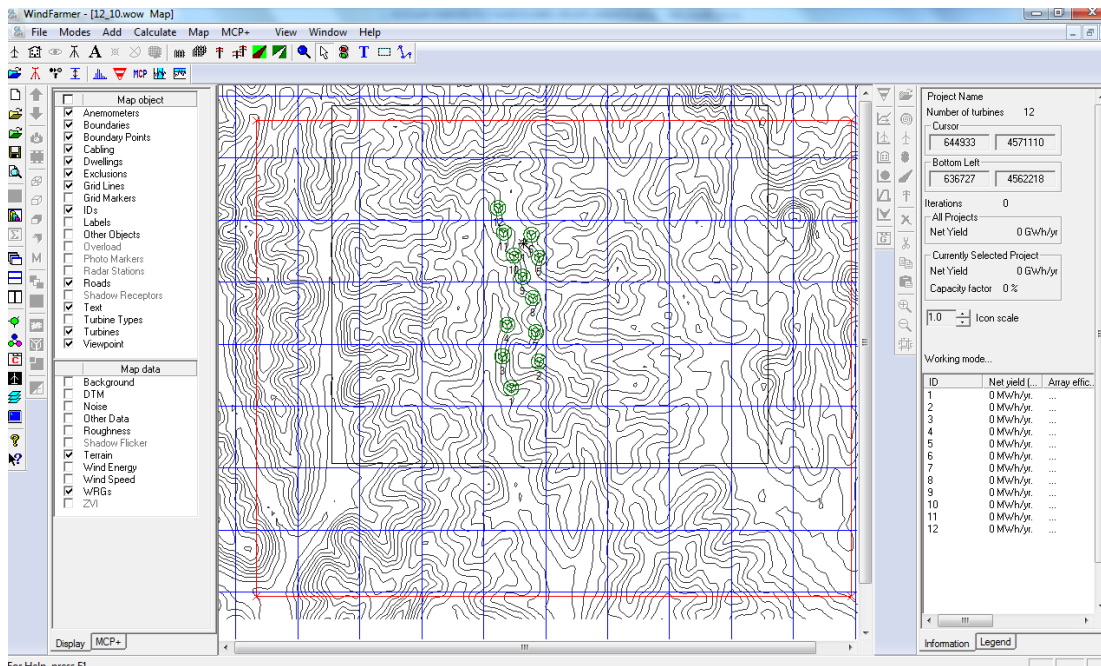
MCP+ Modülü, sahadaki rüzgar rejiminin rüzgar hızı ve yön frekans dağılımı formunda oluşturulması için veri birleştirme, temizleme, kalibrasyon ve ilişkilendirme vasıtasıyla rüzgar hızı ve yönü verilerinin işlenmemiş zaman serilerini almak için ihtiyaç duyulan araçları barındırır. MCP teknikleri sahadaki kısa süreli verilerden uzun süreli frekans dağılımının türetilmesine olanak sağlar. Çıktılar çok sinyalli grafikler, rüzgar gülleri, ilişkilendirme grafikleri, türbülans yoğunluğu sonuçları, veri listeleri ve raporları kapsar.

Görselleştirme Modülü içinde, şematik ve gerçekleştirilmiş arazi görselleştirme, görsel etki bölgesi haritaları ve rüzgar enerjisi projesi fotomontajları ve animasyonları hazırlamak için hesap yapma ve çıktı hazırlama araçları bulunmaktadır.

Finans modülünde, net enerji çıktısı, türbin sayısı, türbin tipi, uzunluklar ve kablo veya yol tipleri vb. bilgiler anında tasarlanır ve maliyeti hesaplanır. Bu sayede projenin yatırım maliyeti ve yatırıma uygun olup olmadığı hakkında yeterli bilgi sahibi olunabilir.

WindFarmer Türbülans Yoğunluk Modülü, Eddy Viskozite Engelleme Modelinde hesaplanan türbülans değerleri ve PARK modelindeki tasarım eş değer türbülans tahminleri dahil olmak üzere enerji hesabı sırasında yaratılan bireysel türbin verilerine erişimi sağlar. Bu sayede rüzgâr çiftlik yerleşimindeki her rüzgâr türbininde, türbinin gölgelemesinden kaynaklanan türbülans yoğunluğunun belirlenmesine izin verir.

Elektrik modülü, rüzgar çiftliğinin elektrik ağını tasarlamaya imkan sağlar. Başlıca özellikleri şu şekildedir; Topografik yapı ve eğimleri dikkate alarak yeraltı kablolarının ve yer üstündeki hatların uzunluklarını hesaplamak, kabloların, hatların ve trafoların yıllık elektrik kayıplarını hesaplamak, türbinler, kablolar, hatlar, güç faktörü düzeltme cihazları ve trafolar için yıllık reaktif güç üretim ve tüketimini hesaplamak, trafoların, kabloların ve hatların aşırı yüklenmesini denetlemek, belli bir noktada güç faktörünü düzeltmek için gerek duyulan kapasitör/reaktör banklarının büyüklüğünü hesaplamak. Elektrik modülü rüzgar türbin yerleşimi sabitleştirildikten sonra, elektrik altyapısının tasarımı ve hesaplamalarının yapılması için kullanılır.



Şekil 4.6 : WindFarmer programı ara yüzü.

Windfarmer programının ana ekranı Şekil 4.6'da görüldüğü üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Solda hesaplamalar ve ayarlar için program kısayolları, ortada harita ve sağda ise rüzgar çiftliği koordinat ve üretim verileri yer almaktadır. Üst kısımdan da ana menülere ulaşılabilir.

4.4 Windographer

Windographer, yenilenebilir enerji alanında çalışmalar yapan Kanadalı şirket Mistaya Engineering tarafından geliştirilmektedir.

Program genel olarak rüzgar data analizi üzerine yoğunlaşmıştır. Ham dataların kolayca yüklenebilmesi, bu datalar kullanılarak grafiksel anlamda karşılaştırmaların yapılabilmesi, dataların kontrolü ve istatistiksel olarak analizinin gerçekleştirilebilmesi programın ana özelliklerinden bazılarıdır [28].

Windographer'ın ana katmanlarının ilki data yükleme kısmıdır. Pek çok farklı formattaki datayı kolay bir şekilde programa yüklemek mümkündür. Birden fazla data aynı anda kullanılabilir ve dataların hız, yön gibi değişkenleri tanımlamaya gerek kalmadan program tarafından tanınabilir.

İkinci kısım, grafikler yardımıyla dataların analizidir. Windographer grafiksel olarak geniş bir yelpazeye sahiptir. Rüzgar hızı, frekans dağılımı, günlük rüzgar profilleri, alfa katsayısı, basınç, hava yoğunluğu gibi pek çok faktörü grafik olarak ifade eder ve karşılaştırma yapılan durumlar için kolaylık sağlar.

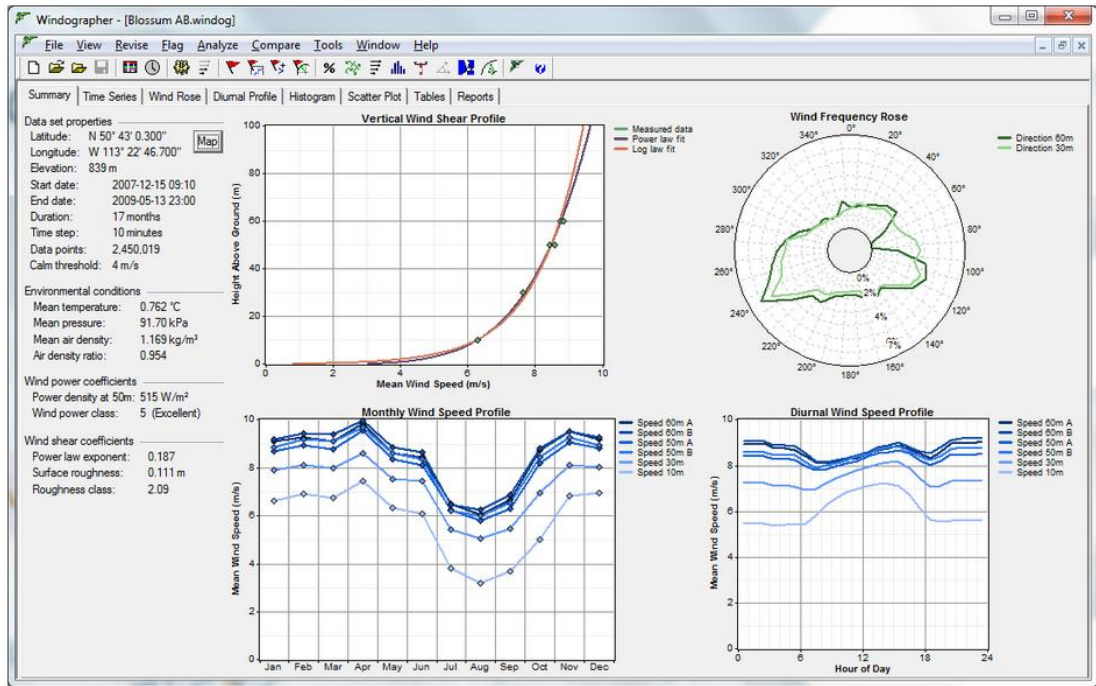
Üçüncü kısımda yer alan data analizinde ise ham datanın eksik ve kötü kısımları temizlenebilir, boşluklar doldurulabilir, farklı yükseklikler için alfa katsayısı kullanılarak dikey ekstrapolasyon işlemleri gerçekleştirilebilir.

Dördüncü kısım olan analiz kısmında temizlenen datalar türbin güç eğrileri kullanılarak enerji üretimleri analiz edilir. Buna ilave olarak farklı data setlerinin birbiriyle karşılaştırılması, alfa katsayısı ve türbülans yoğunluğu gibi faktörlerin zamana göre grafiksel olarak karşılaştırılması, kısa süreli rüzgar hızı analizleri ve uzun süreli rüzgar hızı tahmini gibi işlemler de gerçekleştirilebilir.

Son kısımda ise analizi yapılan işlemler rapor halinde alınabilir. Bu veriler pdf formatında ya da tek tek grafik olarak istenildiği şekilde kullanılabilir. Ayrıca rüzgar

akış modeli programlarına uygun şekilde analiz edilen datalar kayıt edilerek bu programlarda kullanılabilir.

Programın ara yüzü Şekil 4.7’de de görüldüğü üzere hem kolay ve anlaşılır hem de grafiklerle zenginleştirilmiştir [28]. Sol tarafta datalar, çevresel koşullar, rüzgar hızı, rüzgar gücü, alfa katsayısı vb. bilgiler yer almakta, sağ tarafta ise analiz edilen alfa katsayısına, dikey ekstrapolasyon yapılan rüzgar hızlarına, günlük rüzgar profillerine ve rüzgar frekans dağılımına ait grafikler ve şekiller yer almaktadır. Üst kısımda ana menüler ve program ayarlarına kolayca ulaşmak için simgeler bulunmaktadır.



Şekil 4.7 : Windographer ara yüzü.

4.5 Homer

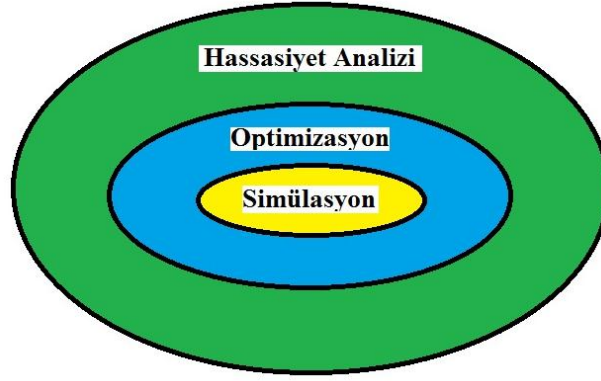
Homer, 1993 yılında NREL (National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilmeye başlanmıştır.

Homer, rüzgar, güneş, hidroelektrik, hidrojen, yakıt hücresi, akü, generatör gibi değişik uygulamaların bir arada kullanılabildiği, şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız olarak sistemlerin optimize edildiği bir mikro ölçekli simülasyon programıdır [29].

Homer’de sisteme istatistiksel veriler girilerek hesaplama yapılır. Örneğin rüzgar enerjisi hesaplamaları için, on dakikalık ya da bir saatlik olarak alınan ölçümler

kullanılır ve enerji üretimi bu veriler ile türbinin güç eğrisi yardımıyla hesaplanır. Akış alan modellemesi dediğimiz rüzgarın çevre koşullarından etkilenmesi gibi bir modelleme olmadığından sadece verilere dayalı olarak bir hesaplama yapılması söz konusudur. Ancak gerçek anlamda türbinin konumu ve çevresindeki şartlar da rüzgar üretimine etki eder.

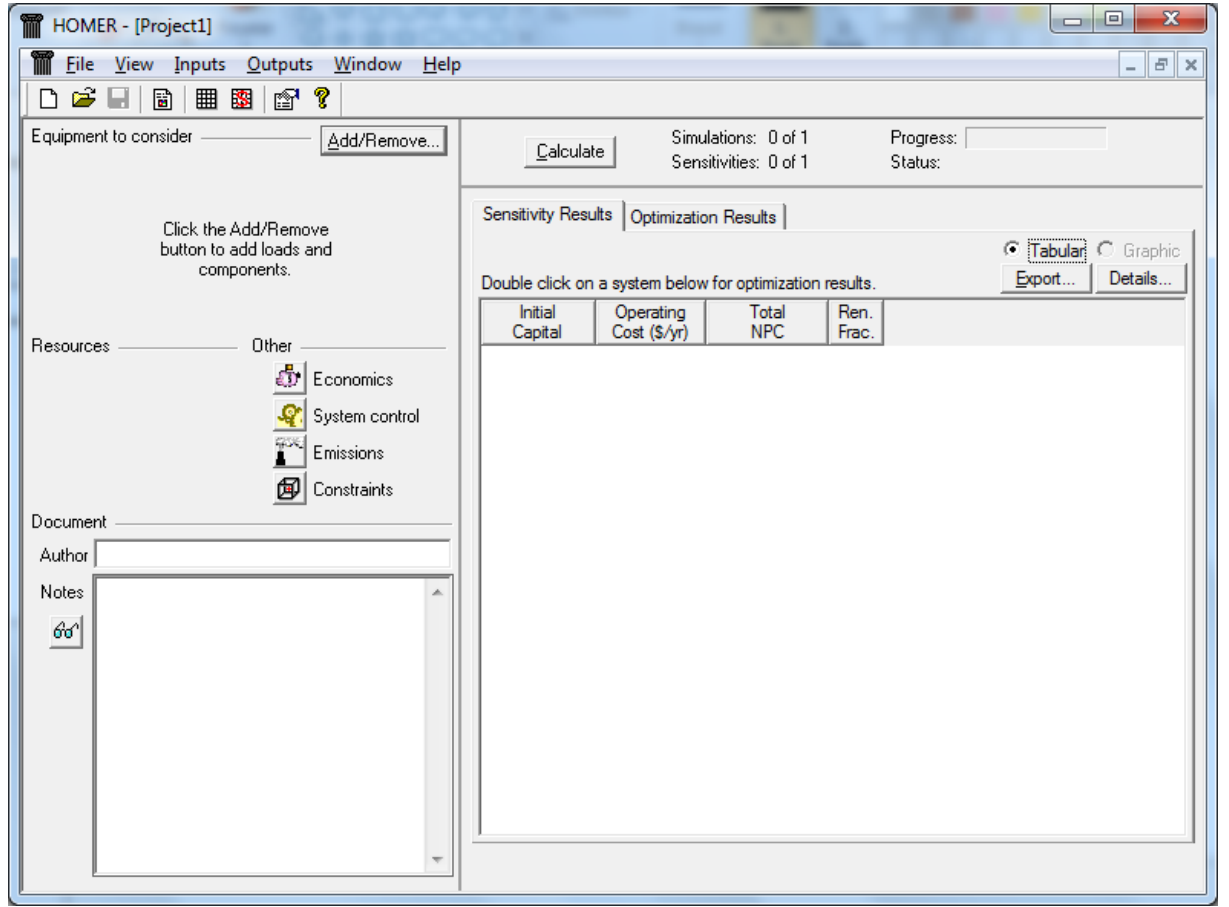
Program ekonomik açıdan sistemlerin birbirleri ile karşılaştırılmasını kolaylaştırdığı için tercih edilir. Sistemin girişinin ya da bileşenlerinin değişmesi durumunda bunun çıkışa yani üretime nasıl etki ettiğini, ekonomik anlamda ne kadar bir farklılık yarattığını göstermesi, Homer programının en büyük avantajlarından biridir. Programın ana başlıkları Şekil 4.8’de de görüldüğü üzere Simülasyon, Optimizasyon ve Hassasiyet Analizinden oluşmaktadır [29].



Şekil 4.8 : Homer programının ana başlıkları.

- Simülasyon: Sistemde bulunan bütün elemanların ürettiği ya da tükettiği enerji değerleri, sistemin ekonomik değeri, sistemin ömrü, yatırım maliyeti, bakım, işletim değerleri gibi pek çok parametre ile ilgili bilgi alınması sağlanabilir. Yapılan hesaplamalar yıllık bazda olup 8760 saat üzerinden gerçekleştirilir.
- Optimizasyon: Mümkün olan bütün olasılıklar hesaplandıktan sonra, kurulan sistemin net ekonomik değerinin en iyi olduğu sistem seçilebilir. Ayrıca istendiği takdirde sistemler üzerinde optimizasyon da yapılabilir.
- Hassasiyet Analizi: Belirlenen aralıktaki giriş değerleri için sistemin tekrarlanması sağlanır ve giriş değerlerinin değiştiği durumda sistemin verdiği cevabın nasıl değiştiği incelenebilir. Buna göre hangi değerde daha iyi sonuç alınabileceği görülür.

Programa ait ekran görüntüsüne Şekil 4.9’da yer verilmiştir.



Şekil 4.9 : Homer programı ara yüzü.

Program genel olarak üç alandan oluşmaktadır. Üst çubukta menü, araç çubukları ve kısayol tuşları yer almaktadır. Sol tarafta sistemin simülasyonunun oluşturulacağı kısım yer almaktadır. Ekranın sağ tarafında ise simülasyon sonuçları ve duyarlılık testleri için yapılacak olan karşılaştırmalar bölmesi bulunmaktadır.

Homer farklı ünitelerden oluşacak hibrit sistemlerin tasarlanması ve mikro ölçekte karşılaştırılması için uygun bir simülasyon programıdır. Rüzgar, güneş, hidroelektrik gibi yenilenebilir enerjiler üzerine yapılacak olan sistemlerin hem teknik hem de ekonomik anlamda karşılaştırmaları, farklı kaynak girişleri için sonuçların nasıl değişeceği ve bu sonuçların birbirlerine olan üstünlükleri hem sayısal hem de grafiksel olarak ele alınabilmektedir. Mikro ölçekli projelerin tasarlanmasında sağladığı kullanım kolaylığı ile Homer programı tercih edilmektedir.

4.6 RETScreen

RETScreen, uluslar arası temiz enerji proje analizlerinin ön fizibilite ve fizibilite çalışmalarında kullanılan programlardan biridir. Enerji üretimi, ekonomik ömür ve maliyetler, sera gazı emisyonları gibi pek çok alanda kullanımı mümkündür. Tercih edilmesinin ana nedenleri, kullanımının kolay ve arayüzünün basit olmasıdır. Belli bir yüzeye gelen güneş ışınımının hesaplanması, pasif solar ısıtma sistemi için hesaplamalar, bir yatırımın risk analizleri gibi pek çok konudaki uygulamanın gerçekleştirilebileceği kompleks bir programdır [30].

RETScreen programı temel olarak ana ve önerilen durum olmak üzeri iki temel kısımdan oluşmaktadır. Ana durum diye ifade edilen kısımda konvansiyonel sistemler, önerilen durumda ise temiz teknolojiler bulunmaktadır. Ekonomik yönden sistemlerin birbirlerine karşı üstünlüklerini ifade etmek için, ürettikleri enerjinin sabit olduğu kabul edilerek karşılaştırma yapılır. Bir sistemin ne kadar sürede yatırım maliyetini karşılayabileceği de RETScreen programının kullanım alanlarından biridir. Konvansiyonel ve temiz enerjiler karşılaştırmasında sera gazı emisyonlarının hesaplanması ve hangi sistemin ne kadar sera gazı ürettiği gibi durumlar da programın inceleme alanları arasında yer almaktadır.

Program Excel tabanlı olup, programın bütün sistemler için izlediği yol yani model akış diyagramı Şekil 4.10'da yer almaktadır [30].



Şekil 4.10 : RETScreen programı model akış diyagramı.

Birinci kısım olan enerji modelinde kullanıcı tasarlamak istediği sistemin yerini, ana durum için kullanılacak sistem tipini, önerilen durum için kullanılması düşünülen teknolojiyi, yükleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarını tanımlayabilmektedir. Bu parametrelere bağlı olarak program üretilecek enerji miktarını hesaplar.

İkinci kısımda maliyet analizi yer alır. Kullanıcıdan önerilen durum için gerekli olan yatırım maliyeti, yıllık maliyetler ve periyodik maliyetleri girmesi istenir. Programla detaylı bir fizibilite ya da daha az detaya sahip olan ön fizibilite çalışması yapılabilir.

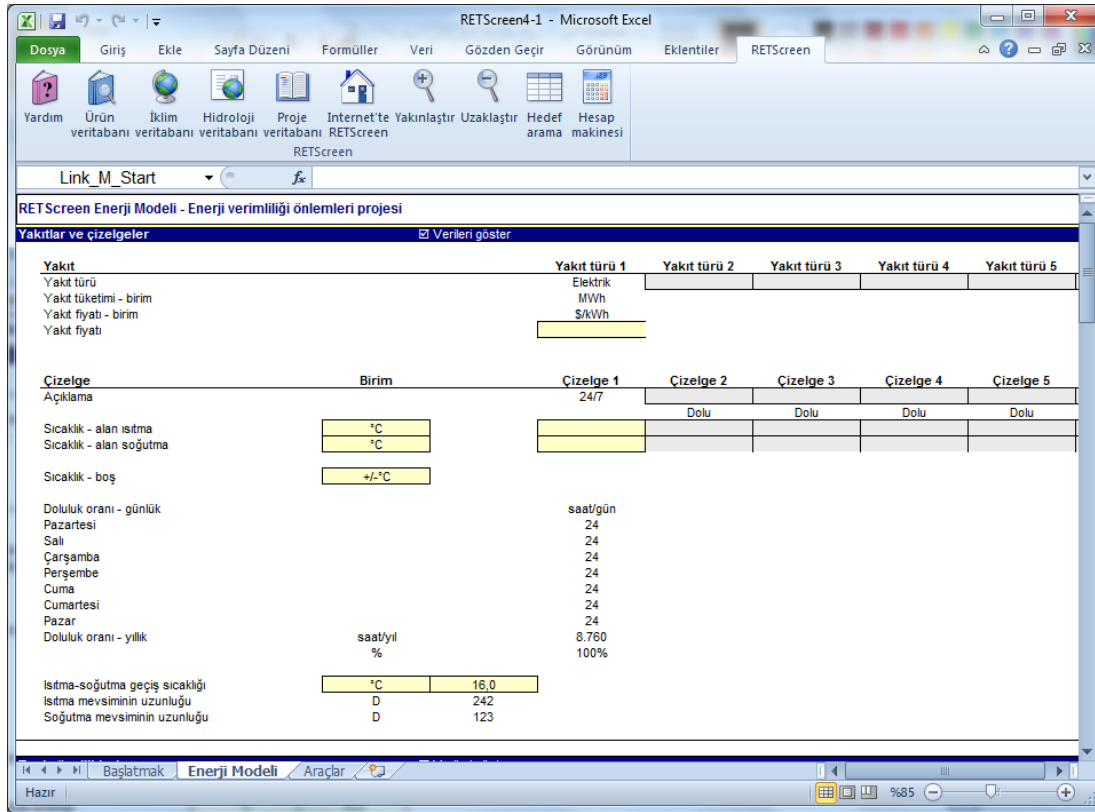
Opsiyonel olan üçüncü kısımda sera gazı emisyonlarının hesaplanması yapılır. Önerilen durumdaki temiz enerji teknolojisinin kullanılması durumunda ne kadarlık bir sera gazı emisyonu değeri azaltımı olacağı görülür. Sistemin Temiz Kalkınma Mekanizması diye adlandırılan CDM (Clean Development Mechanism) olarak kabul edilip edilmeyeceği de bu aşamada tespit edilebilir.

Dördüncü kısımda finansal boyut ele alınır. Krediler, enflasyon oranı, sera gazı emisyonu azaltım kredisi, teşvikler, indirim oranları, vergiler ve borçlanmalar gibi veriler bu kısma girilir. Program da bu veriler ışığında kümülatif para akışı ve net değer gibi finansal hesaplamaları ve sistemin ekonomik yönden yapılabilirliğini gözler önüne serer.

Opsiyonel olan beşinci kısımda sistemin duyarlılığı ve risk analizi gerçekleştirilir. Sistemde yer alan bazı parametrelerin değişmesi sonucu sistemin bunlardan nasıl etkileneceği bu kısımda görülebilir.

Programda ana olarak bulunan temiz teknoloji sistemleri şunlardır; rüzgar enerjisi, küçük hidroelektrik projeler, fotovoltaiik sistemler, biyokütle ısınma projeleri, solar ısıtma sistemleri, pasif solar ısıtma sistemleri, jeotermal sistemler ve kombine çevrim sistemler.

Programın ana ekran görüntüsü Şekil 4.11’de yer almaktadır. Program Microsoft Excel tabanlı bir programdır. Bu yüzden sade bir arayüze sahiptir. Üç ana kısımdan oluşur. Bunlar ekranın sol alt kısmında görülebileceği gibi Başlangıç, Enerji Modeli ve Araçlar’dır. Başlangıç kısmında projenin adı, tipi, iklim verileri gibi genel bilgilerin girilmesi istenmektedir. Enerji modeli kısmında, enerji hesapları, finansal analiz, sera gazı emisyonu hesapları, ana ve önerilen sistemlerin karşılaştırılması gibi temel kısımlar bulunur. Araçlar kısmında ise sistemi etkileyebilecek ve sonradan ilave edilmesi düşünülen opsiyonlar yer almaktadır.



Şekil 4.11 : RETScreen programı ara yüzü.

4.7 WindSim

WindSim programı, 2003 yılında Arne Gravdahl tarafından Norveç Rüzgar Atlası projesi çerçevesinde geliştirilmiş bir rüzgar çiftliği dizayn programıdır. Kompleks alanlarda karşılaşılan zorlukların aşılabilmesi için CFD (Computational Fluid Dynamics) yani Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde non-lineer Navier – Stokes denklemleri çözülerek kompleks alanların daha tutarlı olarak modellenmesi sağlanmıştır. HAD sayesinde türbülans, değişken hava yoğunluğu, topografya ve yüzey şekillerinin rüzgar hızına olan etkileri daha tutarlı bir şekilde modellenmektedir.

WindSim'in temeli üç boyutlu Navier Stokes denklemlerinin çözümüne dayanmaktadır. Kütle, momentum ve enerji için non-lineer denklemlerin çözülmesi ile hem kompleks sahalar hem de kompleks iklim şartlarına sahip yerler için uygun çözümler üretilmektedir.

Program temel olarak altı modülden oluşmaktadır: Saha, Rüzgar Verisi, Objeler, Sonuçlar, Rüzgar Haritaları ve Enerji. Bu modüllere ait görseller Şekil 4.12'de yer almaktadır [31].



Şekil 4.12 : WindSim programına ait modüller.

Saha modülünde yükseklik ve pürüzlülük değerlerine bağlı olarak rüzgar santrali kurulması düşünülen bölgenin üç boyutlu model haritası çıkartılır. Ayrıca ormanlık alanlar ve rüzgar akışını engelleyecek bina gibi yapılar da bu kısımda modellenir.

Rüzgar Verisi modülü, bölge koşulları ve diğer koşulların bölgesel rüzgar akışına etkilerinin incelendiği kısımdır. Bu kısımda bölgeye ait rüzgar atlas datası oluşturulur.

Objeler modülünde sahada yer alacak olan türbinlerin ve ölçüm istasyonlarının yerleri üç boyutlu görsel özelliklerle zenginleştirilmiş olarak ve sahayı farklı açılardan inceleme olanağı sağlayarak tanımlanır.

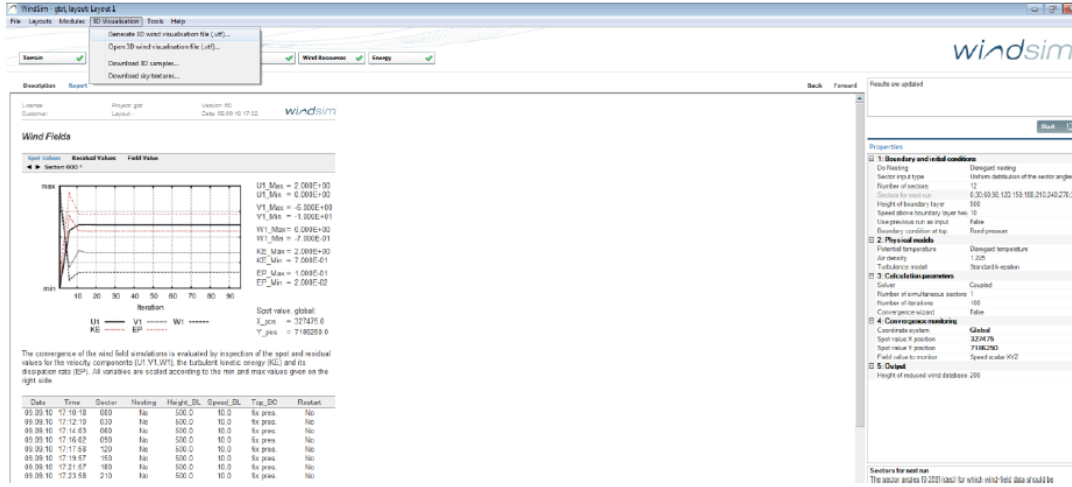
Sonuçlar modülü rüzgar hızı, pürüzlülük katsayısı, türbülans gibi değişkenlerin hesaplandığı kısımdır.

Rüzgar haritaları modülünde enerji optimizasyonu ve rüzgar datalarının analizleri yapılır.

Son kısım olan Enerji modülü ise rüzgar santralinde yer alan her türbin için yıllık enerji üretimlerinin, türbinlerin iz etkilerinin ve alternatif türbin yerleşimlerinin yer aldığı kısımdır.

Altı ana modüle ek olarak dört adet geçiş modülü de bulunmaktadır. Santral Optimizasyonu modülü, enerji üretimini arttırıp, kayıpları azaltarak saha içerisinde elde edilebilecek optimum türbin sayısı ve kurulu güç için hesaplamaların yapıldığı kısımdır. Bilgisayar İşlemci Ayarlama modülü, HAD hesaplamaları için birden fazla simülasyon yapıldığı ya da hesaplamaların bölümlere ayrılmasının planlandığı durumlarda kullanılır. Data Düzenleme modülü, LIDAR sistemli ölçüm direklerinden veri alımını kolaylaştırmak amacıyla tasarlanmıştır. Tahmin modülü ise nümerik hava tahmin modellerinden alınan veriler kullanılarak istenilen zaman

aralığında santral sahası için türbin bazında üretilecek enerji ve iz etkilerini yapay sinir ağları kullanarak hesaplar.



Şekil 4.13 : WindSim programı ara yüzü.

Programın ana görüntüsü Şekil 4.13'te yer almaktadır [31]. Program sade bir ara yüze sahiptir. Üstte ana menüler bulunmaktadır. Onların altında ise yukarıda açıklanan altı modül yer almaktadır. Gerekli veriler girildikten sonra her modülün altında yer alan rapor kısımlarından sonuçlara ulaşılmaktadır.

5. BİR ÖLÇÜM DİREĞİNDEN ALINAN VERİLERİN BAŞKA BİR ÖLÇÜM DİREĞİNE ÖTELENMESİYLE YAPILAN RÜZGAR HIZI VE GÜÇ YOĞUNLUĞU HESABI

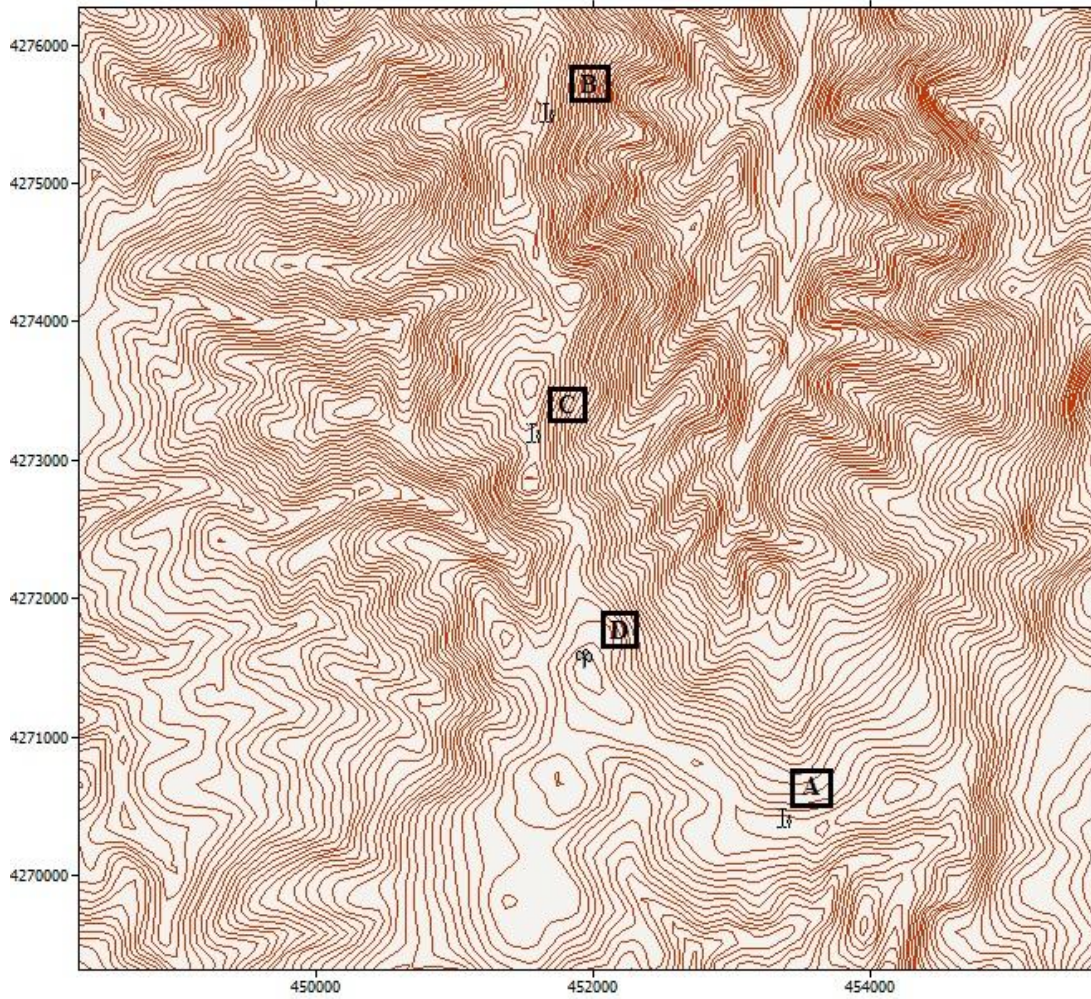
Rüzgar enerjisi projelerinde rüzgar hızı hesaplamaları, ölçümler neticesinde elde edilen verilerin akış alan modellemeli programlar vasıtasıyla türbinlerin konulacağı yerlere ekstrapolasyon yöntemiyle ötelenmesi ile yapılır. Bu sayede yapılması planlanan projeden yıllık ne kadar enerji üretileceği ve projeden ne kadarlık bir verim alınabileceği görülerek yatırım kararı verilir. Bu işlemler sırasında kullanılan programlardan hesaplamaları gerçeğe yakın olarak yapması beklenmektedir. Bu kısımda yapılan çalışma ile aynı bölgede dört farklı noktada yer alan ölçüm direklerinden alınan dataların WASP, WindPRO ve WindFarmer programları vasıtası ile birbirlerini ekstrapolasyon yöntemi kullanarak tahmin etmesi sağlanmıştır. Programların farklı konumdaki ve farklı yükseklikteki datalar kullanılarak belli bir tutarlılık içerisinde hareket edip etmediği araştırılmıştır.

Bu hesaplamalar için dört farklı noktada yer alan ölçüm verilerine ulaşılmıştır. Bu noktalar A, B, C, D diye adlandırılmış ve her bir noktada yer alan anemometre değerleri örnek olarak A noktasında 30 metrede yer alıyorsa “A_30” şeklinde ifade edilmiştir. 4 noktada toplamda 7 anemometreden alınan bir yıllık veriler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Ölçüm noktalarının deniz seviyesinden yükseklikleri A noktası için 510 m., B noktası için 512 m., C noktası için 520 m. ve D noktası için 510 m.’dir. Ölçüm noktaları arası kuş uçuşu mesafe ise Çizelge 5.1’de yer almaktadır.

Çizelge 5.1 : Ölçüm noktaları arası kuş uçuşu mesafe.

	A – B arası	A – C arası	A – D arası	B – C arası	B – D arası	C – D arası
Mesafe (m)	5375	3303	1872	2310	3966	1670



Şekil 5.1 : Dört ölçüm direğinin harita üzerindeki konumu.

5.1 WAsP Programı Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar

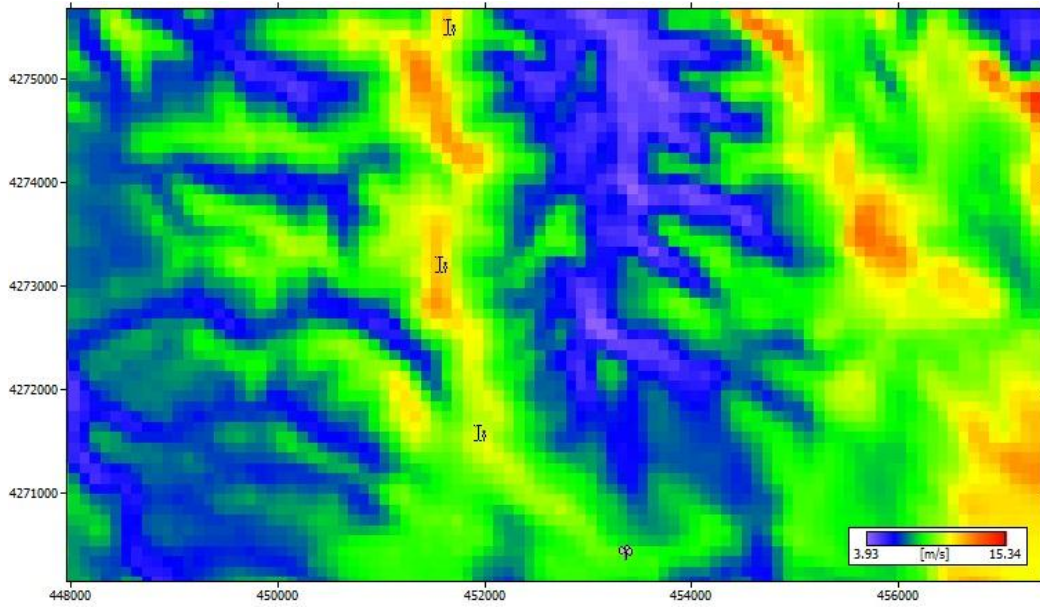
WAsP programında yapılan hesaplamalar neticesinde rüzgar hızlarına göre elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2’de yer almaktadır. Çizelgede yer alan ilk sütundaki veriler hesaplama yapılan ölçüm noktalarını, ilk satırda yer alanlar ise referans alınan ölçüm noktasını göstermektedir. Kalın olarak yazılan değerler ölçüm direklerinin gerçek değerlerini ifade etmektedir.

Çizelge 5.2’den görüldüğü üzere hesaplamalarda A bölgesi referans alındığında tüm bölgelerde rüzgar hızları gerçek değerlerin üzerinde çıkmıştır. B ve C bölgesinin hızları genelde daha düşük çıkarken, D bölgesinde ise bazı yerlerde düşük bazı yerlerde yüksek hızlar çıktığı görülmektedir. Özellikle A bölgesi referans alındığında rüzgar hızları gerçek değerlerden 1 – 2 m/s arası yüksek çıkarken diğer bölgelerde bu farkların daha az ve nispeten daha uygun olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.2 : WAsP programından alınan rüzgar hızları.

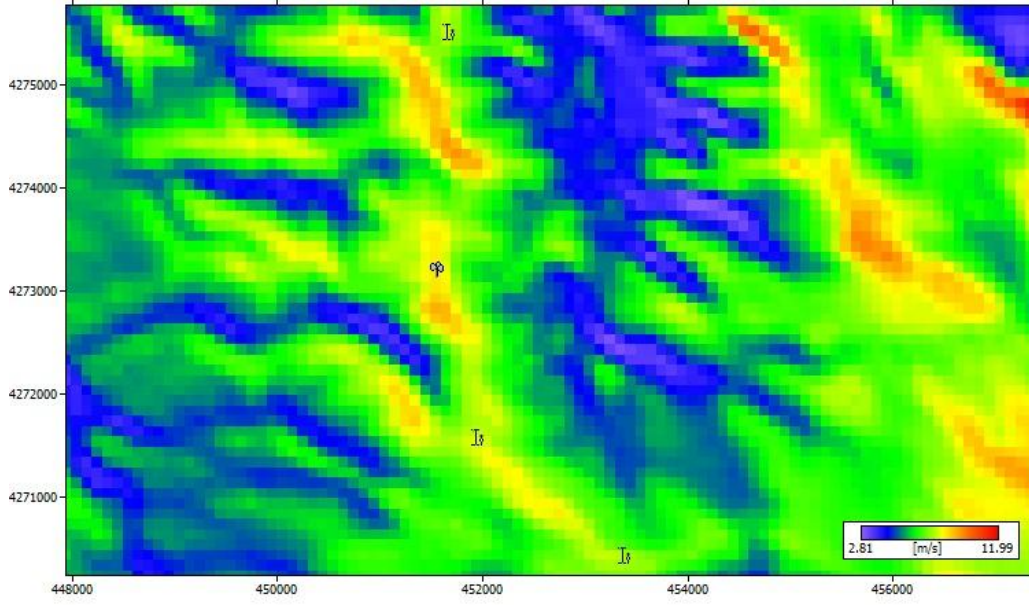
RÖD	Referans Alınan Bölgeler - Rüzgar Hızı						
	A_30	B_52	C_30	C_50	D_10	D_30	D_58
A_30	8.93	8.68	7.61	7.22	11.57	10.76	10.06
B_52	11.47	8.39	8.16	7.96	9.59	8.95	8.35
C_30	11.62	7.43	8.5	8.35	7.84	7.29	6.8
C_50	11.84	7.99	8.88	8.66	8.65	8.06	7.54
D_10	9.52	6.99	7.2	6.96	8.26	7.68	7.15
D_30	10.4	7.93	8.04	7.77	9.43	8.75	8.19
D_58	11.02	8.62	8.68	8.4	10.22	9.54	8.91

Anemometrelerden alınan ölçümlerin rüzgar haritaları üzerinde karşılaştırılmasını görmek açısından A, C ve D noktalarında 30 metreden alınan ölçümler kullanılarak hesaplanan 30 metredeki rüzgar haritaları Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te yer almaktadır.

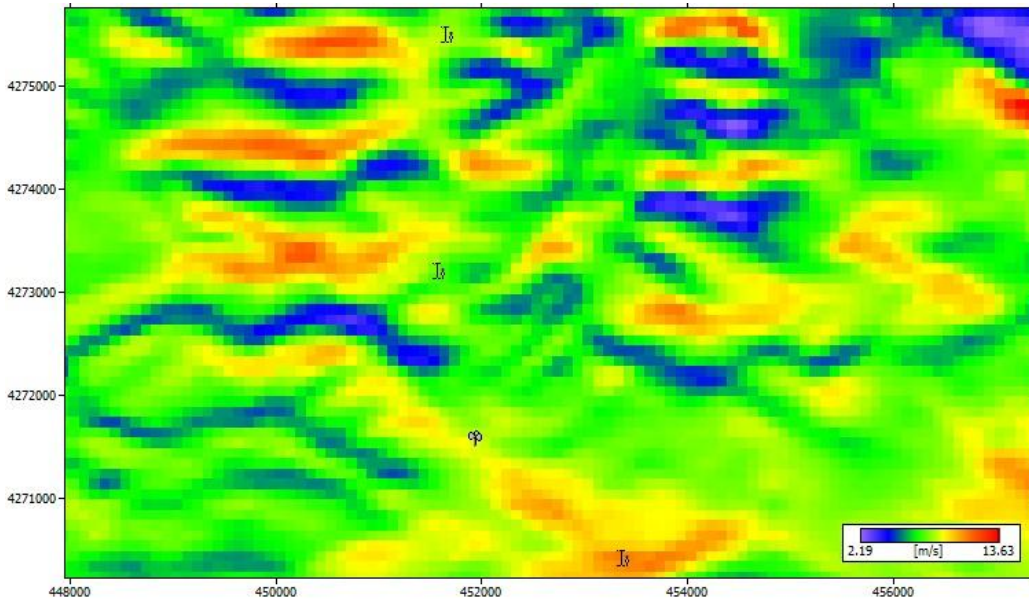


Şekil 5.2 : A noktasında yer alan anemometreden 30 metrede alınan ölçümlerden elde edilen 30 metre yüksekliğindeki rüzgar haritası.

A ve C noktası için hazırlanan rüzgar haritaları birbirine benzer olmasına rağmen hız skalası A için 3.93 ile 15.34 arasında değişirken, C'de ise 2.81 ile 11.99 arasında değişmektedir. D noktasından elde edilen harita ise diğer iki noktaya göre farklılıklar göstermektedir.



Şekil 5.3 : C noktasında yer alan anemometreden 30 metrede alınan ölçümlerden elde edilen 30 metre yüksekliğindeki rüzgar haritası.



Şekil 5.4 : D noktasında yer alan anemometreden 30 metrede alınan ölçümlerden elde edilen 30 metre yüksekliğindeki rüzgar haritası.

Güç yoğunlukları açısından yapılan hesaplamalar Çizelge 5.3'te yer almaktadır.

Çizelge 5.3 : WAsP programından alınan güç yoğunlukları.

RÖD	Referans Alınan Bölgeler - Güç Yoğunluğu (W/m2)						
	A_30	B_52	C_30	C_50	D_10	D_30	D_58
A_30	863	993	616	554	1742	1497	1325
B_52	2567	740	618	609	991	853	738
C_30	2973	622	827	833	544	467	410
C_50	2871	692	863	842	703	604	529
D_10	1481	531	531	515	667	578	513
D_30	1749	697	668	638	943	807	715
D_58	1910	819	774	736	1141	981	850

5.2 WindPRO Programı Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar

WindPRO programında yapılan hesaplamalar neticesinde rüzgar hızlarına göre elde edilen sonuçlar Çizelge 5.4’te yer almaktadır.

Çizelge 5.4 : WindPRO programından alınan rüzgar hızları.

RÖD	Referans Alınan Bölgeler - Rüzgar Hızı						
	A_30	B_52	C_30	C_50	D_10	D_30	D_58
A_30	8.93	9.3	7.18	7.19	9.9	10	9.9
B_52	10.9	8.4	7.4	7.6	7.6	7.7	7.6
C_30	11.9	8.3	8.51	8.8	7.1	7.2	7.1
C_50	11.7	8.6	8.5	8.66	7.6	7.6	7.8
D_10	10.6	8.7	7.8	7.9	8.28	8.4	8.3
D_30	10.7	9	8	8.1	8.7	8.75	8.7
D_58	10.8	9.2	8.1	8.2	8.9	9	8.92

A bölgesi için sonuçlar gerçek değer in üzerinde çıkarken, diğer bölgelerde değişken sonuçlar elde edilmiştir. Genel olarak gerçek değerlere göre 1 – 1.5 m/s civarında yakın değerler elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 5.5 : WindPRO programından alınan güç yoğunlukları.

RÖD	Referans Alınan Bölgeler - Güç Yoğunluğu (W/m2)						
	A_30	B_52	C_30	C_50	D_10	D_30	D_58
A_30	872	911	476	472	980	1028	1009
B_52	1138	743	464	501	472	510	500
C_30	1237	710	839	778	388	423	416
C_50	1245	737	702	852	453	493	483
D_10	1132	779	579	604	669	673	659
D_30	1166	829	595	619	686	808	724
D_58	1182	861	610	633	737	789	850

Çizelge 5.5'te WindPRO'dan alınan güç yoğunlukları değerleri görülmektedir.

5.3 WindFarmer Programı Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar

WindFarmer programında yapılan hesaplamalar neticesinde rüzgar hızlarına göre elde edilen sonuçlar Çizelge 5.6'da yer almaktadır.

Çizelge 5.6 : WindFarmer programından alınan rüzgar hızları.

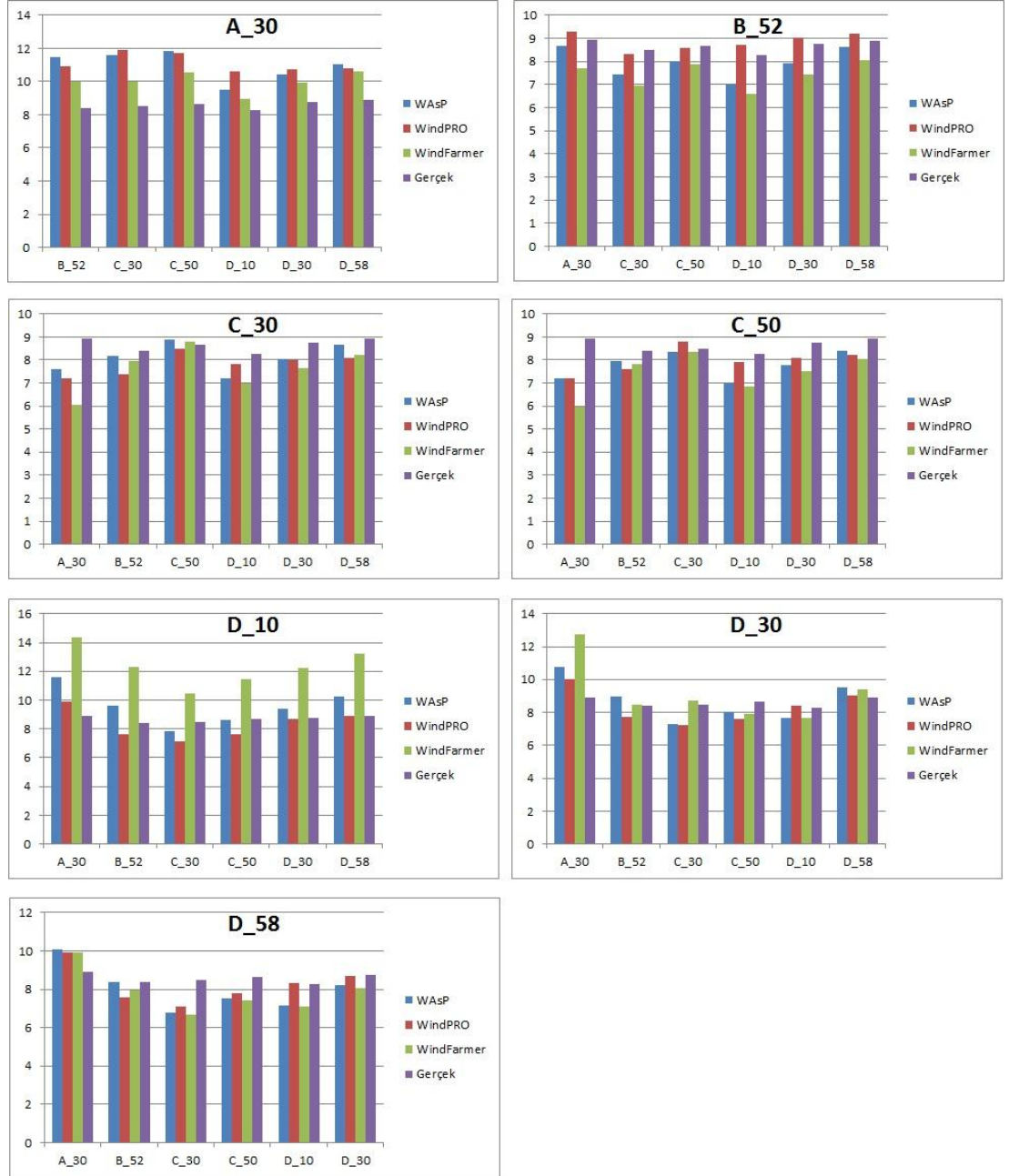
RÖD	Referans Alınan Bölgeler - Rüzgar Hızı						
	A_30	B_52	C_30	C_50	D_10	D_30	D_58
A_30	8.93	7.7	6.03	5.97	14.34	12.74	9.9
B_52	10.01	8.39	7.94	7.84	12.29	8.49	7.93
C_30	10.02	6.93	8.5	8.36	10.44	8.69	6.69
C_50	10.55	7.89	8.79	8.66	11.48	7.92	7.44
D_10	8.96	6.58	6.98	6.84	8.26	7.64	7.08
D_30	9.91	7.42	7.66	7.52	12.25	8.75	8.06
D_58	10.59	8.07	8.2	8.06	13.25	9.41	8.91

WindFarmer'dan alınan sonuçların daha tutarsız olduğu görülmektedir. A bölgesi için sonuçlar gerçek değerlerin üzerinde fakat nispeten yakın çıkarken, diğer bölgelerde değişken sonuçlar elde edilmiştir. Genel olarak gerçek değerlere göre 1 – 3 m/s civarında yakın değerler elde edildiği görülmektedir. WindFarmer güç yoğunluğu değeri vermediğinden diğer programlar için yer alan güç yoğunlukları tablosu burada bulunmamaktadır.

5.4 Sonuçların Değerlendirilmesi

Her üç programla da yapılan işlemler neticesinde programların bir noktada yer alan ölçüm verilerini kullanarak başka bir nokta için yapmış olduğu hesaplamaların değişkenlik gösterdiği ve belli bir tutarlılık göstermediği çizelgelerden görülmektedir. Şekil 5.5'te üç programdan alınan rüzgar hızı verileri gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır. Akış alan modellemesi yöntemini kullanan üç program da %10 ile %15 arası toleransla ve bazı noktalarda daha fazla sapma yaşayarak hesaplama yapmışlardır. Sonuçlar hakkında genel bir kaniya varmak oldukça zordur. Bir nokta için tutarlı sonuçlar veren program başka bir noktada oldukça tutarsız sonuçlar verebilmektedir. Örnek olarak D noktası için tutarlı sonuçlar veren WindPRO A noktasında gerçek değerlerden daha yüksek ve C noktasında ise gerçek değerlerden daha düşük çıkmıştır. Aynı durum diğer programlar için de geçerlidir.

Hesaplama yapılan bölgenin inişli çıkışlı ve yükseltisinin fazla olması da hesaplamalarda yakın değerler çıkmasına engel olmuştur.



Şekil 5.5 : Dört ölçüm direğinden yedi anemometreden alınan veriler kullanılarak diğer noktalardaki rüzgar hızlarının karşılaştırılması (m/s).

6. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL HESAPLAMA PROGRAMLARINDAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Rüzgar enerjisi projelerinin teknik ve ekonomik anlamda uygunluğunun belirlenebilmesi için proje sahasında yapılan ölçümlerin ve bu ölçümlerin değerlendirilmesi ile oluşturulan mikro konuşlandırma (micrositing) çalışmalarının doğru bir şekilde yapılması gerekir. 02.11.2013 tarihinde Resmi Gazete’de yayınlanan “Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği”nde rüzgar ölçümlerinin ne şekilde yapılacağına dair gerekli bilgiler yer almaktadır[32]. Yapılacak ölçümlerin son üç yıl içinde elde edilmiş ve en az bir yıl süreli olması gerekmektedir. Bu yönetmeliğe göre önlisans başvurusu yapılacak olan saha içinde olmak kaydıyla kurulacak rüzgar ölçüm direğinin yüksekliği minimum 60 metre ve anemometre sayısı ise bir tanesi minimum 30 metrede diğeri de direğin en üst seviyesinde olmak üzere en az iki tane olmalıdır. Ayrıca alınan ölçüm verilerinin en fazla %20’lik kısmının eksik ya da hatalı olması kabul edilebilir. Eksik olan kısımlar matematiksel yöntemlerle tamamlanmalıdır.

Mikro konuşlandırma çalışmalarının gerçeğe yakın sonuçlar vermesi için ölçümlerin türbin göbek yüksekliğinde ya da göbek yüksekliğine yakın mesafelerde yapılması gerekmektedir. Ayrıca ölçüm süresi minimum 1 yıl olarak kabul edilse de en az 2 - 3 yıllık olması, bölgenin rüzgar haritasının daha doğru bir şekilde oluşturulmasını sağlar. Ölçüm verilerinin güvenilirliği de dikkate alınmalıdır. Hem anemometre kalibrasyonu standartlara uygun olmalı hem de verilerde kayıp olması engellenmeli, bu mümkün değilse de kayıplar minimum seviyede tutulmalıdır.

Ölçüm kısmı en az hatayla tamamlandıktan sonra rüzgar potansiyeli ve enerji hesaplamaları en doğru şekilde yapılmalıdır. Bu hesaplamalar için kullanılan programların tutarlılığı ve verilerin doğru bir şekilde girilmesi hesaplamaların belli toleranslar dahilinde gerçeğe yakın çıkmasını sağlayacaktır.

Bu çalışma kapsamında, İstanbul’da yer alan bir bölgeden alınan ölçüm verileri ve farklı türbin güç eğrileri kullanılarak önce seçilen bir noktadaki, daha sonra ise

rüzgar çiftliği için enerji üretimi hesabı yapılmıştır. Hesaplamalar yedi farklı programla gerçekleştirilmiştir. Bunlardan Homer, RETScreen ve Windographer lineer modellemeli, WAsP, WindPRO ve WindFarmer akış alan modellemeli, WindSim ise Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği modellemeli programlardır. Ölçüm direği dataları en az hataya sahip olan ardışık iki yıl (2008 ve 2009) olarak alınmıştır. Datalar 10 dakikalık periyotlar halindedir. Ölçüm direğinde yer alan anemometre yükseklikleri 10, 30 ve 50 metredir. Güçleri 600 kW ile 5000 kW arasında değişen on farklı türbin için hesaplamalar tekrarlanmıştır.

Öncelikle tek türbin için tüm programlarla gerçekleştirilen hesaplamalar verilmiş, sonrasında ise akış alan modellemeli programlar ile rüzgar santrali hesabı yapılarak sonuçlar gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır.

6.1 Tek Türbin İçin Enerji Hesabı

İlk olarak ölçüm direğinden alınan dataların analiz edilmesi sonucu bütün programlardan elde edilen sonuçlar verilmiştir. Her program için elde edilen veriler ayrı ayrı incelenmiş, daha sonra ise sonuçlar irdelenmiştir.

Çizelge 6.1 : Hesaplamalarda kullanılan türbinler ve teknik özellikleri.

Türbin Modeli	Türbin Gücü (kW)	Göbek yüksekliği (m)	Rotor çapı (m)
GE 600a	600	50	46
Vestas V47	660	50	47
Enercon E-48	800	50	48
Nordex N-50	800	50	50
Enercon E-82	2000	78.3	82
Gamesa G83	2000	78	83
Vestas V90	2000	80	90
Siemens SWT-2.3	2300	80	82.4
Alstom ECO 3000	3000	75	100
RE Power 5 MW	5000	100	126

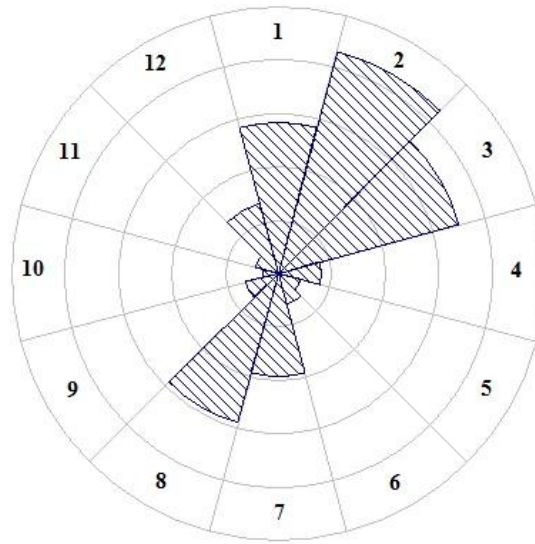
Hesaplamalarda farklı yüksekliklerde çeşitli türbin tipleri kullanılarak programların kendi içerisinde belli bir tutarlılık dahilinde hareket edip etmediği kontrol edilmeye çalışılmıştır. Çizelge 6.1’de hesaplamalar için kullanılan farklı güç ve yüksekliklerde

on türbinin teknik özellikleri yer almaktadır. Türbinlere ait güç eğrileri Ek-A'da yer almaktadır.

10, 30 ve 50 metrelerde yapılan ölçümler programlar tarafından türbin göbek yüksekliğine yükseltildikten sonra enerji hesaplamaları yapıldığı için aynı göbek yüksekliğindeki türbinler seçilmeye çalışılmıştır. Dört türbin 50 metre göbek yüksekliğinde, iki türbin 78 metrede, iki türbin de 80 metre yükseklikte seçilmiştir. Ayrıca yüksek güçlerde programların performanslarını karşılaştırmak için 3000 kW ve 5000 kW'lık iki türbin de listeye dahil edilmiştir.

6.1.1 WAsP programından elde edilen sonuçlar

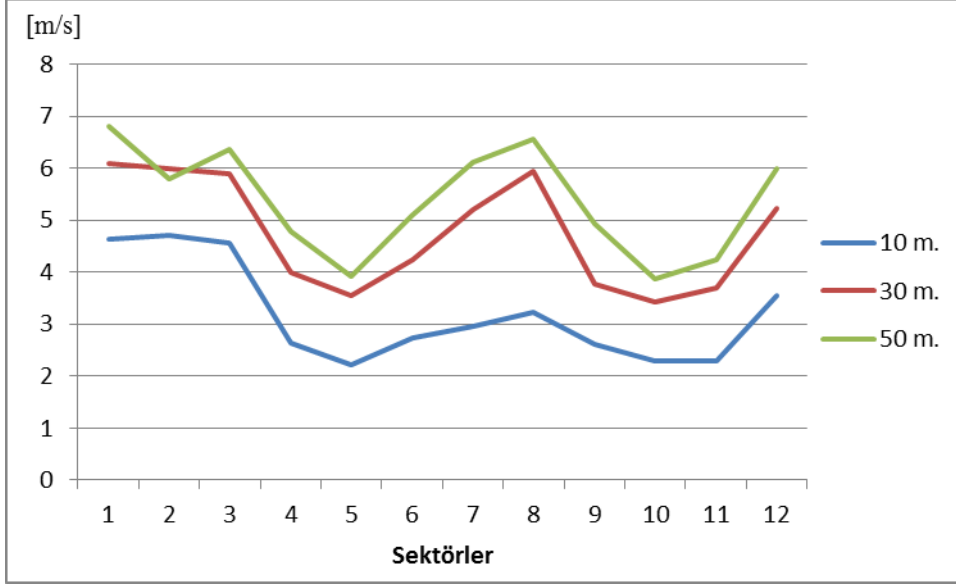
Akış alan modellemeli programlarda yapılması gereken ilk iş dataların düzgün bir şekilde programa girilmesi ve analizi olduğundan öncelikle datalarla ilgili bilgi vermek yerinde olur. WAsP programı, rüzgar datalarını hız ve yön olarak iki bileşen şeklinde kabul etmektedir. Yönlere göre analiz edilen rüzgar hızlarından rüzgar gülü ve frekans analizi şeklinde sonuçlar elde edilmektedir. WAsP programından alınan ve rüzgar yönüne göre esme sıklığını ifade eden rüzgar gülüne ait frekans dağılımı Şekil 6.1'de ve rüzgar hızları da Şekil 6.2'de yer almaktadır.



Şekil 6.1 : WAsP'tan alınan iki yıllık 10 dakikalık verilere ait rüzgar gülü.

Şekil 6.1'de yer alan 30 derecelik açılarla 12 sektöre ayrılmış olan rüzgar gülü, sahanın hakim rüzgar yönü hakkında bilgi vermektedir. WAsP programı sektörlerle 1-12 arasında numaralandırma yapmaktadır. Hesaplamaları gerçekleştirdiğimiz saha için hakim rüzgar yönü en fazla rüzgarın estiği 2 numaralı sektör olan Kuzey –

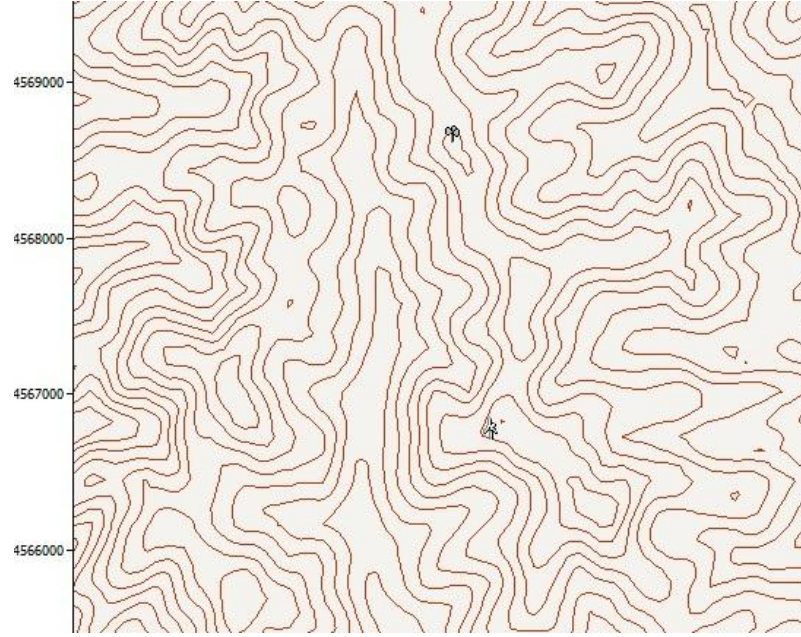
Kuzeydoğudur. Rüzgarın en fazla estiği sektörler 1, 2, 3, 7 ve 8 numaralı sektörlerdir. Bu sektörlerle ait frekanslar sırasıyla 14.2, 21.5, 17.4, 9.7 ve 14.4'tür. Yıl boyunca esen rüzgarın %77.2'lik kısmı bu 5 sektörden gelmektedir.



Şekil 6.2 : WASP'tan alınan iki yıllık 10 dakikalık 10, 30 ve 50 metredeki verilerin sektörlere göre ortalama hız dağılımı.

Şekil 6.2'de ise 30°'lik açılarla 12 sektöre ayrılmış olan rüzgar gülünün her bir sektörü için rüzgar hızları ortalamaları 10, 30 ve 50 metre için ayrı ayrı yer almaktadır. Yıllık ve mevsimlik sıcaklık değişimlerine bağlı olarak rüzgar hızlarında değişiklikler meydana gelmektedir. Sektörlere göre hesaplanmış 10 metredeki rüzgar ortalaması 3.86 m/s, 30 metredeki rüzgar ortalaması 5.51 m/s ve 50 metredeki rüzgar ortalaması ise 5.99 m/s'dir.

Anemometre ve türbin koordinatları girilerek akış alan modellemesi yapıldığından bölgeye ait eşyüksele eğrilerinin de görüldüğü harita Şekil 6.3'te yer almaktadır. Ölçüm direği ile türbin arası kuş uçuşu mesafe 1750 metredir.



Şekil 6.3 : WAsP programında anemometre ve türbin yerlerini gösteren harita.

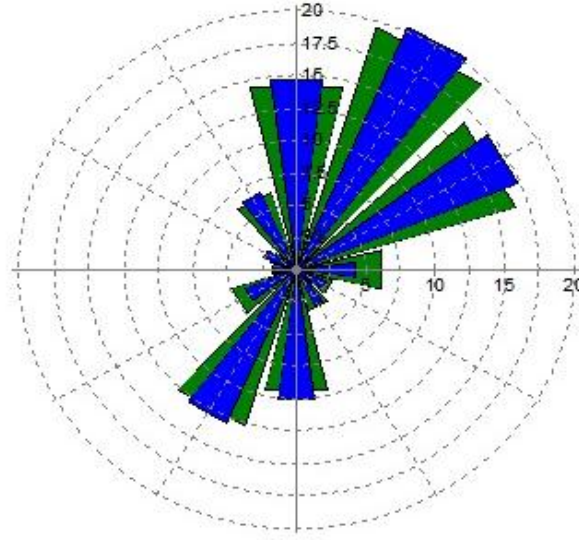
Rüzgar dataları, türbin ve anemometre koordinatları, harita ve türbin güç eğrileri kullanılarak her bir türbin için elde edilen enerji üretim değerleri Çizelge 6.2’de yer almaktadır.

Çizelge 6.2 : WAsP programından farklı yükseklikteki 3 anemometre datası kullanılarak 10 değişik türbin için elde edilen enerji üretim değerleri (MWh).

Türbin Tipleri	10 m.	30 m.	50 m.
GE 600a	1013	1318	1286
Vestas V47	1116	1471	1434
Enercon E-48	1345	1769	1731
Nordex N-50	1198	1589	1557
Enercon E-82	4756	6086	5861
Gamesa G83	4158	5388	5200
Vestas V90	4994	6337	6088
Siemens SWT-2.3	4348	5681	5501
Alstom ECO 3000	6384	8215	7934
RE Power 5 MW	11038	14330	13754

6.1.2 WindPRO programından elde edilen sonuçlar

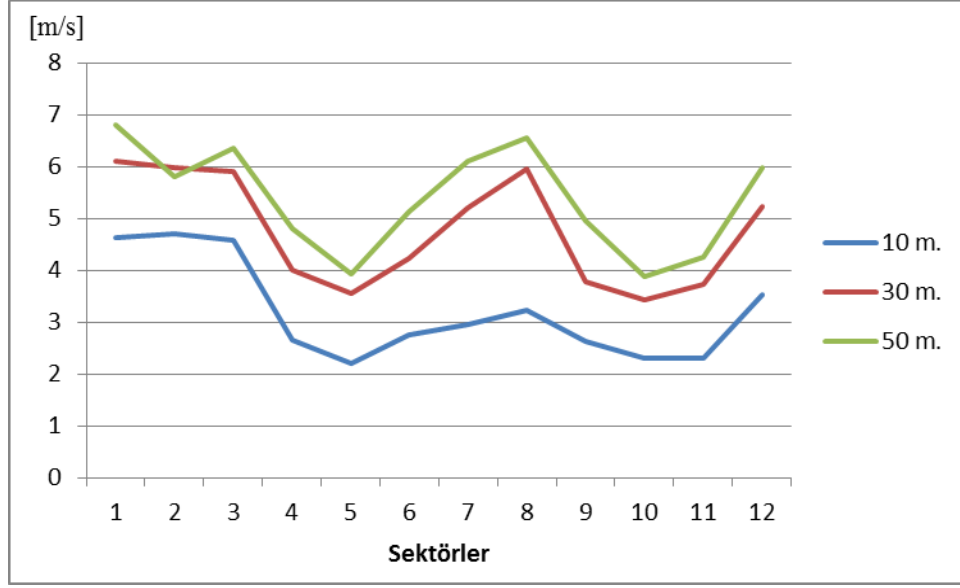
WindPRO programından alınan ve rüzgar yönüne göre esme sıklığını ifade eden rüzgar gülüne ait frekans dağılımı Şekil 6.4'te ve rüzgar hızları da Şekil 6.5'te yer almaktadır.



Şekil 6.4 : WindPRO'dan alınan iki yıllık 10 dakikalık verilere ait rüzgar gülü.

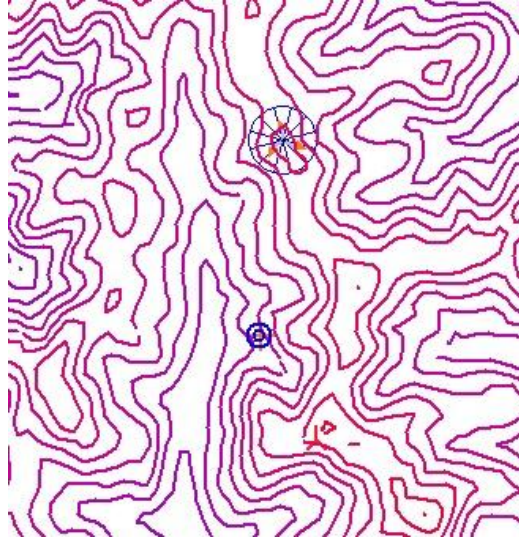
Şekil 6.4'te yer alan 30 derecelik açılarla 12 sektöre ayrılmış olan rüzgar gülü, sahanın hakim rüzgar yönü hakkında bilgi vermektedir. WindPRO programı sektörlere 0-11 arasında numaralandırma yapmaktadır. Hesaplamaları gerçekleştirdiğimiz saha için hakim rüzgar yönü en fazla rüzgarın estiği 1 numaralı sektör olan Kuzey – Kuzeydoğudur. Rüzgarın en fazla estiği sektörler 0, 1, 2, 6 ve 7 numaralı sektörlerdir. Bu sektörlerle ait frekanslar sırasıyla 14.2, 21.5, 17.43, 9.65 ve 14.36'dır. Yıl boyunca esen rüzgarın %77.14'lük kısmı bu 5 sektörden gelmektedir.

Şekil 6.5'te ise 30°'lik açılarla 12 sektöre ayrılmış olan rüzgar gülünün her bir sektörü için rüzgar hızları ortalamaları 10, 30 ve 50 metre için ayrı ayrı yer almaktadır. Sektörlere göre hesaplanmış 10 metredeki rüzgar ortalaması 3.861 m/s, 30 metredeki rüzgar ortalaması 5.514 m/s ve 50 metredeki rüzgar ortalaması ise 5.997 m/s'dir.



Şekil 6.5 : WindPRO’den alınan iki yıllık 10 dakikalık 10, 30 ve 50 metredeki verilerin sektörlere göre ortalama hız dağılımı.

Anemometre ve türbin koordinatları girilerek akış alan modellemesi yapıldığından bölgeye ait eşyüksekti eğrilerinin de görüldüğü harita Şekil 6.6’da yer almaktadır.



Şekil 6.6 : WindPRO programında anemometre ve türbin yerlerini gösteren harita.

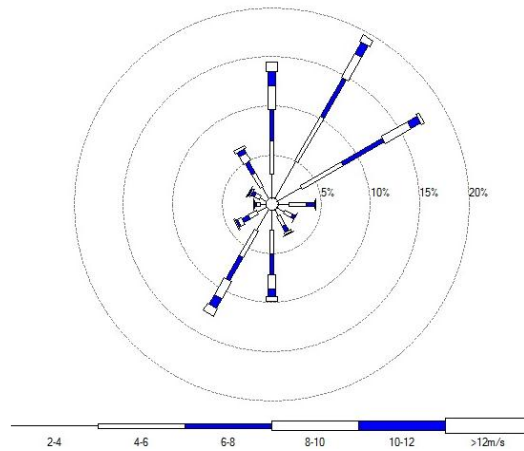
Rüzgar dataları, türbin ve anemometre koordinatları, harita ve türbin güç eğrileri kullanılarak her bir türbin için elde edilen enerji üretim değerleri Çizelge 6.3’te yer almaktadır.

Çizelge 6.3 : WindPRO programından farklı yükseklikteki 3 anemometre datası kullanılarak 10 değişik türbin için elde edilen enerji üretim değerleri (MWh).

Türbin Tipleri	10 m.	30 m.	50 m.
GE 600a	1009	1294	1265
Vestas V47	1111	1444	1410
Enercon E-48	1340	1737	1702
Nordex N-50	1190	1552	1527
Enercon E-82	4665	5917	5714
Gamesa G83	4098	5250	5083
Vestas V90	4925	6188	5961
Siemens SWT-2.3	4295	5538	5382
Alstom ECO 3000	6269	7991	7738
RE Power 5 MW	10575	13798	13310

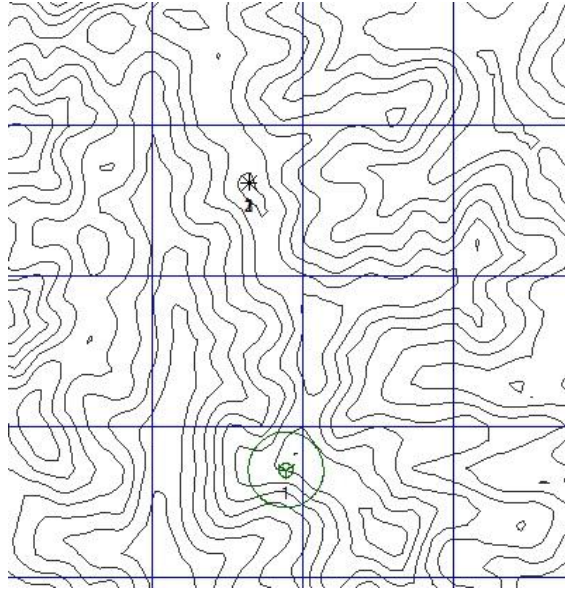
6.1.3 WindFarmer programından elde edilen sonuçlar

WAsP ve WindPRO için gerçekleştirilen işlemler WindFarmer için tekrarlandığında rüzgar esme sıklığına bağlı olarak dataların analizi sonucu elde edilen rüzgar gülü Şekil 6.7’de yer almaktadır. WAsP programından elde edilen rüzgar kaynak haritaları WindFarmer programında rüzgar datası olarak kullanıldığından 10, 30 ve 50 metrede ölçüm direğinden alınan ortalama rüzgar hızları WAsP ile aynı olmaktadır. Bu sebeple ortalama hızlara ait verilerle oluşturulacak şekil, Şekil 6.2 ile birebir aynı olacağından burada tekrar koyma gereği duyulmamıştır.



Şekil 6.7 : WindFarmer’den alınan iki yıllık 10 dakikalık verilere ait rüzgar gülü.

Anemometre ve türbin koordinatları girilerek akış alan modellemesi yapıldığından bölgeye ait eşyüksekti eğrilerinin de görüldüğü harita Şekil 6.8’de yer almaktadır.



Şekil 6.8 : WindFarmer programında anemometre ve türbin yerlerini gösteren harita.

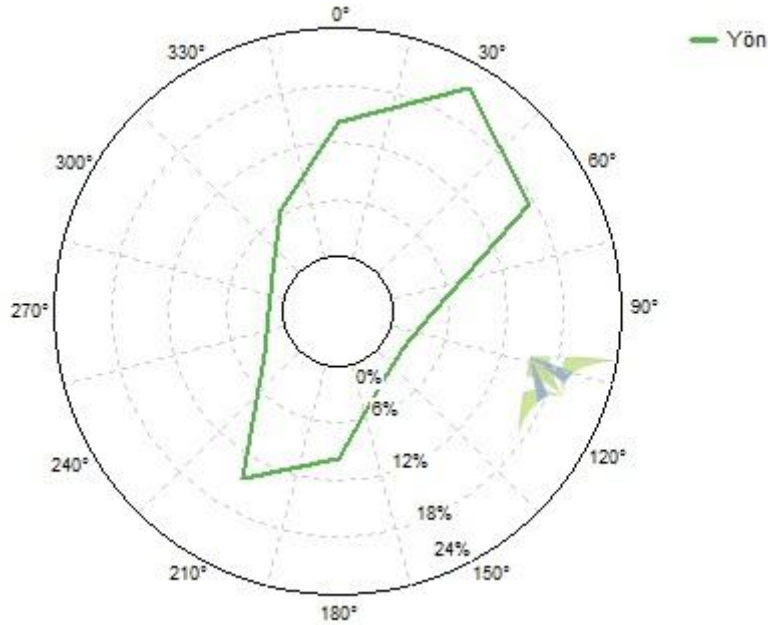
Rüzgar dataları, türbin ve anemometre koordinatları, harita ve türbin güç eğrileri kullanılarak her bir türbin için elde edilen enerji üretim değerleri Çizelge 6.4’te yer almaktadır.

Çizelge 6.4 : WindFarmer programından farklı yükseklikteki 3 anemometre datası kullanılarak 10 değişik türbin için elde edilen enerji üretim değerleri (MWh).

Türbin Tipleri	10 m.	30 m.	50 m.
GE 600a	820	1239	1238
Vestas V47	887	1378	1377
Enercon E-48	1081	1654	1656
Nordex N-50	949	1477	1483
Enercon E-82	3932	5742	5682
Gamesa G83	3408	5103	5050
Vestas V90	4005	5990	5961
Siemens SWT-2.3	3574	5389	5389
Alstom ECO 3000	5241	7782	7732
RE Power 5 MW	9104	13469	13317

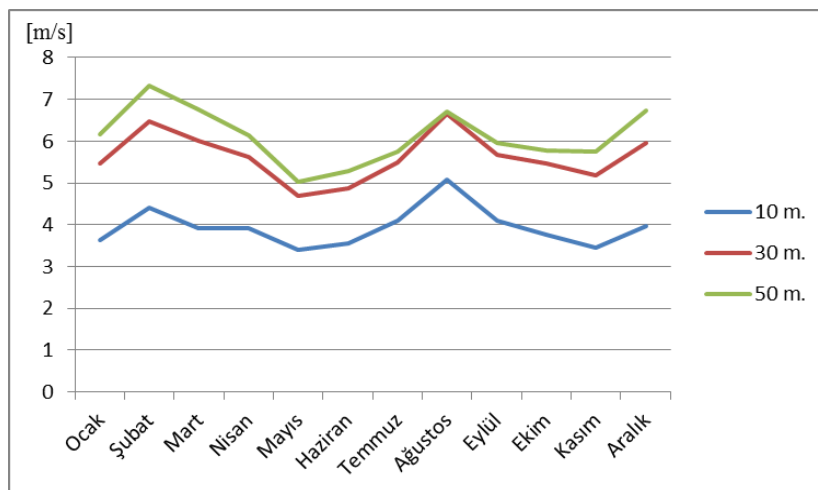
6.1.4 Windographer programından elde edilen sonuçlar

Lineer modellemeli programlardan olan Windographer, hesaplamalarda saha etkisini göz önünde bulundurmamaktadır. Şekil 6.9’da programdan alınan data'lara ait rüzgar gülü görülmektedir.



Şekil 6.9 : Windographer’den alınan iki yıllık 10 dakikalık verilere ait rüzgar gülü.

Ortalama rüzgar hızı 10 metrede 3.94 m/s, 30 metrede 5.63 m/s ve 50 metrede 6.11 m/s olarak hesaplanmıştır. Windographer programına ait iki yıllık data'lara ait ay bazında rüzgar ortalamalarına ait veriler Şekil 6.10’da yer almaktadır.



Şekil 6.10 : Windographer’den alınan iki yıllık 10 dakikalık 10, 30 ve 50 metredeki verilerin aylara göre ortalama hız dağılımı.

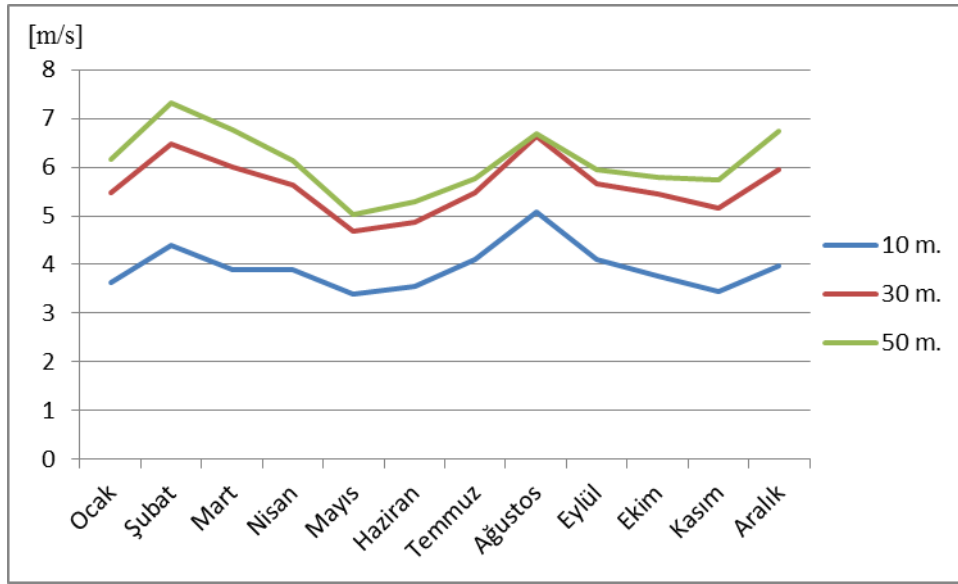
Denklem 3.9’da yer alan Güç Kanunu formülü kullanılarak sahaya ait alfa katsayısı değeri 0.25 olarak bulunmuştur. Bu değer lineer modellemeli programların üçü için de geçerlidir. Bulunan alfa değeri, programlara girilerek türbin göbek yüksekliğindeki hızların hesabında kullanılmıştır. Ayrıca alfa katsayısı için genel olarak kabul edilen değer olan 0.14 değeri de hesaplamalarda karşılaştırma yapılabilmesi açısından kullanılmıştır. Türbin göbek yüksekliğine ötelenen rüzgar dataları ve türbin güç eğrileri kullanılarak her bir türbin için elde edilen enerji üretim değerleri Çizelge 6.5’te yer almaktadır.

Çizelge 6.5 : Windographer programından farklı yükseklikteki 3 anemometre datası kullanılarak 10 değişik türbin için elde edilen enerji üretim değerleri (MWh).

Türbin Tipleri	10 m.		30 m.		50 m.	
	Alfa katsayısı		Alfa katsayısı		Alfa katsayısı	
	0.14	0.25	0.14	0.25	0.14	0.25
GE 600a	721	1122	1150	1310	1184	1184
Vestas V47	777	1240	1276	1465	1317	1317
Enercon E-48	940	1497	1526	1750	1575	1575
Nordex N-50	899	1383	1401	1603	1451	1451
Enercon E-82	3253	5461	5079	6351	5192	5763
Gamesa G83	2990	4956	4587	5744	4703	5217
Vestas V90	3673	5836	5474	6745	5584	6170
Siemens SWT-2.3	3137	5292	4826	6120	4965	5555
Alstom ECO 3000	4359	7354	6890	8579	7061	7778
RE Power 5 MW	7251	13261	11621	15473	11895	14002

6.1.5 Homer programından elde edilen sonuçlar

Lineer modellemeli programlardan olan Homer programı da Windographer gibi hesaplamalarda saha etkisini göz önüne almamaktadır. Şekil 6.11’de programdan alınan dataların aylık rüzgar hızı ortalamaları görülmektedir. Ortalama rüzgar hızı 10 metrede 3.94 m/s, 30 metrede 5.63 m/s ve 50 metrede 6.11 m/s olarak hesaplanmıştır. Homer programı 10 dakikalık dataların girişine imkan vermektedir. Ayrıca program rüzgar yönlerini dikkate almadığından diğer programlar için verilen rüzgar gülü verileri bu programda yer almamaktadır.



Şekil 6.11 : Homer’den alınan iki yıllık 10 dakikalık 10, 30 ve 50 metredeki verilerin aylara göre ortalama hız dağılımı.

Türbin göbek yüksekliğine ötelenen rüzgar dataları ve türbin güç eğrileri kullanılarak her bir türbin için elde edilen enerji üretim değerleri Çizelge 6.6’da yer almaktadır.

Çizelge 6.6 : Homer programından farklı yükseklikteki 3 anemometre datası kullanılarak 10 değişik türbin için elde edilen enerji üretim değerleri (MWh).

Türbin Tipleri	10 m.		30 m.		50 m.	
	Alfa katsayısı		Alfa katsayısı		Alfa katsayısı	
	0.14	0.25	0.14	0.25	0.14	0.25
GE 600a	692	1089	1114	1271	1146	1146
Vestas V47	737	1196	1230	1417	1268	1268
Enercon E-48	905	1453	1477	1699	1524	1524
Nordex N-50	783	1283	1310	1514	1357	1357
Enercon E-82	3630	6044	5668	7075	5764	6416
Gamesa G83	2683	4712	4349	5522	4459	4984
Vestas V90	3252	5475	5149	6411	5255	5824
Siemens SWT-2.3	2760	4943	4516	5787	4648	5214
Alstom ECO 3000	4202	7172	6689	8369	6856	7570
RE Power 5 MW	6999	12977	11291	15144	11564	13672

6.1.6 RETScreen programından elde edilen sonuçlar

Lineer modellemeli programlardan olan RETScreen programı da diğer iki programda olduğu gibi hesaplamalarda saha etkisini göz önüne almamaktadır. Homer programı için verilen ortalama rüzgar hızlarını gösteren Şekil 6.11 RETScreen için de birebir geçerli olduğundan tekrar koyma gereği duyulmamıştır. Ortalama rüzgar hızı 10 metrede 3.94 m/s, 30 metrede 5.63 m/s ve 50 metrede 6.11 m/s olarak hesaplanmıştır. Ayrıca programa sadece aylık ortalama rüzgar hızları girildiğinden diğer programlar için verilen rüzgar gülü verileri bu programda yer almamaktadır.

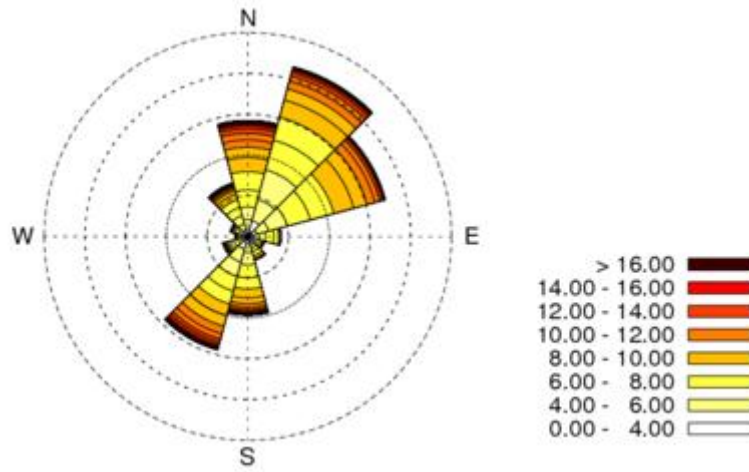
Alfa katsayısını girmek için herhangi bir modül ya da bölüm olmadığından Homer ve Windographer için yapılan işlemler RETScreen’de denklem 3.9’da yer alan formül kullanılarak elle hesaplanmıştır. Program normal koşullarda alfa katsayısını 0.14 olarak almaktadır. Alfa katsayısının 0.25 olduğu durum için yukarıda bahsedilen hesaplamalar yapılmıştır. Türbin göbek yüksekliğine ötelenen rüzgar dataları ve türbin güç eğrileri kullanılarak her bir türbin için elde edilen enerji üretim değerleri Çizelge 6.7’de yer almaktadır.

Çizelge 6.7 : RETScreen programından farklı yükseklikteki 3 anemometre datası kullanılarak 10 değişik türbin için elde edilen enerji üretim değerleri (MWh).

Türbin Tipleri	10 m.		30 m.		50 m.	
	Alfa katsayısı		Alfa katsayısı		Alfa katsayısı	
	0.14	0.25	0.14	0.25	0.14	0.25
GE 600a	420	1200	1089	1432	1310	1310
Vestas V47	426	1333	1204	1604	1463	1463
Enercon E-48	539	1610	1454	1939	1766	1766
Nordex N-50	475	1449	1304	1753	1592	1592
Enercon E-82	1606	5768	4170	6728	5014	6228
Gamesa G83	1366	5172	3686	6078	4467	5605
Vestas V90	1714	6021	4364	6966	5207	6475
Siemens SWT-2.3	1402	5528	3834	6538	4679	6011
Alstom ECO 3000	2153	7802	5707	9156	6890	8449
RE Power 5 MW	3058	13973	8746	16191	10689	15070

6.1.7 WindSim programından elde edilen sonuçlar

WindSim programı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemini saha etkilerini göz önüne alarak ve Navier Stokes diferansiyel denklemlerini çözerek gerçekleştirmektedir. WindSim programından alınan ve rüzgar yönüne göre esme sıklığını ifade eden rüzgar gülüne ait frekans dağılımı Şekil 6.12’de ve rüzgar hızları da Şekil 6.13’te yer almaktadır.

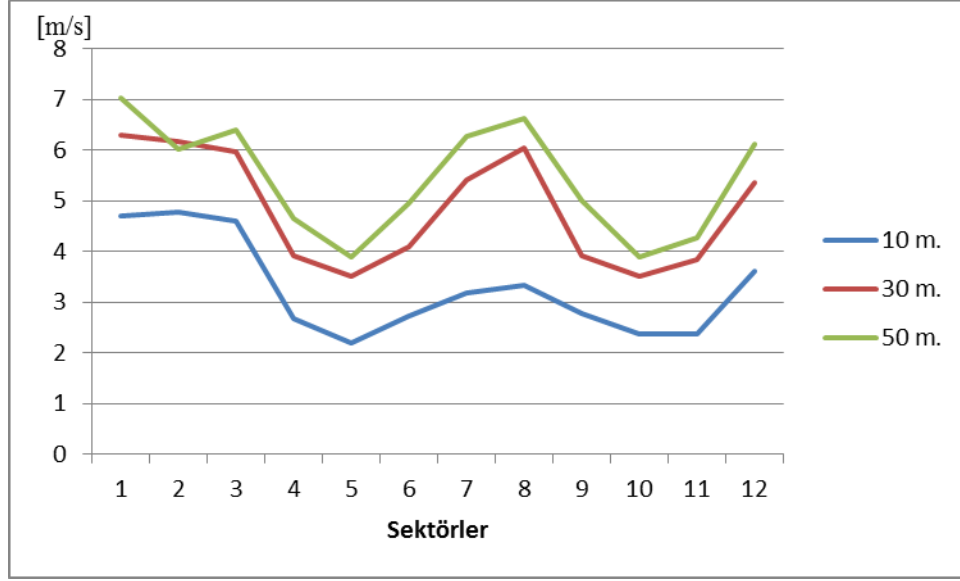


Şekil 6.12 : WindSim’den alınan iki yıllık 10 dakikalık verilere ait rüzgar gülü.

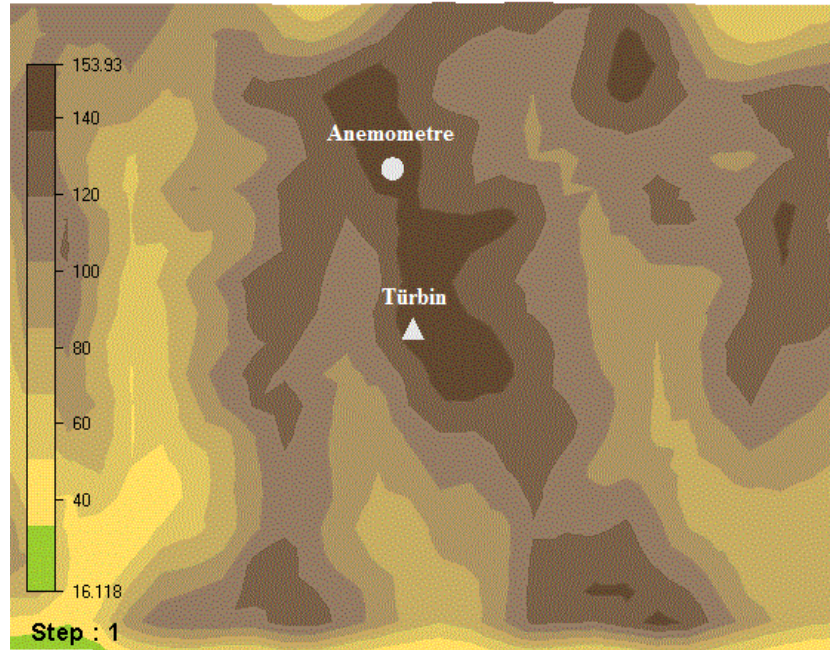
Şekil 6.12’de yer alan 30 derecelik açılarla 12 sektöre ayrılmış olan rüzgar gülü program tarafından 1-12 arasında numaralandırılmıştır. Hesaplamaları gerçekleştirdiğimiz saha için hakim rüzgar yönü en fazla rüzgarın estiği 2 numaralı sektör olan Kuzey – Kuzeydoğudur. Rüzgarın en fazla estiği sektörler 1, 2, 3, 7 ve 8 numaralı sektörlerdir. Bu sektörlerle ait frekanslar sırasıyla 14.2, 21.5, 17.4, 9.7 ve 14.4’tür. Yıl boyunca esen rüzgarın %77.2’lik kısmı bu 5 sektörden gelmektedir.

Şekil 6.13’te ise 30°’lik açılarla 12 sektöre ayrılmış olan rüzgar gülünün her bir sektörü için rüzgar hızları ortalamaları 10, 30 ve 50 metre için ayrı ayrı yer almaktadır. Sektörlere göre hesaplanmış 10 metredeki rüzgar ortalaması 3.94 m/s, 30 metredeki rüzgar ortalaması 5.63 m/s ve 50 metredeki rüzgar ortalaması ise 6.12 m/s’dir.

Anemometre ve türbin koordinatları girilerek Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemi uygulandığından bölgeye ait eşyüksekti eğrilerinin de görüldüğü harita Şekil 6.14’te yer almaktadır.



Şekil 6.13 : WindSim’den alınan iki yıllık 10 dakikalık 10, 30 ve 50 metredeki verilerin sektörlere göre ortalama hız dağılımı.



Şekil 6.14 : WindSim programında anemometre ve türbin yerlerini gösteren harita.

Rüzgar dataları, türbin ve anemometre koordinatları, harita ve türbin güç eğrileri kullanılarak her bir türbin için elde edilen enerji üretim değerleri Çizelge 6.8’de yer almaktadır.

Çizelge 6.8 : WindSim programından farklı yükseklikteki 3 anemometre datası kullanılarak 10 değişik türbin için elde edilen enerji üretim değerleri (MWh).

Türbin Tipleri	10 m.	30 m.	50 m.
GE 600a	1114	1295	1188
Vestas V47	1223	1442	1317
Enercon E-48	1478	1725	1577
Nordex N-50	1363	1580	1453
Enercon E-82	5343	6174	5654
Gamesa G83	4847	5595	5130
Vestas V90	5723	6573	6053
Siemens SWT-2.3	5146	5939	5440
Alstom ECO 3000	7243	8394	7684
RE Power 5 MW	12955	15031	13751

6.1.8 Sonuçların değerlendirilmesi

Micrositing çalışmalarında veri anlamında herhangi bir sıkıntı olmadığı sürece en yüksekte bulunan anemometre verilerine göre hesaplamalar gerçekleştirilir. Bu yüzden çalışma dahilinde yapılan karşılaştırmalar için 50 metreden alınan ölçümler kullanılarak yapılan hesaplamalar daha fazla önem arz etmektedir. 10 ve 30 metre verilerinin günümüz şartlarında yatırım projeleri için kullanımı tercih edilmemektedir.

Çizelgeler incelendiğinde genel olarak türbinlerden elde edilen enerji miktarlarının birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. 50 metre verileri göz önüne alındığında akış alan modellemeli programların sonuçları birbirine çok yakındır. Lineer modellemeli programlar % 5 seviyelerini aşmayacak şekilde tutarlı ve yakın sonuçlar vermiştir. 10 ve 30 metrede ise farkların daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun başlıca sebebi türbin göbek yüksekliği ile ölçüm yapılan yüksekliğin arasındaki farkın fazla olmasıdır. Programlar bu yüksekliklerden türbin göbek yüksekliğine yükseltme işlemini ekstrapolasyonla yaptığından 50 metredeki ölçümler kullanılarak elde edilen değerler ile 10 metredeki ölçümler kullanılarak elde edilen değerler arasındaki fark, enerji yatırımlarında ciddi sıkıntılar doğmasına neden olabilecek büyüklüktedir.

WAsP ile WindPRO programlarının sonuçları birbirlerine oldukça yakındır. WAsP programından alınan sonuçlar WindPRO'ya göre % 1 – 2 oranında daha fazla çıkmaktadır. Bu farkı yaratacak sebeplerden biri, WindPRO'da hava yoğunluğu değerinin sahaya göre hesaplanması, WAsP'ta ise sabit olarak yani 1.225 kg/m^3 olarak alınmasıdır. Sahaya özgü hava yoğunluğu değerinin hesaplamalarda kullanılması için rüzgar türbin üreticisinden hava yoğunluğuna göre düzenlenmiş güç eğrilerinin istenmesi daha doğru bir yaklaşımdır. WindFarmer programından alınan sonuçlar ise WAsP ve WindPRO'ya göre % 2 – 4 oranlarında daha düşük çıkmaktadır. Sadece 10 metrede alınan ölçümlerle yapılan hesaplamalarda % 20 civarında bir fark vardır. WindSim programı ile yapılan hesaplamalarda 10 metre dataları ile yapılan hesaplamalar diğer programlara göre daha yüksek çıkmıştır. Bu da 10 metredeki datalarla bile diğer programlardan daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. 30 ve 50 metredeki datalarda ise düşük güçlü türbinlerde diğer programlardan % 7 – 8 düşük çıkarken yüksek güçlü türbinlerde diğer programlarla çok yakın sonuçlar vermektedir.

Lineer modellemeli programlar olan Windographer, Homer ve RETScreen'in sonuçlarında da benzer durumlara rastlanır. Ölçüm verilerine sahip olduğumuz bölgenin alfa katsayısı 0.25 olarak bulunmuştur. Bu sebepten hem saha için hesaplanan değer olan 0.25 hem de standart değer olarak kabul edilen 0.14 ile hesaplamalar yapılarak iki durum arasındaki farkın görülebilmesi sağlanmıştır.

Windographer ve Homer programlarının sonuçları genel olarak birbirine yakinken RETScreen programından alınan sonuçlar bu ikisine nazaran daha farklı çıkmıştır. Alfa katsayısının 0.14 alındığı durumlarda RETScreen diğer programlara göre düşük değerler verirken alfa katsayısının 0.25 alındığı durumlarda ise daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bunun ana nedeni, programın rüzgar hızlarını sadece aylık ortalama olarak girmeye olanak tanımasıdır. Aylık ortalama olarak girilen hızlar eğer türbin güç eğrisinin cut in yani devreye giriş hızından daha düşükse, o ay içerisinde üretim yapılmamış gibi kabul edilmektedir. Bu yüzden de enerji üretimi değeri düşük çıkmaktadır. 0.25 olarak alındığı durumlarda daha yüksek çıkmasının sebebi ise aylık ortalama rüzgar hızları üzerinden yapılan enterpolasyon işlemi neticesinde rüzgar hızlarının yüksek çıkmasıdır.

Windographer, Homer ve RETScreen programlarında alfa katsayısı 0.14 alındığında akış alan modellemeli programlara göre daha düşük değerler çıkarken, alfa katsayısı

saha için hesaplanan değer olan 0.25 alındığında ise daha yüksek değerler çıkmaktadır. 0.14 değeri saha için uygun olmadığından bununla yapılan hesaplamalar düşük çıkmıştır. Bu programlara girilen veriler ölçüm noktasında alınmasına rağmen hesaplamalarda direkt olarak kullanılmaktadır. Akış alan modellemeli programlarda ise ölçüm verileri yüzey etkileri hesaba katılarak türbin noktalarına ötelenmektedir. Bu sebepten ötürü programlar bazında bazı türbinler için yüksek bazı türbinler için de düşük hızlar çıkmaktadır.

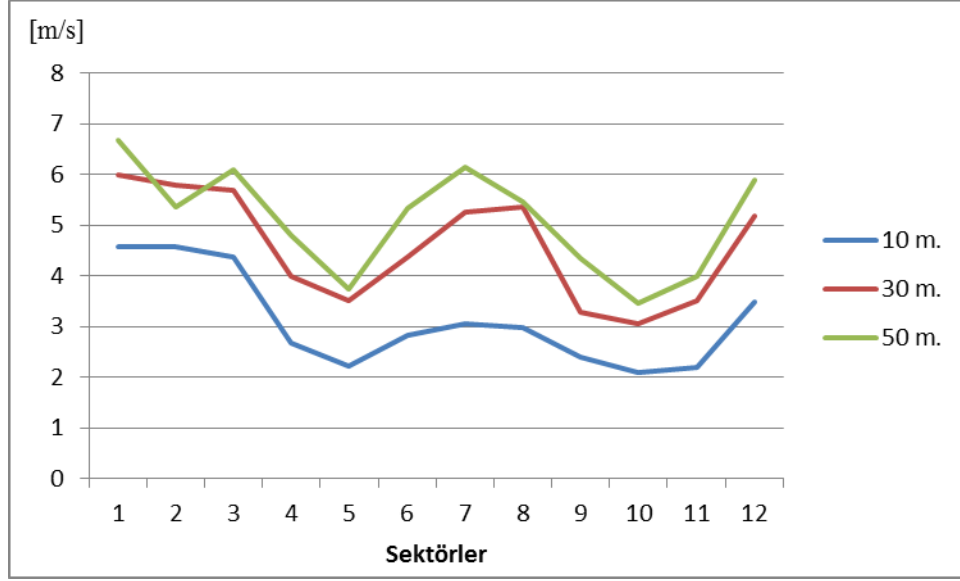
Sonuç olarak, WAsP ve WindPRO birbirlerine % 1 – 2 seviyelerinde yakın sonuçlar vermekte, WindFarmer ve WindSim ise bu iki programa göre % 3 – 4 ’lük bir oranda farklı sonuç vermektedir. Daha yüzeysel hesaplamalarda kullanılan lineer hesaplamalı programlar ölçüm yüksekliği arttıkça ideale yakın sonuç vermesine rağmen ölçüm yükseklikleri azaldıkça ciddi sapmalar yaşamaktadırlar. Lineer modellemeli programlar ile akış alan modellemeli programlar arasında % 5 oranında bir fark olması, kompleks olmayan sahalar ve tek türbin için yapılan hesaplamalarda iyi sonuçlar verdiklerini göstermektedir.

6.2 Rüzgar Çiftliği İçin Enerji Hesabı

Rüzgar çiftliği hesaplamalarında yüzey şekilleri, sahada bulunan rüzgar akışını etkileyen engeller ve türbinlerin birbirlerine olan etkilerinin de göz önüne alınması gerekmektedir. Bu etkileri hesaba katabilen programlar da akış alan modellemeli programlardır. Bu kısımda çiftlik hesaplamaları için kullanılacak programlar WAsP, WindPRO, WindFarmer ve WindSim programlarıdır.

2 MW gücündeki 12 adet Enercon E-82 türbininden oluşan bir rüzgar çiftliğine ait üretim datalarına sahip olduğundan, yapılacak olan hesaplamaları gerçek verilerle karşılaştırmak adına bu çiftliğin modellenmesi yapılmıştır.

İlk olarak ölçüm direğinden 10, 30 ve 50 metrede alınan veriler programlarda analiz edilerek çiftlik için enerji üretimi hesabı yapılacaktır. WAsP, WindPRO ve WindFarmer programları için rüzgar datası analizleri aynı şekilde yapıldığından 10, 30 ve 50 metreden alınan ölçüm verilerinin sektörlere göre ortalama hız dağılımı Şekil 6.15’te yer almaktadır. Bir yıllık datalar analiz edildiğinde, 10 metrede ortalama rüzgar hızı 3.76 m/s, 30 metrede 5.31 m/s ve 50 metrede ise 5.67 m/s olarak bulunmuştur.



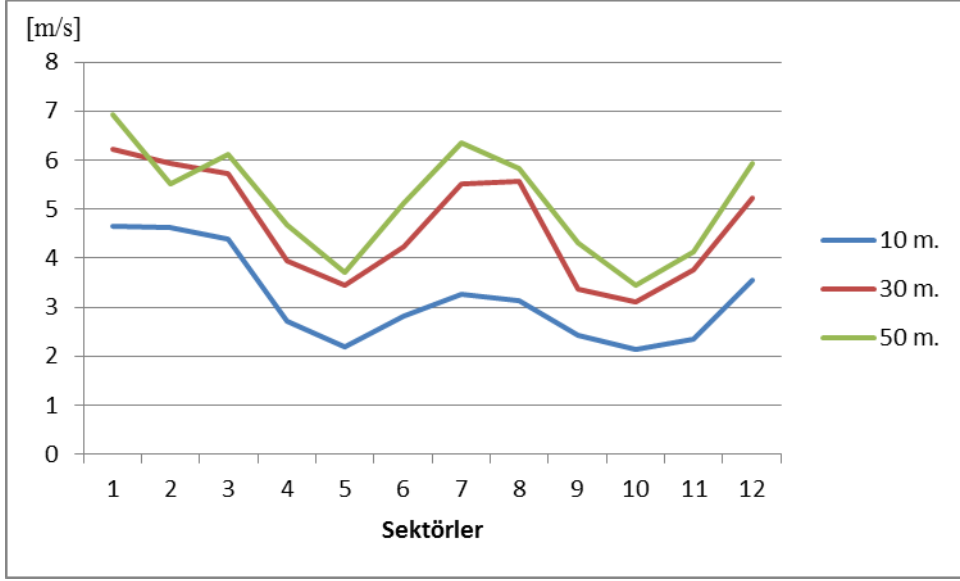
Şekil 6.15 : WASP, WindPRO ve WindFarmer’a ait bir yıllık 10 dakikalık 10, 30 ve 50 metredeki ölçüm verilerinin sektörlere göre ortalama hız dağılımı.

WindSim programına ait 10, 30 ve 50 metreden alınan ölçüm verilerinin sektörlere göre ortalama hız dağılımı ise Şekil 6.16’da yer almaktadır. WindSim programı için 10 metrede ortalama rüzgar hızı 3.83 m/s, 30 metrede 5.44 m/s ve 50 metrede ise 5.81 m/s olarak bulunmuştur.

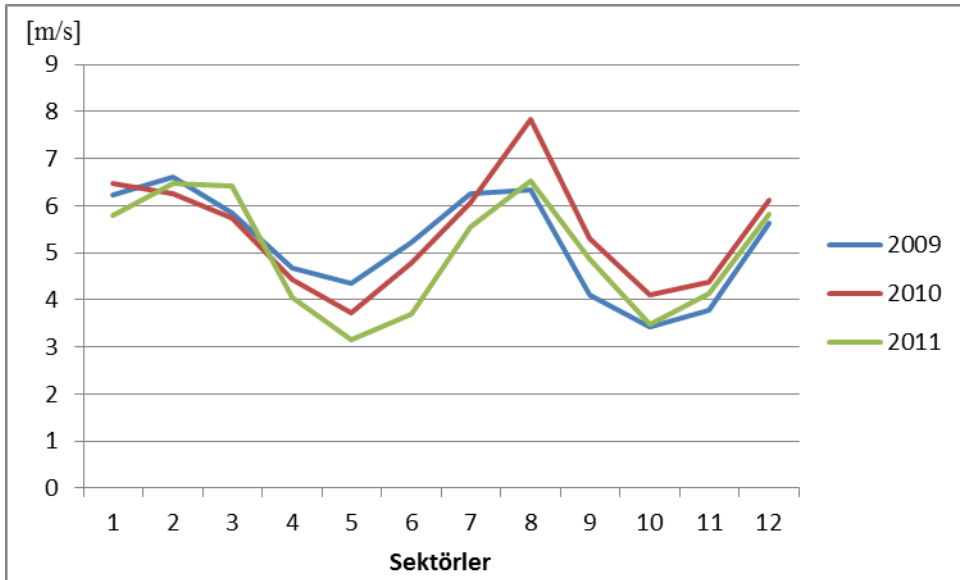
İkinci aşamada ise diğerlerine göre daha uygun konumda olan bir türbinden alınan 78 metredeki rüzgar verileri kullanılarak rüzgar çiftliği enerji üretimi hesaplanmıştır. WASP, WindPRO ve WindFarmer için 3 yıla ait verilere göre yapılan data analizleri sonucu sektör bazındaki ortalama rüzgar hızları Şekil 6.17’de yer almaktadır. 2009 yılına ait ortalama rüzgar hızı 5.96 m/s, 2010 yılına ait ortalama rüzgar hızı 6.14 m/s ve 2011 yılına ait ortalama rüzgar hızı ise 5.99 m/s olarak bulunmuştur. Rüzgar hızlarındaki bu değişiklik hava koşullarında yıllara göre mevsimsel olarak meydana gelen değişimlerden kaynaklanmaktadır.

WindSim için 3 yıla ait verilere göre yapılan data analizleri sonucu sektör bazındaki ortalama rüzgar hızları Şekil 6.18’de yer almaktadır. 2009 yılına ait ortalama rüzgar hızı 6.06 m/s, 2010 yılına ait ortalama rüzgar hızı 6.32 m/s ve 2011 yılına ait ortalama rüzgar hızı ise 6.15 m/s olarak bulunmuştur.

Hesaplanan bu iki farklı senaryo, çiftliğin o yıla ait gerçek üretim dataları ile karşılaştırılmış ve programların gerçeğe göre ne kadar tutarlı sonuçlar verdiği irdelenmiştir.

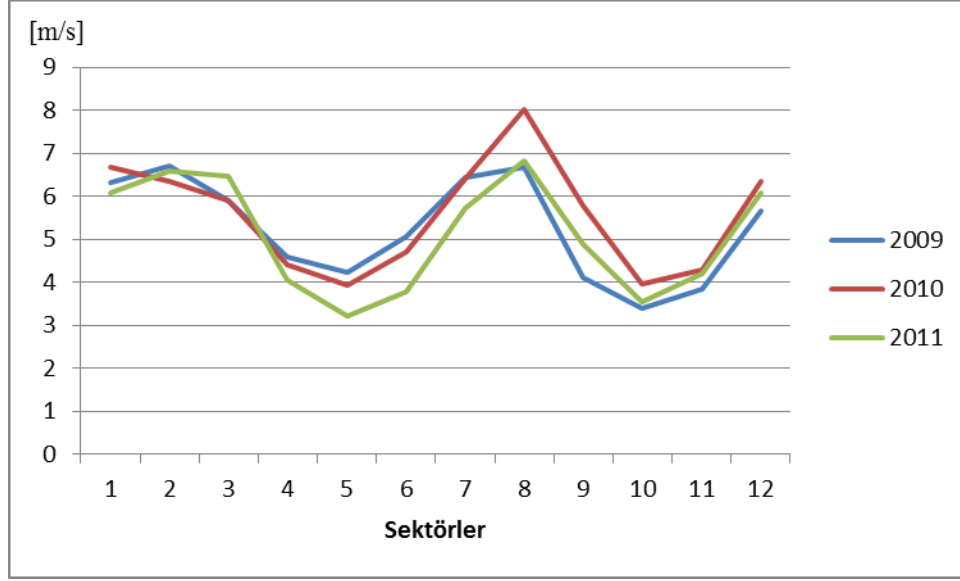


Şekil 6.16 : WindSim’e ait bir yıllık 10 dakikalık 10, 30 ve 50 metredeki ölçüm verilerinin sektörlere göre ortalama hız dağılımı.



Şekil 6.17 : WAsP, WindPRO ve WindFarmer için Türbin 2’de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verilerinin sektörlere göre ortalama hız dağılımı.

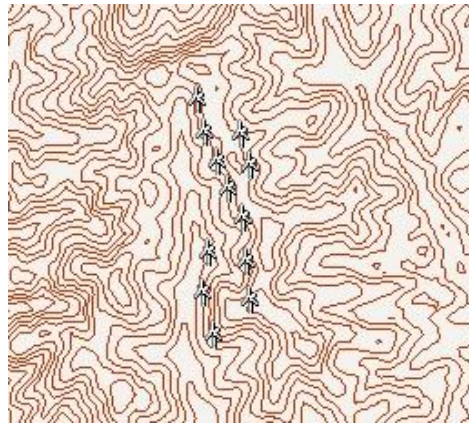
Tek türbin için yapılan hesaplamalarda 2 yıllık ölçüm verileri birlikte kullanılmasına rağmen, santral üretim hesaplamalarında ise 3 yıla ait üretimlerin karşılaştırılabilmesi için her yılın dataları ayrı ayrı kullanılmıştır.



Şekil 6.18 : WindSim için Türbin 2’de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verilerinin sektörlere göre ortalama hız dağılımı.

6.2.1 Rüzgar çiftliği için WAsP programından elde edilen sonuçlar

Rüzgar çiftliği hesaplamaları farklı iki data seti kullanılarak yapılacağından bunları ayrı başlıklar altında incelemek yerinde olacaktır. Öncelikle bir yıllık 10, 30 ve 50 metrede yer alan anemometrelerden alınan ölçüm verileri kullanılarak çiftlik hesabı yapılmış ve sonuçları verilmiştir. Sonrasında ise diğer türbinlere göre daha uygun konumda olan 2 numaralı türbinde 78 metrede yer alan anemometreden alınan veriler kullanılarak çiftlik hesabı yapılmış ve sonuçları verilmiştir. Şekil 6.19’da çiftlik hesabı için kullanılacak türbinlerin koordinatlarına göre saha yerleşimleri yer almaktadır.



Şekil 6.19 : WAsP’tan alınan rüzgar çiftliğine ait harita.

6.2.1.1 WAsP programında ölçüm direği verileri kullanılarak

Bir yıla ait rüzgar datalarının WAsP programına girilmesi ile elde edilen sektörlere ait ortalama rüzgar hızları Şekil 6.12’de yer almaktadır.

Türbin yerleşimleri ve rüzgar datası analizi işlemlerinden sonra yapılan hesaplamalar neticesinde Çizelge 6.9’da yer alan sonuçlara ulaşılmıştır. Bu çizelgede ölçüm direğinde 10, 30 ve 50 metre yüksekliklerde bulunan anemometrelerden alınan veriler kullanılarak elde edilen türbinlerin üreteceği yıllık enerji miktarları yer almaktadır.

Çizelge 6.9 : WAsP programında 10, 30 ve 50 metredeki ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri.

Türbin No.	Net Enerji Üretimi [MWh]		
	10 m.	30 m.	50 m.
T1	2616	3880	3835
T2	3497	5028	4894
T3	2811	4106	4016
T4	2440	3634	3591
T5	3035	4445	4369
T6	3080	4444	4368
T7	2627	3855	3921
T8	2749	4107	4047
T9	2874	4250	4184
T10	2951	4305	4217
T11	2923	4317	4230
T12	3205	4628	4523
Toplam	34808	51099	50195

6.2.1.2 WAsP programında türbin yüksekliğindeki veriler kullanılarak

Ölçüm verileri kullanılarak yapılan hesaplamalardan sonra 2 numaralı türbinde bulunan anemometreden alınan üç yıllık rüzgar verisine ait grafik Şekil 6.14’te yer almaktadır.

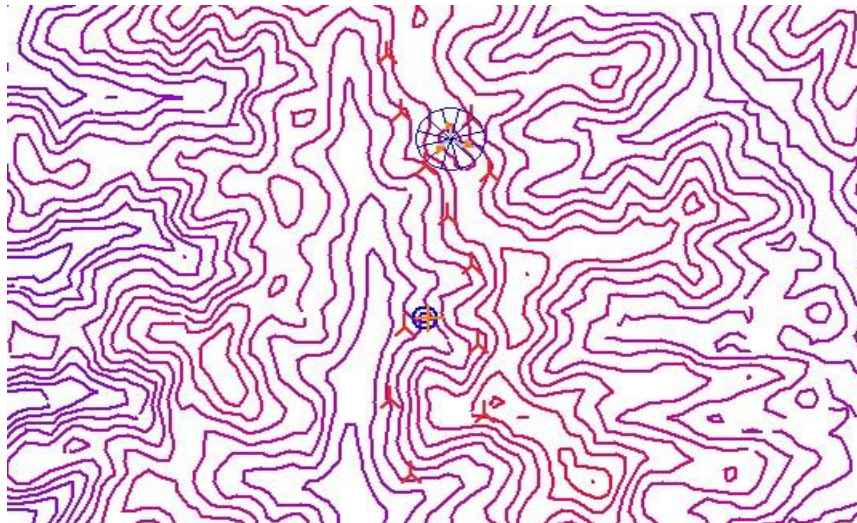
Türbin yerleşimleri ve rüzgar datası analizi işlemlerinden sonra yapılan hesaplamalar neticesinde Çizelge 6.10’da yer alan sonuçlara ulaşılmıştır. Bu çizelgede Türbin 2’de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri yer almaktadır.

Çizelge 6.10 : WAsP programında 2009, 2010 ve 2011 yılları için Türbin 2’de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri.

Türbin No.	Net Enerji Üretimi [MWh]		
	2009	2010	2011
T1	3353	3790	3288
T2	4455	4827	4493
T3	3542	3991	3506
T4	3140	3586	3135
T5	3984	4338	4083
T6	3923	4318	3995
T7	3529	3908	3574
T8	3691	4054	3779
T9	3748	4162	3793
T10	3751	4191	3784
T11	3818	4221	3888
T12	4074	4492	4150
Toplam	45008	49878	45468

6.2.2 Rüzgar çiftliği için WindPRO programından elde edilen sonuçlar

WAsP için yapılan işlemler tekrarlanmış ve önce ölçüm direğinden alınan veriler kullanılarak daha sonra ise türbin yüksekliğinde alınan ölçüm verileri ile hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. WindPRO’dan alınan türbin yerleşimlerini gösteren harita Şekil 6.20’de yer almaktadır.



Şekil 6.20 : WindPRO’dan alınan rüzgar çiftliğine ait harita.

6.2.2.1 WindPRO programında ölçüm direği verileri kullanılarak

Bir yıla ait rüzgar datalarının WindPRO programına girilmesi ile elde edilen sektörlere ait ortalama rüzgar hızları Şekil 6.12’de yer almaktadır.

Türbin yerleşimleri ve rüzgar datası analizi işlemlerinden sonra yapılan hesaplamalar neticesinde Çizelge 6.11’de yer alan sonuçlara ulaşılmıştır. Bu çizelgede ölçüm direğinde 10, 30 ve 50 metre yüksekliklerde bulunan anemometrelerden alınan veriler kullanılarak elde edilen türbinlerin üreteceği yıllık enerji miktarları yer almaktadır.

Çizelge 6.11 : WindPRO programında 10, 30 ve 50 metredeki ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri.

Türbin No.	Net Enerji Üretimi [MWh]		
	10 m.	30 m.	50 m.
T1	2911	3838	3651
T2	4084	5196	4833
T3	3161	4082	3821
T4	2699	3543	3360
T5	3575	4563	4266
T6	3655	4586	4287
T7	2991	3955	3739
T8	3124	4086	3830
T9	3179	4173	3937
T10	3337	4299	4027
T11	3434	4450	4148
T12	3832	4842	4508
Toplam	39982	51611	48408

6.2.2.2 WindPRO programında türbin yüksekliğindeki veriler kullanılarak

Ölçüm verileri kullanılarak yapılan hesaplamalardan sonra 2 numaralı türbinde bulunan anemometreden alınan üç yıllık rüzgar verisine ait grafik Şekil 6.14’te yer almaktadır.

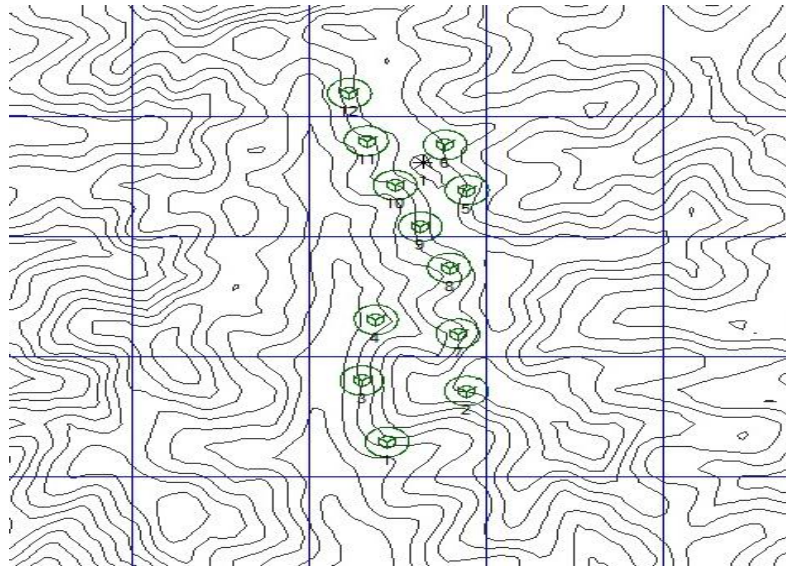
Türbin yerleşimleri ve rüzgar datası analizi işlemlerinden sonra yapılan hesaplamalar neticesinde Çizelge 6.12’de yer alan sonuçlara ulaşılmıştır. Bu çizelgede Türbin 2’de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri yer almaktadır.

Çizelge 6.12 : WindPRO programında 2009, 2010 ve 2011 yılları için Türbin 2’de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri.

Türbin No.	Net Enerji Üretimi [MWh]		
	2009	2010	2011
T1	3381	3850	3222
T2	4415	4788	4366
T3	3537	4015	3430
T4	3116	3612	3045
T5	3959	4325	4004
T6	3911	4333	3955
T7	3462	3854	3453
T8	3569	3946	3604
T9	3572	4035	3533
T10	3654	4148	3629
T11	3837	4265	3868
T12	4126	4577	4173
Toplam	44537	49749	44282

6.2.3 Rüzgar çiftliği için WindFarmer programından elde edilen sonuçlar

WAsP ve WindPRO için yapılan işlemler tekrarlanarak ve önce ölçüm direğinden alınan veriler kullanılarak daha sonra ise türbin yüksekliğinde alınan ölçüm verileri ile hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. WindFarmer’den alınan türbin yerleşimlerini gösteren harita Şekil 6.21’de yer almaktadır.



Şekil 6.21 : WindFarmer’den alınan rüzgar çiftliğine ait harita.

6.2.3.1 WindFarmer programında ölçüm direği verileri kullanılarak

Bir yıla ait rüzgar datalarının WindFarmer programına girilmesi ile elde edilen sektörlere ait ortalama rüzgar hızları Şekil 6.12’de yer almaktadır.

Türbin yerleşimleri ve rüzgar datası analizi işlemlerinden sonra yapılan hesaplamalar neticesinde Çizelge 6.13’te yer alan sonuçlara ulaşılmıştır. Bu çizelgede ölçüm direğinde 10, 30 ve 50 metre yüksekliklerde bulunan anemometrelerden alınan veriler kullanılarak elde edilen türbinlerin üreteceği yıllık enerji miktarları yer almaktadır.

Çizelge 6.13 : WindFarmer programında 10, 30 ve 50 metredeki ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri.

Türbin No.	Net Enerji Üretimi [MWh]		
	10 m.	30 m.	50 m.
T1	2480	3742	3436
T2	3250	4735	4325
T3	2576	3853	3528
T4	2338	3533	3252
T5	2912	4291	3899
T6	2944	4314	3922
T7	2623	3908	3569
T8	2713	4026	3655
T9	2746	4070	3735
T10	2771	4127	3772
T11	2796	4166	3790
T12	3000	4433	4033
Toplam	33149	49198	44916

6.2.3.2 WindFarmer programında türbin yüksekliğindeki veriler kullanılarak

Ölçüm verileri kullanılarak yapılan hesaplamalardan sonra 2 numaralı türbinde bulunan anemometreden alınan üç yıllık rüzgar verisine ait grafik Şekil 6.14’te yer almaktadır.

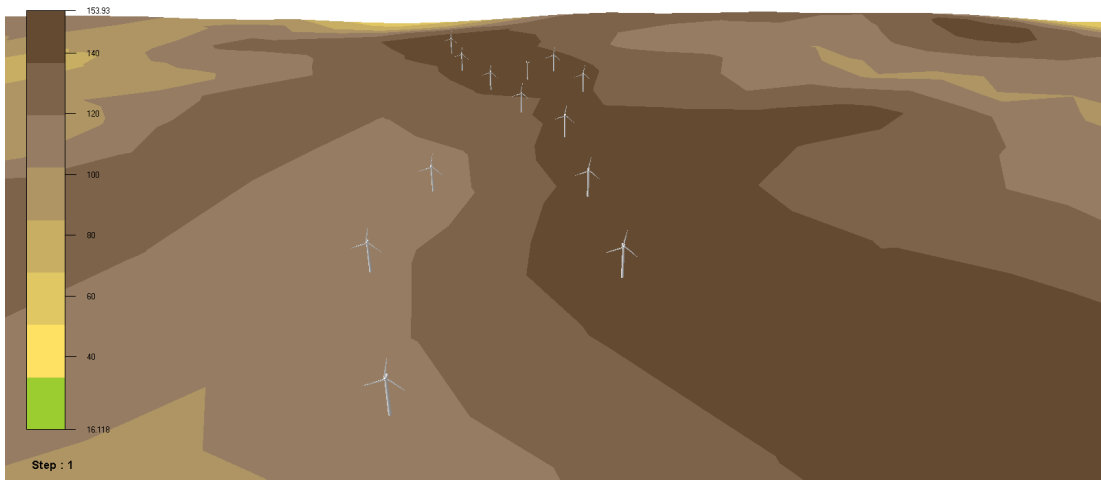
Türbin yerleşimleri ve rüzgar datası analizi işlemlerinden sonra yapılan hesaplamalar neticesinde Çizelge 6.14’te yer alan sonuçlara ulaşılmıştır. Bu çizelgede Türbin 2’de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri yer almaktadır.

Çizelge 6.14 : WindFarmer programında 2009, 2010 ve 2011 yılları için Türbin 2’de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri.

Türbin No.	Net Enerji Üretimi [MWh]		
	2009	2010	2011
T1	3378	3850	3362
T2	4378	4788	4505
T3	3591	4082	3602
T4	3201	3661	3212
T5	3888	4302	4001
T6	3861	4300	3962
T7	3486	3929	3544
T8	3634	4054	3715
T9	3693	4153	3792
T10	3748	4219	3818
T11	3777	4231	3866
T12	4012	4446	4115
Toplam	44647	50015	45494

6.2.4 Rüzgar çiftliği için WindSim programından elde edilen sonuçlar

Diğer programlar için yapılan işlemler tekrarlanarak ve önce ölçüm direğinden alınan veriler kullanılarak daha sonra ise türbin yüksekliğinde alınan ölçüm verileri ile hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. WindSim’den alınan türbin yerleşimlerini gösteren harita Şekil 6.22’de yer almaktadır.



Şekil 6.22 : WindSim’den alınan rüzgar çiftliğine ait 3 boyutlu harita.

6.2.4.1 WindSim programında ölçüm direği verileri kullanılarak

Bir yıla ait rüzgar datalarının WindSim programına girilmesi ile elde edilen sektörlere ait ortalama rüzgar hızları Şekil 6.13'te yer almaktadır.

Türbin yerleşimleri ve rüzgar datası analizi işlemlerinden sonra yapılan hesaplamalar neticesinde Çizelge 6.15'te yer alan sonuçlara ulaşılmıştır. Bu çizelgede ölçüm direğinde 10, 30 ve 50 metre yüksekliklerde bulunan anemometrelerden alınan veriler kullanılarak elde edilen türbinlerin üreteceği yıllık enerji miktarları yer almaktadır.

Çizelge 6.15 : WindFarmer programında 10, 30 ve 50 metredeki ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri.

Türbin No.	Net Enerji Üretimi [MWh]		
	10 m.	30 m.	50 m.
T1	4332	4989	4379
T2	4937	5628	4901
T3	4256	4870	4233
T4	4287	4873	4250
T5	4771	5360	4632
T6	4958	5547	4807
T7	4918	5587	4863
T8	5008	5663	4920
T9	4710	5320	4606
T10	5038	5680	4922
T11	5094	5714	4941
T12	5289	5916	5133
Toplam	57597	65148	56585

6.2.4.2 WindSim programında türbin yüksekliğindeki veriler kullanılarak

Ölçüm verileri kullanılarak yapılan hesaplamalardan sonra 2 numaralı türbinde bulunan anemometreden alınan üç yıllık rüzgar verisine ait grafik Şekil 6.15'te yer almaktadır.

Türbin yerleşimleri ve rüzgar datası analizi işlemlerinden sonra yapılan hesaplamalar neticesinde Çizelge 6.16'da yer alan sonuçlara ulaşılmıştır. Bu çizelgede Türbin 2'de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri yer almaktadır.

Çizelge 6.16 : WindSim programında 2009, 2010 ve 2011 yılları için Türbin 2’de yer alan 78 metre yüksekliğindeki anemometreye ait üç yıllık 10 dakikalık ölçüm verileri kullanılarak elde edilen türbin bazındaki enerji üretim verileri.

Türbin No.	Net Enerji Üretimi [MWh]		
	2009	2010	2011
T1	3677	4157	3641
T2	4231	4648	4353
T3	3589	4053	3633
T4	3576	4054	3641
T5	4042	4443	4261
T6	4214	4648	4447
T7	4169	4589	4350
T8	4263	4676	4480
T9	3967	4407	4151
T10	4293	4740	4527
T11	4353	4764	4630
T12	4528	4954	4834
Toplam	48901	54154	50947

6.2.5 Sonuçların karşılaştırılması

10, 30 ve 50 metrede yer alan anemometrelerden alınan ölçüm verileri ile yapılan üretim hesaplamalarını, santralin SCADA sisteminden alınan yıllık üretim verileriyle karşılaştırdığımızda Çizelge 6.17’de yer alan sonuçlara ulaşılmaktadır. Buradan görüldüğü üzere 10 metrede alınan ölçümler ile gerçek değerler arasında çok ciddi sapmalar olduğu görülmektedir. 30 metre ve 50 metre verileri kullanıldığında ise sonuçların daha yakın olduğu görülmektedir.

Programların ölçüm verileri ile gerçek değerler arasındaki sapmalar Çizelge 6.18’de yer almaktadır.

Çizelge 6.17 : Ölçüm verileri kullanılarak elde edilen üretim değerleri ve santralin gerçek üretimi [MWh].

Türbin No.	WAsP			WindPRO			WindFarmer			WindSim			Gerçek üretim değeri
	10 m.	30 m.	50 m.	10 m.	30 m.	50 m.	10 m.	30 m.	50 m.	10 m.	30 m.	50 m.	
T1	2616	3880	3835	2911	3838	3651	2480	3742	3436	4332	4989	4379	3269
T2	3497	5028	4894	4084	5196	4833	3250	4735	4325	4937	5628	4901	5011
T3	2811	4106	4016	3161	4082	3821	2576	3853	3528	4256	4870	4233	3121
T4	2440	3634	3591	2699	3543	3360	2338	3533	3252	4287	4873	4250	2638
T5	3035	4445	4369	3575	4563	4266	2912	4291	3899	4771	5360	4632	4517
T6	3080	4444	4368	3655	4586	4287	2944	4314	3922	4958	5547	4807	4483
T7	2627	3855	3921	2991	3955	3739	2623	3908	3569	4918	5587	4863	2430
T8	2749	4107	4047	3124	4086	3830	2713	4026	3655	5008	5663	4920	3169
T9	2874	4250	4184	3179	4173	3937	2746	4070	3735	4710	5320	4606	4073
T10	2951	4305	4217	3337	4299	4027	2771	4127	3772	5038	5680	4922	4079
T11	2923	4317	4230	3434	4450	4148	2796	4166	3790	5094	5714	4941	4415
T12	3205	4628	4523	3832	4842	4508	3000	4433	4033	5289	5916	5133	5069
Toplam	34808	51099	50195	39982	51611	48408	33149	49198	44916	57597	65148	56585	46254

Çizelge 6.18 : Ölçüm verileri kullanılarak elde edilen üretim değerleri ile santralin gerçek üretimi arasındaki bağıl hata oranları (%).

Türbin No.	WAsP			WindPRO			WindFarmer			WindSim		
	10 m.	30 m.	50 m.	10 m.	30 m.	50 m.	10 m.	30 m.	50 m.	10 m.	30 m.	50 m.
T1	-20.0	18.7	17.3	-10.9	17.4	11.7	-24.1	14.5	5.1	32.5	52.6	33.9
T2	-30.2	0.3	-2.3	-18.5	3.7	-3.6	-35.1	-5.5	-13.7	-1.5	12.3	-2.2
T3	-9.9	31.6	28.7	1.3	30.8	22.4	-17.5	23.5	13.0	36.4	56.0	35.6
T4	-7.5	37.8	36.1	2.3	34.3	27.4	-11.4	33.9	23.3	62.5	84.7	61.1
T5	-32.8	-1.6	-3.3	-20.9	1.0	-5.6	-35.5	-5.0	-13.7	5.6	18.7	2.6
T6	-31.3	-0.9	-2.6	-18.5	2.3	-4.4	-34.3	-3.8	-12.5	10.6	23.7	7.2
T7	8.1	58.6	61.4	23.1	62.7	53.9	7.9	60.8	46.9	102.4	129.9	100.1
T8	-13.3	29.6	27.7	-1.4	28.9	20.9	-14.4	27.0	15.3	58.0	78.7	55.2
T9	-29.4	4.3	2.7	-22.0	2.4	-3.3	-32.6	-0.1	-8.3	15.6	30.6	13.1
T10	-27.7	5.5	3.4	-18.2	5.4	-1.3	-32.1	1.2	-7.5	23.5	39.3	20.7
T11	-33.8	-2.2	-4.2	-22.2	0.8	-6.0	-36.7	-5.6	-14.2	15.4	29.4	11.9
T12	-36.8	-8.7	-10.8	-24.4	-4.5	-11.1	-40.8	-12.5	-20.4	4.3	16.7	1.3
Toplam	-24.7	10.5	8.5	-13.6	11.6	4.7	-28.3	6.4	-2.9	24.5	40.8	22.3

3 yıla ait olan ve 2 numaralı türbinde 78 metrede bulunan anemometreden alınan veriler kullanılarak yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar Çizelge 6.19’da yer almaktadır.

Ölçüm verileri kullanılarak yapılan hesaplamalarda santral toplamında 10 metre için WindFarmer %28, WAsP %25, WindSim %24, WindPRO ise %14’lük bir sapma yapmıştır. 10 metre verileri ciddi sapmalara neden olduğu için projelerde kullanımı pek tercih edilmez. 30 metre için en yüksek hata oranını %41 ile WindSim verirken, WindPRO %12, WAsP %10, WindFarmer ise %6 ile en düşük hata oranını vermiştir. Her ne kadar 10 metreye göre daha iyi sonuçlar alınsa da bu oranlardaki hatalar hesaplamalarda beklenmeyen sonuçların elde edilmesine neden olmaktadır. 50 metre verilerine bakarsak, WindSim %22 ile en kötü sonucu verirken, WAsP %9, WindPRO %5 ve WindFarmer ise %3’lük bir hata oranıyla gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Çizelge 6.19’dan da görüldüğü üzere 78 metrede yer alan anemometreden alınan ölçümlerle elde edilen sonuçlar 50 metredeki anemometreden alınan ölçümlerle elde edilen sonuçlara göre daha iyidir. Bu sonuçlara ait hata oranları Çizelge 6.20’de yer almaktadır.

2009 yılına ait verilerde en iyi sonucu %2.7 ile WAsP verirken WindFarmer %3.5, WindPRO %3.7, WindSim ise %5.7’lik hata oranlarıyla hesaplama yapmıştır. 2010 yılına ait sonuçlar şaşırtıcı derecede iyidir. WindPRO %0.1, WAsP %0.3, WindFarmer %0.6 ile %1’in altındaki oranlarda hata paylarına sahipken, WindSim ise %8.9’luk hata payıyla hesaplama yapmıştır. En tutarsız yıl olarak görünen 2011’de ise WindFarmer ile WAsP %5.4, WindSim %6 ve WindPRO %7.9’luk hata oranlarıyla hesaplama yapmışlardır.

Çizelgelerden görüldüğü üzere 50 metreden alınan verilerle %2.9 ile %8.5 arasında yaklaşık sonuçlar veren programlar göbek yüksekliği olan 78 metreden alınan verilerle gerçeğe %0.1 ile %8.9 arasında yakın sonuç vermiştir.

Çizelge 6.19 : Türbin yüksekliğindeki ölçüm verileri kullanılarak elde edilen üretim değerleri ve santralin gerçek üretimi [MWh].

Türbin No.	WAsP			WindPRO			WindFarmer			WindSim			Gerçek değerler		
	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011
T1	3353	3790	3288	3381	3850	3222	3378	3850	3362	3677	4157	3641	3269	3710	3186
T2	4455	4827	4493	4415	4788	4366	4378	4788	4505	4231	4648	4353	5011	5158	5023
T3	3542	3991	3506	3537	4015	3430	3591	4082	3602	3589	4053	3633	3121	3491	3102
T4	3140	3586	3135	3116	3612	3045	3201	3661	3212	3576	4054	3641	2638	3045	2711
T5	3984	4338	4083	3959	4325	4004	3888	4302	4001	4042	4443	4261	4517	4643	4771
T6	3923	4318	3995	3911	4333	3955	3861	4300	3962	4214	4648	4447	4483	4868	4866
T7	3529	3908	3574	3462	3854	3453	3486	3929	3544	4169	4589	4350	2430	2889	2766
T8	3691	4054	3779	3569	3946	3604	3634	4054	3715	4263	4676	4480	3169	3417	3326
T9	3748	4162	3793	3572	4035	3533	3693	4153	3792	3967	4407	4151	4073	4325	4249
T10	3751	4191	3784	3654	4148	3629	3748	4219	3818	4293	4740	4527	4079	4326	4248
T11	3818	4221	3888	3837	4265	3868	3777	4231	3866	4353	4764	4630	4415	4582	4615
T12	4074	4492	4150	4126	4577	4173	4012	4446	4115	4528	4954	4834	5069	5263	5220
Toplam	45008	49878	45468	44537	49749	44282	44647	50015	45494	48901	54154	50947	46254	49717	48081

Çizelge 6.20 : Türbin yüksekliğindeki ölçüm verileri kullanılarak elde edilen üretim değerleri ile santralin gerçek üretimi arasındaki bağıl hata oranları.

Türbin No.	WAsP			WindPRO			WindFarmer			WindSim		
	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011
T1	2.6	2.2	3.2	3.4	3.8	1.1	3.3	3.8	5.5	12.5	12.1	14.3
T2	-11.1	-6.4	-10.6	-11.9	-7.2	-13.1	-12.6	-7.2	-10.3	-15.6	-9.9	-13.3
T3	13.5	14.3	13.0	13.3	15.0	10.6	15.1	16.9	16.1	15.0	16.1	17.1
T4	19.0	17.8	15.6	18.1	18.6	12.3	21.3	20.2	18.5	35.6	33.1	34.3
T5	-11.8	-6.6	-14.4	-12.4	-6.8	-16.1	-13.9	-7.3	-16.1	-10.5	-4.3	-10.7
T6	-12.5	-11.3	-17.9	-12.8	-11.0	-18.7	-13.9	-11.7	-18.6	-6.0	-4.5	-8.6
T7	45.2	35.3	29.2	42.5	33.4	24.8	43.5	36.0	28.1	71.6	58.8	57.3
T8	16.5	18.6	13.6	12.6	15.5	8.4	14.7	18.6	11.7	34.5	36.8	34.7
T9	-8.0	-3.8	-10.7	-12.3	-6.7	-16.9	-9.3	-4.0	-10.8	-2.6	1.9	-2.3
T10	-8.0	-3.1	-10.9	-10.4	-4.1	-14.6	-8.1	-2.5	-10.1	5.2	9.6	6.6
T11	-13.5	-7.9	-15.8	-13.1	-6.9	-16.2	-14.5	-7.7	-16.2	-1.4	4.0	0.3
T12	-19.6	-14.6	-20.5	-18.6	-13.0	-20.1	-20.9	-15.5	-21.2	-10.7	-5.9	-7.4
Santral toplamı	-2.7	0.3	-5.4	-3.7	0.1	-7.9	-3.5	0.6	-5.4	5.7	8.9	6.0

7. SONUÇLAR

Rüzgar enerjisinin elektrik üretiminde hissedilir seviyelerde artış göstermesi, fosil kaynakların çevreye olan zararlarının yadsınamaz boyutlara ulaşması, katlanarak artan enerji ihtiyacı ve artan enerji maliyetlerine bağlı olarak rüzgar enerjisinden üretilen elektriğin maliyetinde meydana gelen düşüşler rüzgar enerjisinin gelişmesini kolaylaştıran faktörlerdir.

Diğer yandan rüzgarın sürekli ve düzenli olmayışı, rüzgar enerjisinden üretilecek elektrik enerjisinin hesaplanmasını zorlaştırmaktadır. Bu sebepten rüzgar ölçümleri en az bir yıl olmak üzere genellikle 2 - 3 yıl boyunca yapılmakta ve hem sahaya özgü alınan ölçümler hem de sahaya yakın konumda bulunan uzun yıllar boyunca alınmış rüzgar verileri kullanılarak bölgenin rüzgar karakteristiği çıkarılmaktadır. Rüzgar hızı ve rüzgar enerjisi hesabında kullanılan programlar da en az yapılan ölçümler kadar sonuçlarda etkili olmaktadır. Piyasada pek çok program olmasına rağmen bunlardan en fazla kullanılanları olan WAsP, WindPRO, WindFarmer ve WindSim ile birlikte genellikle daha kolay hesaplamalar için kullanılan programlar olan Windographer, Homer ve RETScreen programları bu çalışmada yer almaktadır.

Bu çalışma kapsamında yapılan hesaplamalarda, sahada tek türbin yer alması durumunda elde edilen sonuçlarda 10 metreden alınan ölçümlere göre programlar arasında maksimum %20'lik farklı sonuçlar çıktığı görülmektedir. 30 metreden alınan ölçümlerle yapılan hesaplamalarda bu farklılık %10 seviyelerine düşmüştür. 50 metreden alınan ölçümlerde yapılan hesaplamalarda ise Homer ve RETScreen diğer programlara göre %10'un üzerinde farklı sonuçlar verirken diğer programlar birbirlerine %8 ve altında yakın sonuçlar vermektedir. Hesaplamalar on farklı türbinle yapıldığından ve türbinlerin gerçek üretim değerleri bilinmediğinden ancak programların birbirleriyle olan farklılıkları ifade edilmektedir. Bu kısımda yapılan hesaplamalardan çıkarılabilecek sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

- Ölçüm yüksekliği arttıkça programların hesaplama değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır.

- Akış alan modellemeli programlar olan WAsP, WindPRO, WindFarmer ve WindSim birbirlerine 30 ve 50 metreden alınan ölçümler kullanıldığında yakın sonuçlar vermesine rağmen 10 metreden alınan ölçümler kullanıldığında ise programlar arasında ciddi farklar meydana gelmektedir.
- Windographer saha etkisini hesaba katmamasına rağmen sahaya ait olan alfa katsayısı programa girilerek hesaplama yapıldığında akış alan modellemeli programlara oldukça yakın sonuçlar vermektedir.
- Homer ve RETScreen'in, 30 ve 50 metrelerden alınan veriler kullanılarak yapılan hesaplamalarda sahaya ait alfa katsayısı kullanılması durumunda diğer programlara göre %5 ile %10 arasında yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. 10 metre verileri ise ciddi sapmalara neden olmaktadır.
- Sahaya ait olan alfa katsayısı değeri girildiğinde lineer hesaplamalı programlar, akış alan modellemeli programlara %10 seviyelerinde yakın sonuç vermektedir. Sahadan bağımsız 0.14 değeri kullanıldığında ise farklılıklar %60'lara kadar varmaktadır.
- Söylenen değerler on türbin için ortalama olarak ifade edilmektedir. Bu değerlerin türbin bazında farklı olduğu görülmekte ve sahadan sahaya farklılık göstereceği düşünülmektedir.

Tek türbin için yapılan hesaplamalardan sonra 12 adet türbinden oluşan 24 MW gücündeki rüzgar santrali hesaplamaları yapılmıştır. Bu kısımda rüzgar ölçüm direğinden alınan verilerin yanı sıra türbin göbek yüksekliğinde yer alan anemometreden alınan ölçüm verileri de kullanılmış ve sonuçlar türbinlerin gerçek üretim değerleri ile karşılaştırılmıştır. Buradan çıkarılan sonuçlar aşağıda özetlenmektedir;

- Ölçüm verileri ile yapılan hesaplamalarda 10 metreden alınan datalar kullanıldığında tüm programlarda gerçek verilerden %15'in üzerinde sapmalar olduğu görülmektedir. 30 metre için WAsP, WindPRO ve WindFarmer %10'un altında hata oranlarına sahipken, WindSim %40 hata oranına sahiptir. 50 metreden alınan veriler için ise sonuçlar WindSim hariç %8'in altındadır. WindSim %20'nin üzerinde hata oranına sahiptir.

- Programlar üretimleri fazla olan türbinler için yaklaşık tahmin yaparken, diğer türbinlere göre daha düşük üretim yapan türbinlerde ise hesaplamalarda ciddi farklılıklar olmuştur.
- Türbinler bazında bakıldığında sonuçlarda farklılıklar olmasına rağmen santral üretimi gerçek değerlerle karşılaştırıldığında yakın sonuçlar çıktığı görülmektedir.
- Türbin göbek yüksekliğinde yer alan veriler kullanılarak yapılan hesaplamalarda gerçek değerlere oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Dört program da yıllara göre değişmekle birlikte genel olarak %8'in altında olacak şekilde yakın sonuçlar vermiştir.
- Ölçüm verileri kullanılarak yapılan hesaplamalarda 50 metre için en yakın değeri WindPRO verirken, göbek yüksekliği verileri kullanıldığında ise WAsP daha iyi sonuçlar vermiştir.

Programlarla yapılan hesaplamalarda çalışma içerisinde yer alan koşullar dahilinde işlemlerin gerçekleştiği saha için elde edilen sonuçlar, 50 metre ve türbin göbek yüksekliği verileri kullanıldığında santral bazında oldukça iyidir. Türbin bazında sapmalar meydana gelmesine rağmen santral üretim sonuçlarının genellikle %5 seviyelerinde olduğu görülmüştür. Farklı saha ve türbin tipleri için yapılacak hesaplamalarda daha farklı sonuçlar çıkabileceği unutulmamalıdır.

Hesaplamalar neticesinde türbin göbek yüksekliğine yakın seviyelerde yapılan ölçümlerin enerji tahmininde çok önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir. Bu veriler ışığında görülmektedir ki, kurulacak olan ölçüm direklerinin sahaya hakim bir yerde konumlandırılmaları ve ölçümlerin de türbin göbek yüksekliği seviyesinde alınması yatırımın teknik ve ekonomik olarak daha doğru bir şekilde ifade edilmesini sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

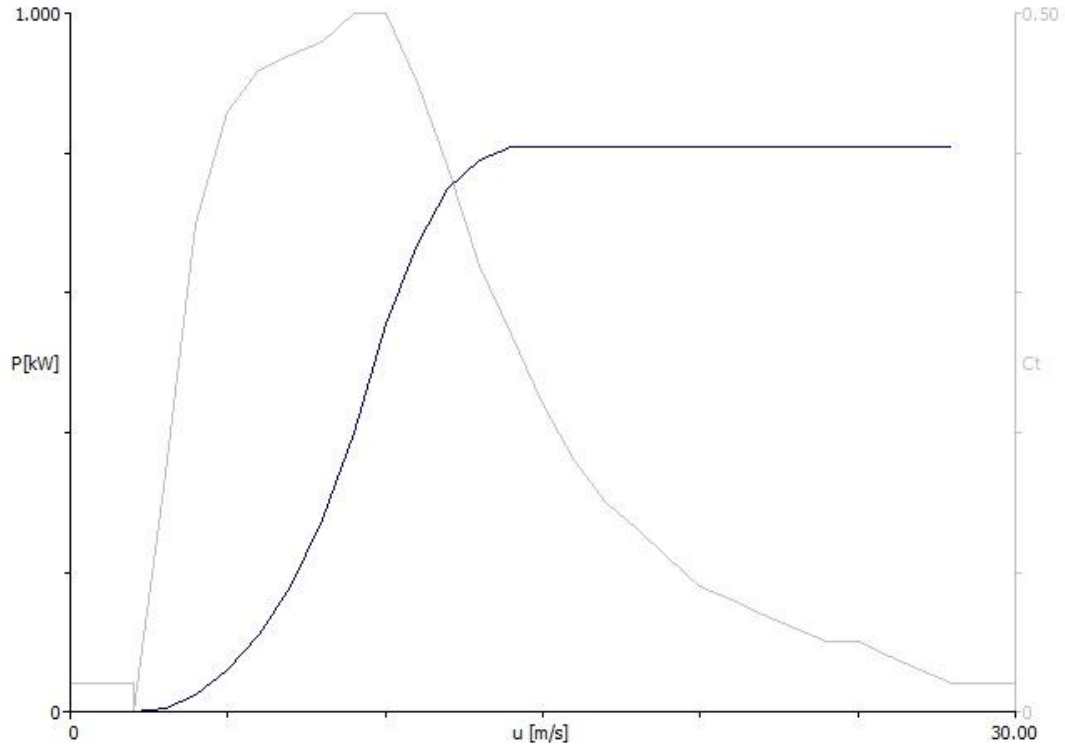
- [1] **Çengel Y. A., Boles M.** (2005). Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik, Literatür.
- [2] **Exxonmobil.** (2012). The Outlook for Energy: A View to 2040.
- [3] **REN21,** Renewables 2013, Global Status Report.
- [4] **U.S. Department of Energy,** 2012 Renewable Energy Data Book, p. 41-48.
- [5] **WindSIM,** Torrild, Case study.
- [6] **Berge E., Gravdahl A. R., Schelling J., Tallhaug L., Undheim O.,** Wind in complex terrain. A comparison of WAsP and two CFD-models.
- [7] **Nielsen P.** (2002). Comparing WindPRO and Windfarmer wake loss calculation.
- [8] **Pauen R.,** Vertical profiles with WindSim and WAsP Comparing several cases.
- [9] **Steinbach E.** (2007). Comparison of measured wind profiles with WindSim calculations.
- [10] **Menteş, S.** (2009). Rüzgar Enerjisi Ders Notları, İTÜ.
- [11] **GWEC,** Global Wind Statistics 2013.
- [12] **Url-1** <http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/ruzgar_ruzgar_atlas.html>, alındığı tarih: 13.03.2012.
- [13] **Malkoç, Y.** (2007). Numerik Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası, 26. Enerji Verimliliği Haftası Konferansı, Ankara.
- [14] **Url-2** <www.eie.gov.tr>, alındığı tarih: 13.03.2012.
- [15] **TUREB,** Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu Temmuz 2012.
- [16] **DPT.** (2009). Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi.
- [17] **Patel, M.R.** (2006). Wind and Solar Power System Desing Analysis and Operation, Taylor & Francis, Raton.
- [18] **Justus, C. C.** (1978). Winds and Wind System Perjonnance, Frankliu Institute Press, Philadelphia, PA.
- [19] **Counihan, J.** (1975). Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A Review and Analysis of Data Collected from the Period 1880- 1972. *Atmospheric Environment*, 9, 871-905.
- [20] **Spera, D. A. (ed.).** (1994). Wind Turbine TechnoZogy: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, ASME Press, New York.

- [21] **Akpınar E. K. ve Akpınar S.** (2005). A statistical analysis of wind speed data used in installation of wind energy conversion systems, *Energy Conversion and Management*, Vol. **46**, pp. 515-532.
- [22] **Akdağ S.A, Dinler A. ve Menteş Ş. S.** (2007). Rüzgar Karakteristiğinin Analizi, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu 07*, Gaziantep, Kasım 1-3.
- [23] **Barutçu, B.** (2012). Rüzgar Enerjisi Ders Notları, İTÜ.
- [24] **Burton T., Sharpe D., Jenkins N. ve Bossanyi E.** (2001). Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons LTD., England.
- [25] **Url-3** <www.wasp.dk>, alındığı tarih: 25.04.2012.
- [26] **Url-4** <www.emd.dk/windpro>, alındığı tarih: 25.04.2012.
- [27] **Url-5** <www.gl-garradhassan.com/en/GHWindFarmer.php>, alındığı tarih: 25.04.2012.
- [28] **Url-6** <www.windographer.com>, alındığı tarih: 26.04.2012.
- [29] **Url-7** <www.nrel.gov/homer>, alındığı tarih: 26.04.2012.
- [30] **Url-8** <www.retscreen.net>, alındığı tarih: 26.04.2012.
- [31] **Url-9** <www.windsim.com>, alındığı tarih: 26.04.2012.
- [32] **Url-10** <http://www.enerji.gov.tr/mevzuat/YEGM/Elektrik_Piyasasi_Lisans_Yonetmeligi.pdf>, alındığı tarih: 01.05.2014.

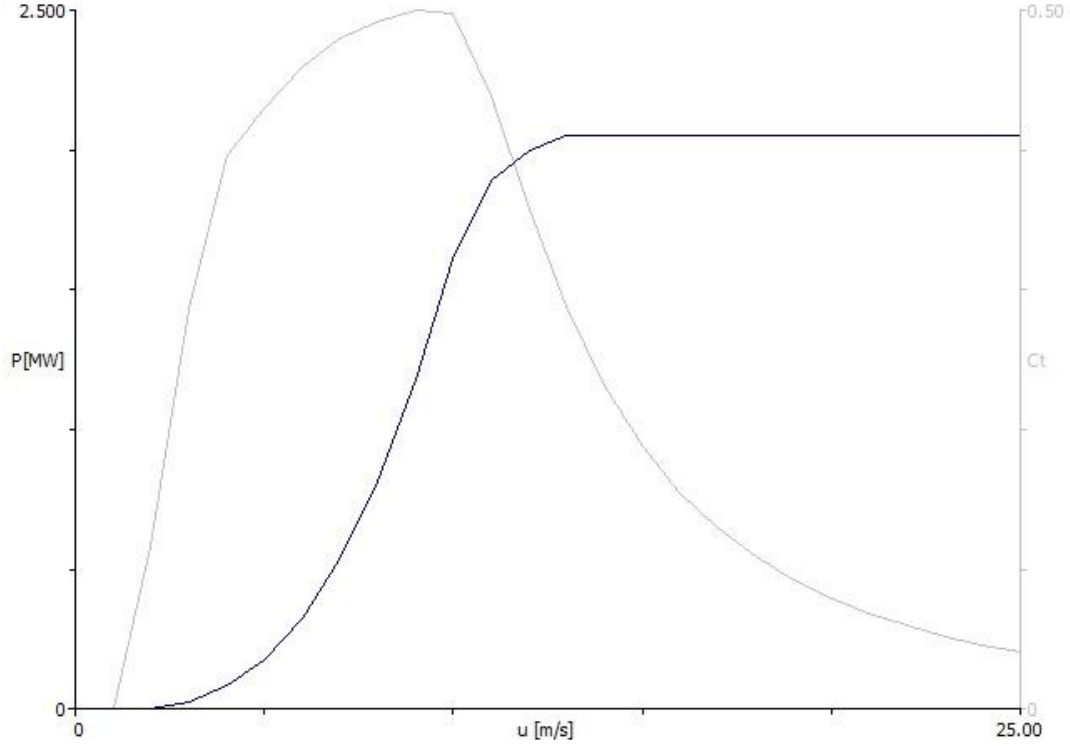
EKLER

EK A: Kullanılan Türbinlerin Güç Eğrileri

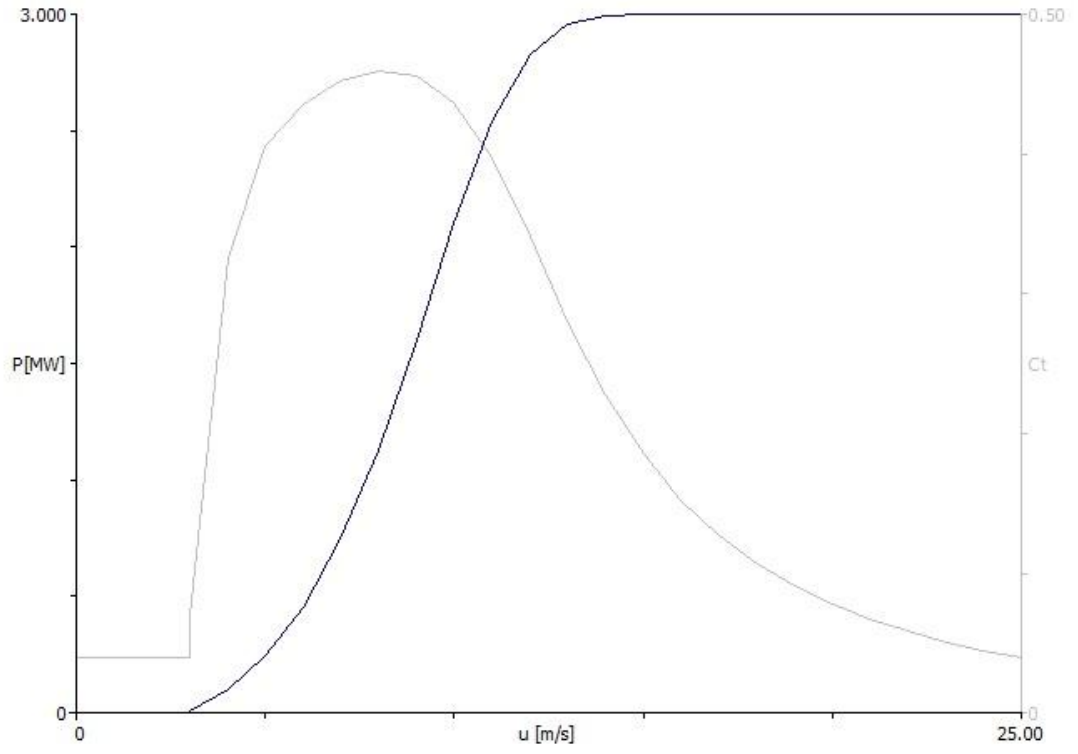
EK A Kullanılan Türbinlerin Güç Eğrileri



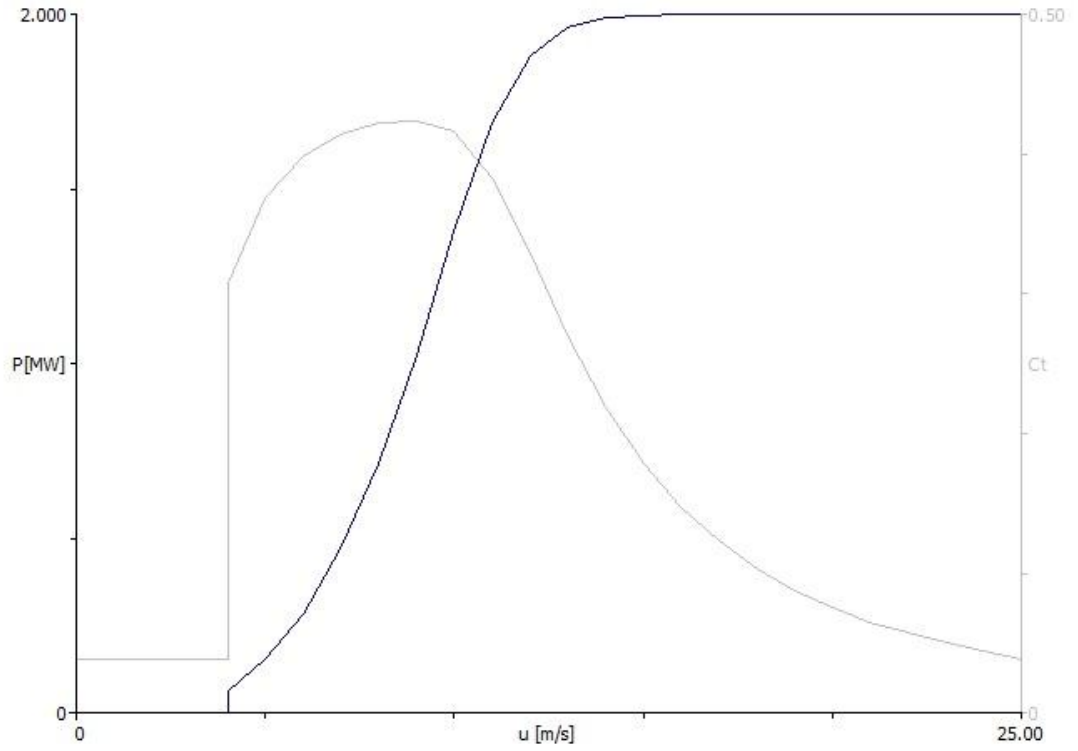
Şekil A.1 : Enercon E48 800 kW türbininin güç eğrisi.



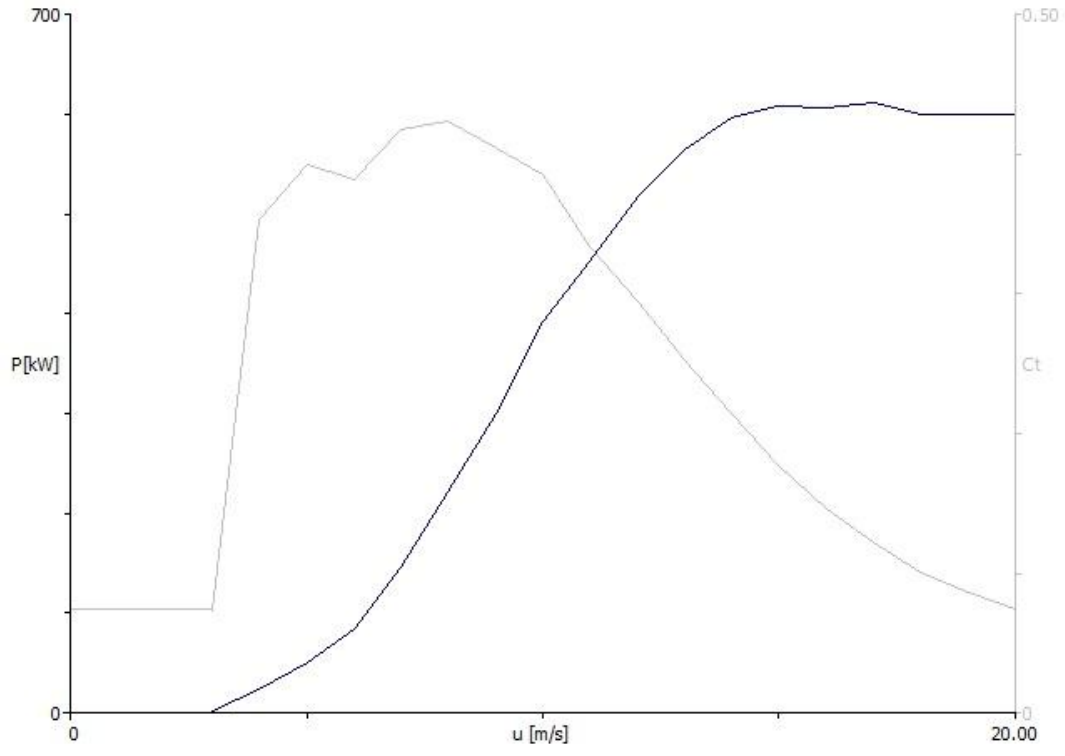
Şekil A.2 : Enercon E82 2000 kW türbininin güç eğrisi.



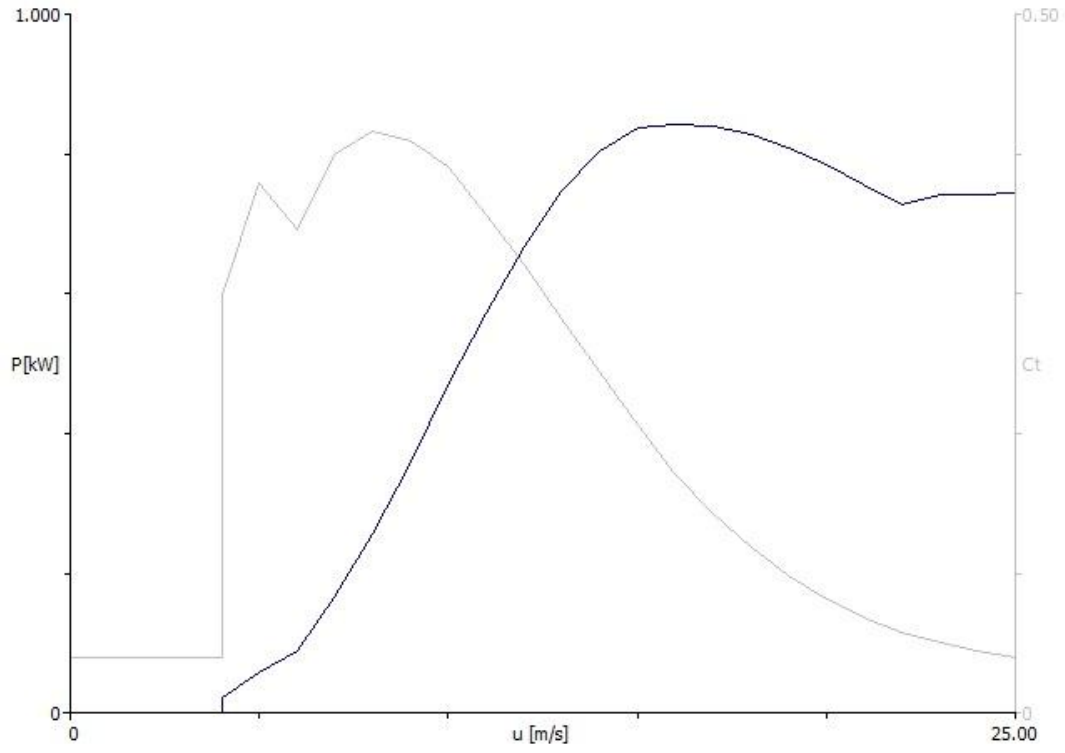
Şekil A.3 : Alstom ECO3000 3000 kW türbininin güç eğrisi.



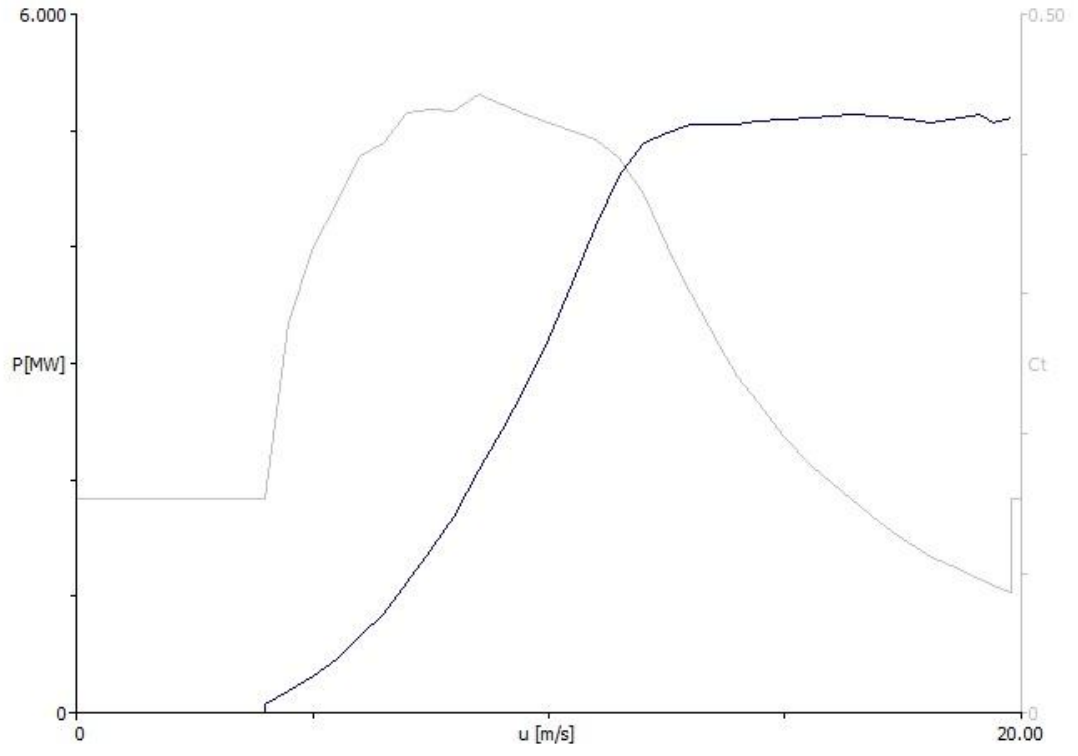
Şekil A.4 : Gamesa G83 2000 kW türbininin güç eğrisi.



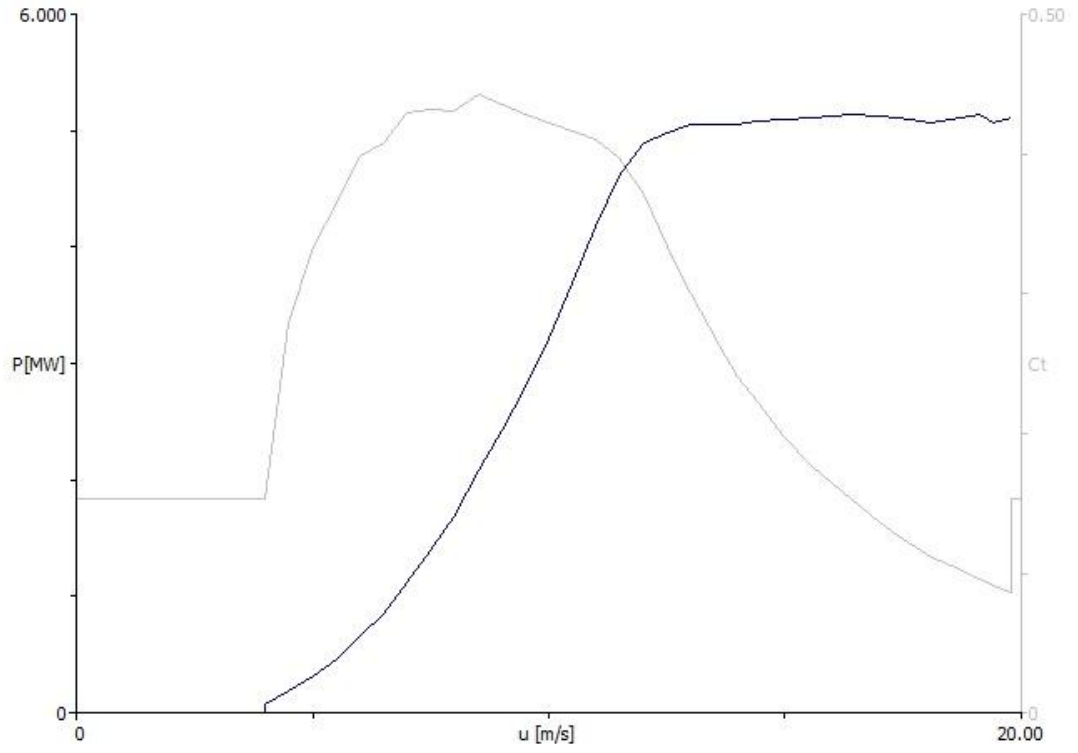
Şekil A.5 : GE 600a 600 kW türbininin güç eğrisi.



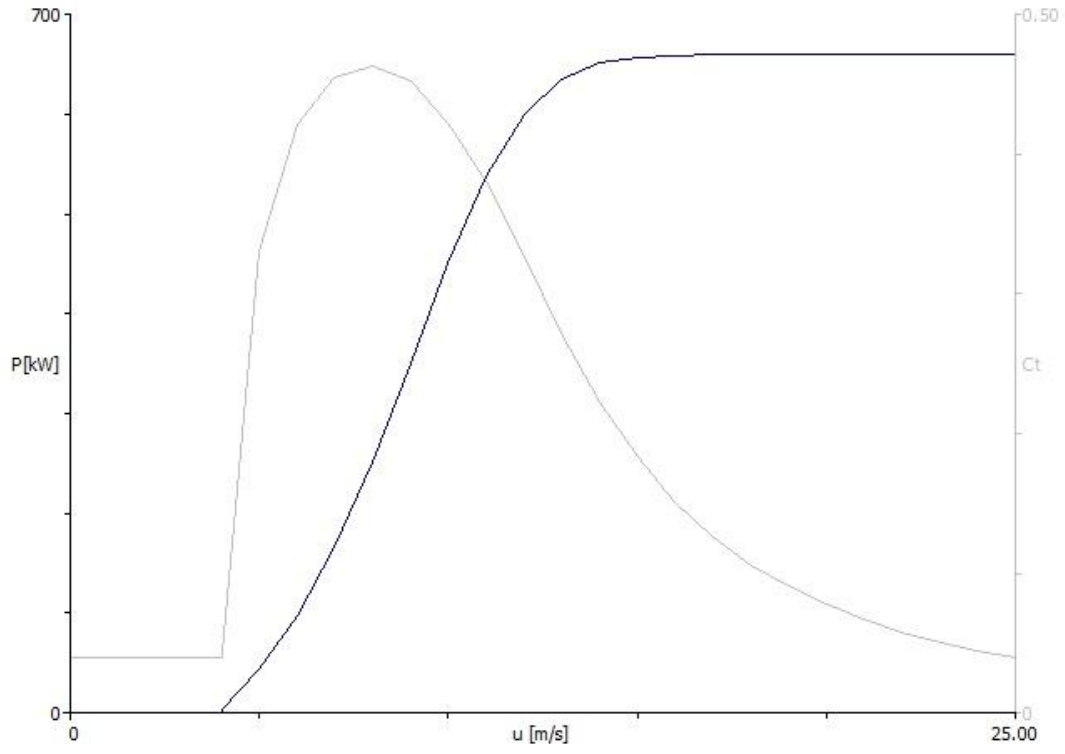
Şekil A.6 : Nordex N50 800 kW türbininin güç eğrisi.



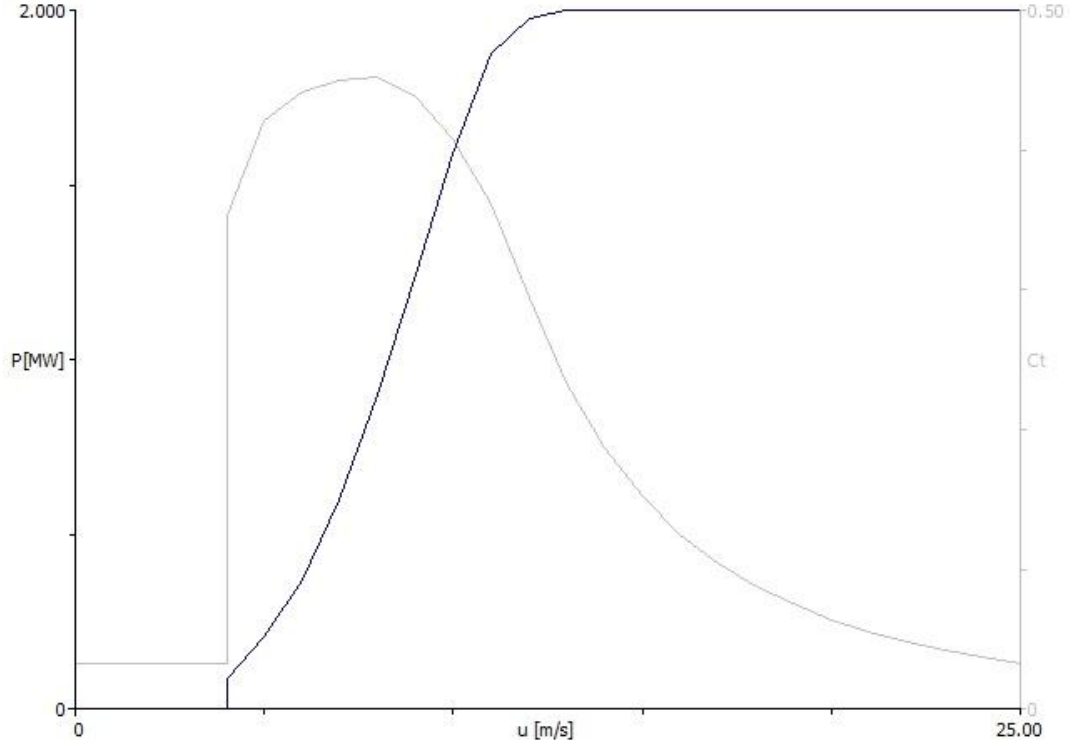
Şekil A.7 : RE Power 5000 kW türbininin güç eğrisi.



Şekil A.8 : Siemens SWT-2.3 2300 kW türbininin güç eğrisi.



Şekil A.9 : Vestas V47 660 kW türbininin güç eğrisi.



Şekil A.10 : Vestas V90 2000 kW türbininin güç eğrisi.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Semih GÜZEL
Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul, 1988
E-posta : semihguzel@gmail.com
Lisans : Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği
Bölümü, 2010
Mesleki deneyim : Rüzgar Santralleri Sorumlu Mühendisi, Enercon
Servis Türkiye