



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK FAKÜLTESİ ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Bitirme Tezi-EMO Proje Yarışması

**Türkiye'nin Elektrik Enerjisi Arz Talep Dengesinin Tespiti, Üretim
Projeksiyonuna Yönelik Rüzgar Elektrik Santrali Tasarımı RES'in
Kurulum Maliyetlerinin ve Üretim Parametrelerinin Analizinin
Matlab&Simulink İle Yazılan Programda Yapılması**

DANIŞMAN:YAR. DOÇ. DR. Ferit ATTAR

**03012118
Murat AĞÇAY**

İstanbul
Haziran 2007
İÇİNDEKİLER

	Syf No
GİRİŞ	1
1. TÜRKİYE’NİN ELEKTRİK ENERJİSİ ARZ TALEP DENGESİ.....	3
1.1. Türkiye’nin Mevcut Elektrik Enerjisi Üretim Kapasitesi.....	3
1.2. Üretim Tesislerine Göre Sınıflandırma.....	6
1.3. Türkiye’de Kurulu Rüzgar Elektrik Santralleri	7
1.4. Türkiye’nin Rüzgar Potansiyelinin Tespiti (bölgelere ve kullanabilirliğine göre)	12
1.5. Rüzgar Elektrik Santralının Avantajları	13
1.6. Rüzgar Elektrik Santralının Dezavantajları	14
2. RÜZGAR VE RÜZGAR TÜRBİNLERİ.....	15
2.1. Rüzgar	15
2.2. Havanın Yoğunluğu	16
2.3. Rotorun Süpürme Alanı	17
2.4. Rüzgar Türbini Rüzgarı Saptırır	18
2.5. Rüzgardaki Enerji	19
2.6. Anemometre.....	20
2.7. Rüzgar Gülü	21
2.8. Pürüzlülük ve Rüzgar Kesmesi.....	22
2.9. Pürüzlülük Sınıfı ve Pürüzlülük Uzunluğu	22
2.10. Pürüzlülük Gülü	25
2.11. Rüzgar Hızı Değişkenliği.....	26
2.12. Türbülans	26
2.13. Rüzgar Engelleri	26
2.14. Wake Etkisi (Wake Effect)	27
2.15. Türbinlerin Yerleşim Etkisi (Park Effect)	27

2.16. Tünel Etkisi (Tunnel Effect)	28
2.17. Tepe Etkisi (Hill Effect-Speed Up Effect).....	29
2.18. Rüzgar Türbini Alanının Seçimi.....	29
2.19. Rüzgar Türbinleri.....	30
	Syf No
2.19.1. Rüzgar Türbini Kanat Profili	31
2.19.2. Kanat Sayısının Etkisi.....	34
2.19.3. Kanat Yapımında Kullanılan Malzemeler	34
2.19.4. Kule.....	35
2.19.5. Rüzgar Türbinlerinin Güç Kontrolü	35
2.19.6. Kablo Dönme Sayıcısı	36
3. RÜZGAR SANTRALLERİNİN ŞEBEKE BAĞLANTILARI.....	36
3.1. Frekans Çevirici Sistemleri.....	37
3.2. Generatör ve Doğrultucu Arasındaki Hat	37
3.3. Doğrultucular	37
3.4. Tristörlü Eviriciler	38
3.5. PWM Eviriciler.....	38
3.6. Transformatörler	38
3.7. Şebekenin Korunması	39
3.8. Rüzgar Santralinin Şebekeye Etkileri	42
4. RÜZGAR SANTRALİ EKONOMİSİ	42
4.1. Rüzgar Türbini Fiyatları	43
4.2. Rüzgar Türbini Kurulum Maliyetleri.....	43
4.3. İşletme ve Bakım Masrafları (O&M)	44
4.4. Türbinden Elde Edilecek Enerji.....	45
4.5. Rüzgar Enerjisi Ekonomisi	45
5. MATLAB & SİMULİNK İLE HAZIRLANMIŞ RÜZGAR SANTRALİ	
KURULUM VE MALİYET VERİLERİNİ VEREN PROGRAM	47
5.1. Bölüm1: Bu bölümde ekonomik analiz yapılmaktadır	47

5.2. Bölüm2: Bu bölümde kurulum için düşünülen yere en uygun türbin seçimi yapılmaktadır.....	54
5.3. Bölüm3: Programın bu bölümünde rüzgar hızı ölçümü yaptığımız yükseklik referans alınarak; Türbin göbek yüksekliğinde ki rüzgar hızı, bu yükseklikte rüzgardan elde edilebilecek maksimum güç ve türbine iletilebilecek mekanik gücü hesaplanır.....	59

Syf No

6. GELİBOLU RÜZGAR ELEKTRİK SANTRALİ TASARIMI	60
6.1. Bu Projede Kullanılacak Enercon-E48 Türbininin Teknik Özellikleri	66
6.2. Ekonomik Veriler	69
SONUÇ	72
KAYNAKLAR	74

Tablo Listesi

Tablo 1. Ülkemizdeki Elektrik Enerjisi Üretim ve Tüketim Kuruluş Payları	7
Tablo 2. Elektrik Enerjisi Üretim Kapasitemizin Üretim Kaynaklarına Göre Sınıflandırılması.....	9
Tablo 3. Üretime Başlı Rüzgar Santralleri	10
Tablo 4. EPDK'dan Lisans Almış Rüzgar Elektrik Santrallerinin İlerleme Durumu	11
Tablo 5. Üretim Kaynaklarına Göre Birim Enerji Üretim Maliyeti	15
Tablo 6. Havanın Basınç – Yoğunluk – Sıcaklık – Nem İlişkisi.....	19
Tablo 7. Pürüzlülük Sınıfı – Pürüzlülük Uzunluğu	25
Tablo 8. Üretim Değerleri Karşılaştırılan Türbinler ve Teknik Özellikleri.....	58
Tablo 9. Enercon E – 48 Türbinin Teknik Özellikleri ve Üretim Parametreleri	69
Tablo 10. Gelibolu RES Kurulum Maliyeti.....	70

Program Şeması Listesi

Program şeması 1. Ekonomik analiz penceresi	49
Program şeması 2. Ekonomik analiz bölümü alt sistemler	50
Program şeması 3. Ekonomik analiz bölümü alt programları	50
Program şeması 4. Ekonomik analiz bölümü alt programları	51

Program şeması 5. Ekonomik analiz bölümü alt programları	51
Program şeması 6. Ekonomik analiz bölümü alt programları	52
Program şeması 7. Ekonomik analiz bölümü alt programları	52
Program şeması 8. Ekonomik analiz bölümü alt programları	54
Program şeması 9. Ekonomik analiz bölümü alt programları	56
Program şeması 10. Türbinleri üretim parametrelerine göre karşılaştırma	66
Program şeması 11. Türbin karşılaştırma bölümünün alt programları	57
Program şeması 12. Rüzgar gücü ve hızı verilerinin hesaplandığı bölümü.....	60
Program şeması 13. Programın 3. bölümünün alt programı	61
Program şeması 14. Simülasyon sonuçları	69

Uydu Fotoğrafi Listesi

Uydu Fotoğrafi 1. Gelibolu Limanı	63
Uydu Fotoğrafi 2. Gelibolu Limanından Santral Sahasına Bağlantı Yolları	63
Uydu Fotoğrafi 3. Gelibolu – Gemlik ve İzmir	64
Uydu Fotoğrafi 4. Santralin Kurulabileceği (Gelibolu) Genel Görünümü	65
Uydu Fotoğrafi 5. Santralin Kurulabileceği Alan 1	66
Uydu Fotoğrafi 6. Santralin Kurulabileceği Alan 2	66
Uydu Fotoğrafi 7. Santralin Kurulabileceği Alan 3	67
Uydu Fotoğrafi 8. Santralin Kurulabileceği Alan 4	67

Resim Listesi

Resim 1. Rüzgarın Rotora Gelmesi1	18
Resim 2. Rotor Ölçüsü Değişimi ile Elde Edilen Enerji Miktarı Değişimi	20
Resim 3. Türbine Rüzgarın Girişi ve Çıkışı	21
Resim 4. Rüzgar Gülü	24
Resim 5. Pürüzlülük Sınıfı 0 Olan Alan	28
Resim 6. Bir Engel Etrafında Rüzgar Akışı	29
Resim 7. Türbin Yerleşim Planı	30
Resim 8. Tünel Etkisi Örneği	30
Resim 9. Tepe Etkisi Örneği	31

Resim 10. Türbin Kanat Profili.....	33
-------------------------------------	----

Grafik Listesi

Grafik 1. Rüzgar Hızındaki Değişime Karşın Elde edilecek Enerji Değişimi.....	20
Grafik 2. Rüzgar Hızının Yüksekliğe Göre Değişimi.....	24
Grafik 3. Rüzgar Türbini Fiyat-Güç Eğrisi.....	42
Grafik 4. Türbinden Elde Edilecek Enerjinin Rüzgar Hızına Göre Değişimi	44
Grafik 5. Enerji Birim Fiyatı-Üretilen Enerji Miktarına Göre Değişimi	45
Grafik 6. Enerji Birim Fiyatının Rüzgar Hızına Göre Değişimi.....	46
Grafik 7. Enercon E-48 Türbininin Güç Eğrisi.....	66

Denklem Listesi

Denklem 1. Rüzgardaki Enerji.....	20
Denklem 2. Pürüzlülük Sınıfı ve Pürüzlülük Uzunluğu Arasındaki İlişki	23
Denklem 3. Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi	25
Denklem 4. Sürüklenme Katsayısı.....	32
Denklem 5. Kaldırma Katsayısı.....	32
Denklem 6. Toplam Harmonik Distorsiyonu	40
Denklem 7. Harmonik Distorsiyonu Faktörü	40

ÖNSÖZ

Öncellikle hayatım boyunca bilginin ve öğrenmenin önemini bana aşıl原因an babama ve başarısızlıklarımda bile desteğini hiç eksiltmeyen değerli aileme teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmam sürecinde sürekli yol gösteren, araştırmadan ziyade tasarım yapmam gerekliliğini anlatan danışman hocam Sayın Yar. Doç Dr. Ferit Attar'a, Matlab&Simulink ile hazırladığım programda yardım ve fikirleri ile ufkumu açan hocam Sayın Yar. Doç Dr. Mehmet Uzunoğlu'na, ekonomik analiz konusunda her daim yol gösteren ve engin bilgilerinin benimle paylaştan hocam Sayın Prof. Dr. Selim Ay' a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Tasarım aşamasında uygulama tecrübesi ile projemin gerçekçilik boyutunu güçlendiren Elektrik Yük. Müh. Halil Durutürk'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak hazırlamış olduğum bu projeye gerçekçi bir tasarım olması adına maddi destek veren Elektrik Mühendisleri Odası'na sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

ÖZET

Elektrik enerjisi üretimi ülkemizin ana enerji sorunlarından. 01.07.2006 tarihinde Bursa'da yaşanan elektrik krizi ve sanayi üretiminin aksaması elektriğin önemini açıkça ortaya koymuştur. Enerji bakanlığı bu gibi sorunları tarife değişikliği ile aşmayı planlasa da uzun vadede mutlaka üretim kapasitesinin artırılması gerekir.

Elektrik tüketiminin her 10 yılda 2 kat arttığını düşünürsek üretim kaynaklarının ve üretim yöntemlerinin önemi daha iyi anlaşılır. Ülkemizde 2006 yılında tüketilen elektriğin %44.2 si doğalgaz santrallerinde üretilmiştir. Bu oran bize ne kadar ciddi bir sorun ile karşı karşıya olduğumuzu gösterir.

TEİAŞ verilerine göre ülkemizin 2006 yılı elektrik enerjisi tüketim miktarı 173,1 milyar kWh dir. Buna karşın ülkemizin rüzgar enerjisi potansiyeli 200 milyar kWh/yıl dır. Sahip olduğumuz kaynağın büyüklüğü ve önemini gayet iyi açıklayan bir istatistiktir. Ülkemiz hammadde maliyeti 0 olan bu kaynağın ne yazık ki 1155 de birini kullanıyoruz.

Oysa rüzgar enerjisi santrallerinin diğer enerji santrallerine göre çok önemli avantajları vardır. Bu avantajları, hammadde ihtiyacının olmaması diğer enerji santrallerine oranla daha hızlı kurulması temiz bir enerji kaynağı olması ve enerjide dışa bağımlılığı azaltmasıdır.

Projemde tümüyle ile gerçek rüzgar ve maliyet verileri kullanarak Çanakkale/Gelibolu için tasarladığım rüzgar elektrik santralının ilk yıl için birim enerji üretim maliyeti 0.0738 \$/kWh dır. Bu değer, santralin ekonomik ömrü olan 25 sene boyunca işletildiğinde daha da düşecektir. Santralin ilk kurulum maliyeti 54.914.522 \$ dır ve bundan sonra santral için sadece bakım ve işletme masrafı olacaktır. İşletme ve bakım masrafları ise yıllık sadece 770.000 \$ dır.

Bu bakımdan rüzgar enerjisi günümüz koşullarında Türkiye için ideal alternatif enerji kaynağıdır.

GİRİŞ

Günümüzde tüm dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmak için büyük çalışmalar vardır. Bu çalışmalara, özellikle dünya ekonomisine yön veren ülkelerde önemli miktarda yatırımlar yapılmaktadır. Çünkü yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtların aksine doğal hayat için herhangi bir risk teşkil etmemesinin yanında maliyet açısından da çok avantajlıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi kullanımı tüm dünyada giderek yaygınlaşmaktadır. Rüzgar enerjisinin asıl önem gördüğü dönem, 1973 yılında yaşanan petrol krizi ile başlamıştır. Bu kriz ile birlikte alternatif enerjiye olan talep artmıştır.

Bu projede ülkemizin yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak enerji üretim kapasitesinin arttırabileceği miktarı, ekonomik analizler yaparak göstermeyi amaçladım. Öncelikle ülkemizin mevcut üretim tüketim dengesinin (2006 yılı verilerini kullanarak) analizini yaptım. Buradan hammadde kaynaklarına göre sınıflandırmalara geçerek mevcut üretimimizdeki olmaması gereken yönleri tespit ettim. Bu analiz sırasında elde edilen önemli tespitler; Ülkemizin 2006 yılında tükettiği elektrik enerjisinin %42.2'si doğal gaz santrallerinde üretilmiştir, hammadde maliyeti 0 olan rüzgar enerjisi santrallerinin ise 2006 yılı tüketime katkıları sadece %0.1 dir. Ülkemizin önümüzdeki 20 yıllık döneme yönelik tüketim merkezlerinden gelen talebi karşılayabilmesi için, mevcut elektrik enerjisi üretim kapasitesini %100 oranında artırması gerekmektedir.

Ardından ülkemizin yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi potansiyelini tespit ederek bu potansiyele yönelik çalışmaları değerlendirdim. Ülkemizin rüzgar potansiyeline yönelik Çanakkale/Gelibolu Rüzgar Santrali kurulumunu gerek mali açıdan gerek üretim parametreleri açısından analiz ve tasarımı yaptım.

Gelibolu için rüzgar santrali tasarımına geçmeden rüzgarı ve rüzgar türbinlerini etraflıca açıkladım. Bu açıklamalar; Rüzgarın yapısı, rüzgarın oluşumu, rüzgar santrali kurmak için olması gereken rüzgar şartları, türbinden maksimum verim sağlamak için yapılması gereken rüzgar ölçümleri, türbinin yapısı, türbin ekipmanlarının incelenmesi, türbinin kurulum yerinin seçimi, türbinlerin santral sahasında yerleşimi, rüzgar santralinin elektrik şebekesine bağlantısı, rüzgar santrali işletme ekonomisi şeklinde sıralanıyor. Bu açıklamaların ardından Gelibolu için santralin tasarımı gelmektedir.

Ekonomik analiz ve üretim analizi için Matlab&Simulink kullanarak bir program geliştirdim. Bu program ile rüzgar santrali kurulumu yapılması planlanan bir bölgenin rüzgar verilerini ve ekonomik verileri girdiğimizde santralin üretim parametrelerinin analizini ve ekonomik analizini detaylı bir şekilde alabiliriz. Bu programda üretim parametrelerinin analizi için alışılmışın aksine yıllık ortalama rüzgar verisi yerine saatlik rüzgar hızı verilerini kullanarak üretimin gerçek değerinin kurulumdan önce elde edilebilmesini ve bölge için en uygun türbinin seçilebilmesini sağladım.

Gelibolu rüzgar santrali kurulumu için maliyetleri minimum kılmak ve ülkemizin üretim ekonomisine maksimum katkı sağlamak adına mümkün olduğu kadar ülkemizde üretilen ekipmanlar tercih edilmiştir. Böylelikle sadece enerji üretim kapasitemize değil sanayi üretimi yapan işletmelerimize de katkı sağlamak amaçlanmıştır.

1. TÜRKİYE’NİN ELEKTRİK ENERJİSİ ARZ TALEP DENGESİ

Bu bölümde ülkemizin elektrik enerjisi üretim tüketim dengesi analizi yapılmıştır.

1.1. Türkiye’nin Mevcut Elektrik Enerjisi Üretim Kapasitesi

Elektrik enerjisi, ekonominin ve yaşam standardının vazgeçilmez kaynağıdır. Ancak, ana sorun, sürekli ve güvenli şekilde elektrik enerjisini tüketicilere sunmaktır. Elektrik enerjisinin tüketimi kalkınma ile doğru orantılı olarak artar. Bu artış oranı için; Tüketim verileri analiz edildiğinde, tüketim merkezlerinden gelen güç talebinin yaklaşık her on yılda iki katına çıktığı görülür [6]. Ülkemiz için yakın bir gelecekte yeterli elektrik enerjisi temininde güçlükler çekileceği öngörülse de, şu an enerji talebi yapılan ithalat ile birlikte bütünüyle karşılanabilmektedir.

Türkiye’de elektrik enerjisi üretimine bakıldığında; toplam elektrik enerjisi üretiminin 1980 yılında 23 milyar kWh’ dan 13 yıl içerisinde yaklaşık 3,5 kat artarak 1993 yılında 73,8 milyar kWh’ a yükseldiği görülmektedir. 1993-1995 yılları arasında ise üretim artışı %17 olmuş ve Türkiye 1995 yılında 86,3 milyar kWh elektrik enerjisi üretmiştir. Diğer taraftan elektrik enerjisi tüketimi, 1950-1990 yılları arasında 72 kat artmıştır. Bu kırk yıllık dönemde tüketimin yılda ortalama artışı %11 civarındadır. 1970 yılında 207 kWh olan kişi başına elektrik enerjisi tüketimi 1980 yılında 2,5 katına yakın bir artış ile 459 kWh düzeyine ulaşmıştır. Türkiye’nin kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketimi dünya ve OECD ortalamalarının oldukça altında kalmaktadır. Türkiye, 1995 yılı itibarıyla nüfusu 62 milyon iken, kişi başına birincil enerji miktarı elektrik tüketimi 1078 kWh olan bir ülkedir. OECD ortalaması, kişi başına birincil enerji miktarı için elektrik tüketimi için 7800 kWh iken, dünya ortalaması kişi başına birincil enerji miktarı için elektrik tüketimi için ise 2250 kWh düzeyindedir. Bunun yanı sıra, kişi başına elektrik tüketimi; OECD ülkeleri ortalaması 7800 kWh, dünya ortalaması 2250 kWh, AB ülkeleri ortalaması 6194 kWh dir.

Türkiye, genel olarak enerji üretim kapasitesinin enerji talebini karşılayamaması nedeniyle enerji ithal eden bir ülke konumundadır. Kalkınma ve nüfus artışına paralel olarak toplam enerji tüketimimizin hızla artmasına rağmen, enerji üretimimiz aynı oranda artış göstermemiştir. 2006 Türkiye elektrik piyasasında üretim ve tüketimde kuruluş payları aşağıdaki Tablo 1’de özetlenmiştir [23].

Tablo 1. Ülkemizde Elektrik Enerjisi Üretim ve Tüketim Kuruluş Payları (2006)

Üretici Kuruluşlar	Üretim (milyar kWh)	Toplam Tüketimdeki Payı (%)	Toplam Üretimdeki Payı (%)
EÜAŞ	65,9	38,5	38,1
EÜAŞ' a Bağlı Ortaklık Santralleri	5,8	3,4	3,4
Özelleştirme Programındaki Santraller	7,3	4,2	4,2
Mobil Santraller	0,4	0,2	0,2
İşletme Hakkı Devir Santralleri	4,3	2,5	2,5
Yap-İşlet-Devret (BOT) santralleri	14,7	8,5	8,5
Yap-İşlet (BO) Santralleri	41,2	24,0	23,8
Toplam	139,5	81,3	80,5
Oto Prodüktörler	19,1	11,2	11,1
Serbest Üretim Şirketleri (IPP)	14,5	8,5	8,4
Toplam	33,6	19,7	19,5
Türkiye Piyasası Üretim Toplamı	173,1	101,0	100,0

Ülkemizin elektrik enerjisi üretimini 2006 ve 2005 yılları için TÜİK verilerine dayanarak karşılaştırsak aşağıdaki sonuçlara ulaşırız;

Ülkemizde elektrik enerjisi üretimi 2006 yılı II. Döneminde (Nisan-Mayıs-Haziran), bir önceki yılın aynı dönemine göre % 9,01 artarak 41.660 GWh olarak gerçekleşmiştir. Elektrik enerjisi üretimi 2006 yılı II. döneminde bir önceki döneme göre % 2,05 azalmıştır. Üretilen elektriğin 2005 yılı II. döneminde; 27.537,5 GWh' ı termik, 10.667,7 GWh' ı hidrolik ve 12,2 GWh' ı da rüzgar enerjisi iken, 2006 yılı II.döneminde ise; 29.690,3 GWh' ı termik, 11.947,4 GWh' ı hidrolik ve 22,4 GWh' ı da rüzgar enerjisi olarak gerçekleşmiştir. 2006 yılı II. döneminde, 2005 yılı II. dönemine göre termik elektrik enerjisi üretiminde % 7,82, hidrolik elektrik enerjisi üretiminde ise % 12 oranında üretim artışı görülmüştür. 2006 Yılı II. döneminde elektrik enerjisi üretiminin % 48,72'si EÜAŞ ve EÜAŞ' a bağlı ortaklıklar, % 41,59'u üretim şirketleri, % 9,69'u oto prodüktörler tarafından gerçekleştirilmiştir. Elektrik üretimi bir önceki yılın aynı dönemine göre EÜAŞ ve EÜAŞ' a bağlı ortaklıklarda % 13,86, üretim şirketlerinde % 6,19 artmış, oto prodüktörlerde ise % 0,94 oranında azalmıştır.

Brüt elektrik enerjisi üretimi, enerji kaynaklarına göre 2005 yılı II. döneminde % 43,73'ü doğal gaz, % 27,91'i su, % 17,11'i linyit, 2006 yılı II. döneminde ise % 44,36'sı doğal gaz, % 28,68'i su, % 17,01'i linyit ile çalışan santrallerden sağlanmıştır. Bir önceki yılın aynı dönemine göre elektrik üretimi, doğal gaz santrallerinde % 10,59, linyit santrallerinde % 8,40 oranında artmıştır. Elektrik tüketimi, 2006 yılı II. döneminde bir önceki yılın aynı dönemine göre % 9,21 artarak 30.875 GWh olarak gerçekleşmiştir. Elektrik enerjisinin % 42,79'u sanayide, %25,34'ü meskenlerde, % 14,26'sı ticarethanelerde, % 4,34'ü resmi dairelerde, % 2,07'si sokak aydınlatmasında, % 1,69'u şantiyelerde % 1,66'sı tarımsal sulamada ve % 7,85'i ise diğer ve doğrudan satışlar olarak tüketilmiştir.(TÜİK, Eylül 2006).

TÜİK verilerinden de görüldüğü üzere 2006 Nisan, Mayıs Haziran döneminde ülkemiz elektrik enerjisinin %44,36 sı doğalgaz çevrim santrallerinde üretilmiştir. Bu enerjiyi ucuza mal etmemizin ve güvenilir bir enerji politikamız olmasının önündeki en büyük engeldir.

1.2. Üretim Tesislerine Göre Sınıflandırma

Elektrik enerjisi üretim kapasitemizin üretim kaynaklarına göre sınıflandırılması sonraki sayfada Tablo 2' de gösterilmiştir (TEİAŞ, 2006).

Tablo 2. Elektrik Enerjisi Üretim Kapasitemizin Üretim Kaynaklarına Göre Sınıflandırılması

Üretimde Kullanılan Birincil Kaynaklar	Üretim (milyar kWh)	Üretime Katkı (%)	Tüketime Katkı (%)
Fuel Oil	5,0	2,9	2,9
Motorin	0,0	0,0	0,0
Taşkömürü	2,7	1,6	1,6
İthal Kömür	10,2	5,9	5,9
Linyit	37,1	21,4	21,6
Doğalgaz	75,8	43,8	44,2
LPG	0,4	0,2	0,2
Nafta	2,5	1,5	1,5
Yenilenebilir+Atık (Yakıt)	0,2	0,1	0,1
Jeotermal	0,1	0,1	0,1
Diğer termik	0,1	0,0	0,0

Hidrolik	39,0	22,5	22,8
Rüzgar	0,1	0,1	0,1
Türkiye Üretim Toplamı	173,1	100,0	101,0

Tablo 2’ den de görüleceği üzere ülkemizde rüzgar enerjisinin mevcut üretime katkısı yok denecek kadar azdır. Oysa ülkemizin rüzgar potansiyelinden daha azına sahip Avrupa ülkelerinde bu oran %10 civarındadır.

1.3. Türkiye’de Kurulu Rüzgar Elektrik Santralleri

Aşağıdaki Tablo 3’ de üretime geçen rüzgar elektrik santrallerinin (RES) bilgileri verilmiştir.(Demirer, 2006).

Tablo 3. Üretime Başlanan Rüzgar Santralleri

Elektrik Üretimine Başlama Tarihi	Kurulu Güç (MW)	Firma	Yer
Şubat 1998	1.5	Demirer	Çeşme İzmir
Kasım 1998	7.2	Güçbirliği	Çeşme İzmir
Haziran 2000	10.2	Demirer-Enercon	Çanakkale
Kasım 2003	1.2	Sunjut-Demirer	Hadımköy-İstanbul
Mayıs 2006	30	Bares-Bilgin	Bandırma
Ağustos 2006	39.2	Demirer-Enercon	Çeşme İzmir

Tablo 3’den de görüleceği üzere ülkemizin toplam RES kurulu gücü 89,3 MW tır. Bu ülkemiz için yeterli değildir. Çünkü çalışmalar, ülkelerin mevcut sistemlerinde hiçbir değişiklik yapılmaksızın toplam elektrik üretimlerinin %15’ ini rüzgar enerjisinden elde edebileceklerini göstermektedir(Sarıkayalar ve Atar, 1998).

Ülkemiz adına sevindirici olan ise; Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) Başkanı Yusuf Günay’ ın, Türkiye'deki mevcut rüzgar kurulu gücünün yapılan yatırımlarla 2008 yılı başında 230 MW’ a çıkacağını açıklamasıdır(Akşam Gazetesi, 06.11.2006).

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu’ndan lisans almış rüzgar elektrik santrallerinin Mayıs 2006 itibari ile gerçekleşme durumları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.(EPDK, 2006).

Tablo 4. EPDK' dan Lisans Almış Rüzgar Elektrik Santrallerinin İlerleme Durumu

Firma	Tesis Yeri	İnşa Halindeki Kurulu Güç (MW)	Mayıs 2006 Gerçekleşen İlerleme Oranı (%)
Ak-El Akhisar Elektrik Üretim A.Ş.	Çambel	66.66	2.09
Akhisar Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretim Santralı Ltd. Şti.	Sertavul	46.25	3.82
Akhisar Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretim Santralı Ltd. Şti.	Akhisar	43.75	2.79
Anemon Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	İntepe	30.4	2.251
AS Elektrik Üretim A.Ş.	Saray	45	0,8 (*)
As Makinsan Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Belen II	19.8	9
As Makinsan Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Fethiye	24.3	8

As Makinsan Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Karacabey	26.1	9
As Makinsan Temiz Enerji Elektrik Üretim San. ve Tic. A.Ş.	Çanakkale	29.7	8
Bağcı Elektrik Enerjisi Üretimi A.Ş.	Söke	21.25	1.385
Baki Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Şamlı	90	0.83
Balıkesir Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretim Santralı Ltd. Şti.	Alibey Adası	30	2.92
Bangüç Bandırma Elektrik Üretim A.Ş.	Bandırma	15	19.4
Deniz Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Sebenoba	30	26.2
Deniz Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Karakurt	10.5	26.95
Deryalar Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Ekinli	42	6.762
Doğal Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	Sayalar	30.4	3.8
Doğal Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	Burgaz	15.2	6.634

Ertürk Elektrik Üretim A.Ş.	Çatalca	62	0.642
Ertürk Elektrik Üretim A.Ş.	Tepe	0.66	54.61
EZSE Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Babadağ	20	11.65
EZSE Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Bergama	55.8	3.34
EZSE Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Kabaklar	27.9	7.968
EZSE Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Meydan	27.9	7.828
EZSE Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Samandağ	22.5	8.758
EZSE Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Türbe	35.1	7.5
EZSE Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Hereke	90.9	6.59
İnnores Elektrik Üretim Ltd. Şti.	Yuntdağ	42.5	5.46
Lodos Elektrik Üretim A.Ş.	Kemberburgaz	24	2,4 (*)
Mare Manastır Rüzgar Enerji Santralı San. Ve Tic. A.Ş.	Mazı I	39.2	8.9
Proen Enerji San. ve Tic. A.Ş	Kıranseki	12.75	4.128

Rotor Elektrik Üretim A.Ş.	Osmaniye	135	6.5525
Sabaş Elektrik Üretim A.Ş.	Madranbaba	24.3	6.81
SAGAP Elektrik Üretim A.Ş.	Kapaklı	67	1.591
Samandağ Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretim Santrali Ltd. Şti.	Samandağ	50	3.31

(*) Ocak 2006 Değeridir

EPDK verilerinden yola çıkarak lisans almış ve inşası devam eden bu projelerin bitiminde ülkemizin RES kurulu gücüne 1353,82 MW'lık bir katkının sağlanacağı görülmektedir.

1.4. Türkiye'nin Rüzgar Potansiyelinin Bölgelere Ve Kullanabilirliğine Göre Tespiti

Türkiye Rüzgar Atlası çalışması kapsamında toplam 45 adet istasyonda 1989-1998 yılları arasında Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü ve Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü işbirliği ile ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerden yola çıkılarak Türkiye Rüzgar Atlası oluşturulmuştur.

Ülkemizin toplam rüzgar enerjisi potansiyeli 40.000 – 80.000 MW arasındadır. Türkiye'nin rüzgar enerji potansiyeli şöyle hesaplanabilir: Türkiye'nin yüzölçümü 776000 km² (77600000 hektar) olarak alabiliriz. Ülkenin sadece %1 alanı (uluslar arası standart, Avrupa için %0.5) rüzgar enerjisi için kullanılırsa, 776 000 hektar kullanılacak alan demektir. 10 hektar arazi için bir rüzgar türbini düşünüldüğünde (teknik standart) toplam 77 600 türbin olduğu hesaba katılırsa , 1 MW kapasiteli bir türbin yılda yaklaşık 2.500 000- 3 000 000 kW-saat enerji üretmektedir. Toplam yılda yaklaşık 200 milyar kWh enerji üretimi olacaktır(Akın ve Zeybek, 2005).

TEİAŞ verilerine göre ülkemizin 2006 yılı için elektrik üretimi 173,1 milyar kWh olduğu göz önüne alınırsa ne kadar büyük bir potansiyele sahip olduğumuz anlaşılır. Ayrıca TEİAŞ verilerinden 2006 için rüzgar kaynaklı elektrik üretim miktarının 0,1731 milyar kWh olduğu da düşünülürse. Hammadde maliyeti 0 olan bir kaynağın sadece 1155 de birini kullandığımız görülür.

Dünya Bankası tarafından ülkemiz yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yapılan araştırmada şu tespitlere yer verilmiştir; “Türkiye rüzgar enerjisi açısından zengin bir potansiyele sahiptir. Bu rüzgar kapasitesi özellikle deniz kıyılarında (Marmara, Ege, Karadeniz) bulunmaktadır. Türkiye’nin 11000MW gücünde rüzgar santrali yapabilecek ve senede 25TWh elektrik enerjisi üretebilecek durumdadır. Eğer bu gerçekleşirse elektriğin birim fiyatı 5 cent(\$)/kWh düzeyine iner. Rüzgar santrali ekipmanlarının fiyatının sürekli düştüğünü göz önünde bulundurursak bu fiyat daha düşük değerlere gelir.” (Document of The World Bank, 26 Şubat 2004).

Enerji konusunda ülkemizin önde gelen isimlerinde Doç. Dr. Tanay Sıdkı Uyar’ ın ülkemizin rüzgar enerjisi potansiyeli tespiti şöyledir.

“Ülkemizin teknik potansiyeli ise 83 GW ve yılda 166 TWh enerjidir.”

Aşağıdaki Tablo 5’de rüzgar ve diğer elektrik santrallerinin birim enerji başına üretim maliyetleri verilmiştir.

Ülkemizin rüzgar enerjisini tespit etmeye yönelik bu çalışmalardan yola çıkarak, en iyimser tespiti ele alırsak. Ülkemizin rüzgar enerjisinden yılda elde edebileceği elektrik enerjisi 25TWh dir. Enerji üretiminde ülkemizin tamamını karşılayabilecek bir kaynağın var olduğunu rahatlıkla görebiliriz.Sonraki sayfada elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre maliyetleri Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Üretim Kaynaklarına Göre Birim Enerji Üretim Maliyeti

Yakıt	Maliyet (\$-cent/kWh)
Kömür	4.8-5.5
Gaz	3.9-4.4
Hidrolik	5.1-11.3
Biomass	5.8-11.6
Nükleer	11.1-14.5
Rüzgar	4.0-6.0

1.5. Rüzgar Elektrik Santralinin Avantajları

- ✓ Rüzgar enerjisi kirlilik yaratmayan ve çevreye çok az zarar veren yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Yeryüzünde %95 gibi bir alanda rüzgar enerjisi elde edilebilir ve bu alanlarda aynı zamanda ziraat, ormancılık gibi faaliyetler de sürdürülebilir.
- ✓ Fosil yakıtlar ile enerji üretmede her 1kW/h üretim için yaklaşık olarak 0.7 kg karbondioksit gazı ortaya çıkar. Buna göre rüzgar santrali ile ürettiğimiz her 1kWh enerji ile dünyamızı 0.7 kg karbondioksit gazı salınışından kurtarıyoruz.
- ✓ Rüzgar Enerji Santralleri diğer enerji santralleri gibi çevreyi kirletecek kimyasal ve benzeri atıklar yaymaz. Dolayısıyla santralin bulunduğu çevre her zaman temiz ve doğal kalır. (600 KW lık bir rüzgar türbini gücünde olan bir kömür santrali yılda yaklaşık 1200 ton CO₂ üretir. Buna karşın Rüzgar Enerji Santrali ise CO₂ emisyonuna neden olmaz. Bu maddeler atmosferi kirlettiği gibi sera etkisi sebebiyle küresel ısınmalara yol açmaktadır. Şimdiden buzulların erimeye başladığı ve hızlı çölleşme süreci bilinen bir gerçektir.)
- ✓ Rüzgar enerjisi gerçek anlamda yenilenebilir enerjidir yani hiç bitmez (Fosil yakıt rezervleri sınırlıdır. Yapılan araştırmalar 2030 yılında bu rezervlerin tükeneyeceğini göstermektedir.)
- ✓ Gelişen teknoloji ile birlikte enerji birim maliyetleri düşmektedir.
- ✓ Dünya enerji rezervlerinin ömürlerine bakarsak rüzgar enerjisinin sonsuz olan kaynağı ile en önemli avantajını görebiliriz.

Nükleer enerji→ 200 yıl, Kömür→ 200 yıl, Gaz→ 65 yıl, Petrol→ 40 yıl,

Rüzgar→ sonsuz

1.6. Rüzgar Elektrik Santralinin Dezavantajları

- ✓ Türbinlerin sesli çalışmaları, yakın çevrelerinde yaşayan insanlar için rahatsız edicidir. Bu nedenle yerleşim merkezlerinden ve hassas vahşi yaşam alanlarından uzakta kurulmaları gerekmektedir.(Gelişen teknoloji ile birlikte bu dezavantaj giderek azalmıştır.)
- ✓ Rüzgar Türbinleri yalnızca rüzgar estiği zaman enerji üretir. Enerji üretimi rüzgara göre değişir. Rüzgar türbinleri endüstriyel standartlara göre dikilirse modern bir rüzgar türbini yılın %98 inde çalışır halde bulunur. Buda demektir ki

iyi rüzgar alan bir bölgede modern bir türbin 6 aylık kontroller dahilinde güvenilir bir şekilde sürekli enerji üretir.

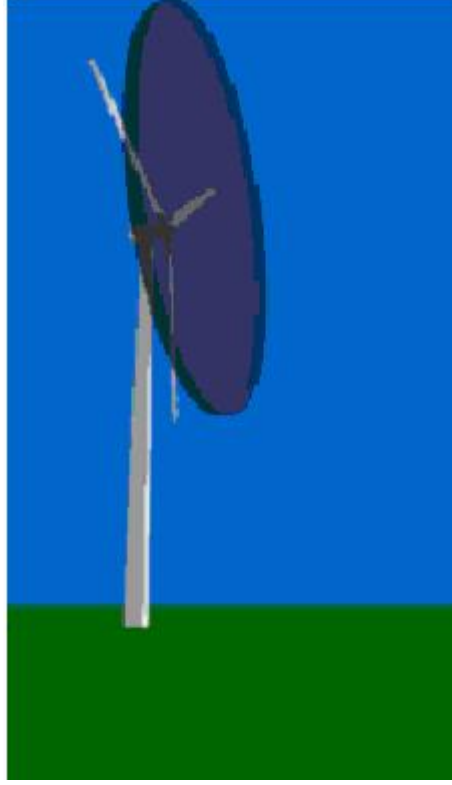
- ✓ Kuş ölümlerine neden olur, radyo ve TV alıcılarında parazitleşme yaparlar Bu nedenle İngiltere başta olmak üzere bir çok Avrupa ülkesinde büyük rüzgar türbinlerinin yarattığı çevre sorunları nedeniyle milli park alanlarının sınırları içine ve çok yakınlarına kurulması yasaklanmıştır. (Türbinlerin haberleşmede parazit oluşturması ise 2-3 km alanda sınırlı kalmaktadır.)

2. RÜZGAR VE RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Bu bölümde önce rüzgar karakteristikleri ve rüzgardan maksimum gücü elde etme yöntemleri üzerine yapılan dizaynlar ardından da rüzgar türbinleri ve şebeke bağlantıları işlenmiştir.

2.1. Rüzgar

Bir rüzgar türbini enerjisini rüzgar enerjisinin rotora bağlı olan kanatları tahrik etmesi ile ve bu kanatların dönmesi ile elde eder. Burada rüzgardaki enerjinin türbine iletilmesi ile elde edilen enerji (mekanik enerji) hava yoğunluğuna, rotor alanına (kanatların süpürdüğü alana) ve rüzgarın hızına bağlıdır.



Resim 1. Rüzgarın Rotora Gelmesi

Yukarıdaki Resim 1’de silindirik olarak gösterilen hava (1m’lik yoğunluğa sahip) diliminin rotora bağlı olan kanat boyu 54m olan 1MW’lık bir türbini tahrik etmesi gösterilmiştir. Burada silindir olarak gösterilen havanın ağırlığı 2.8 tondur. Bir rüzgar türbininden elde edilecek enerji miktarına havanın yoğunluğu, rüzgarın hızı ve rotor süpürme alanı direk etki eden faktörlerdir.

2.2. Havanın Yoğunluğu

Türbin gövdesinden geçen kinetik enerji havanın ağırlığı ile orantılıdır. Dolayısı ile rüzgardaki kinetik enerji havanın yoğunluğuna bağlıdır. Türbinden elde edilecek enerji miktarı, havanın ağırlığı arttıkça artar. Normal atmosfer basıncında (deniz seviyesinde) ve 15° ’de havanın ağırlığı her metre küpte 1.225 kg dır fakat havanın yoğunluğu nemin artması ile yumuşak bir şekilde azalır. Ayrıca hava soğuk ve ılık iken yoğun olur. Yüksek irtifalarda (dağlarda) ise hava basıncı azalır bundan dolayı hava yoğunluğu azalır. Normal hava basıncı altında (deniz seviyesinde) hava yoğunluğunu ifade eden Tablo 6 sonraki sayfada verilmiştir.

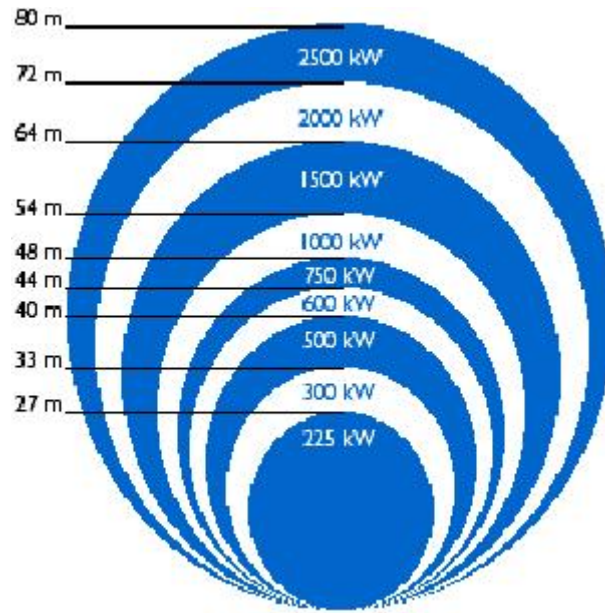
Tablo 6. Havanın Basınç-Yoğunluk-Sıcaklık-Nem İlişkisi

Sıcaklık (Celsius)	Sıcaklık (Fahrenheit)	Hava yoğunluğu (kg/metre küp)	Havadaki maksimum su(nem) (kg/metre küp)
-25	-13	1.423	
-20	-4	1.395	
-15	5	1.368	
-10	14	1.342	
-5	23	1.317	
0	32	1.292	0.005
5	41	1.269	0.007
10	50	1.247	0.009
15	59	1.225	0.013
20	68	1.204	0.017
25	77	1.184	0.023
30	86	1.165	0.030
35	95	1.146	0.039

40	104	1.127	0.051
----	-----	-------	-------

2.3. Rotorun Süpürme Alanı

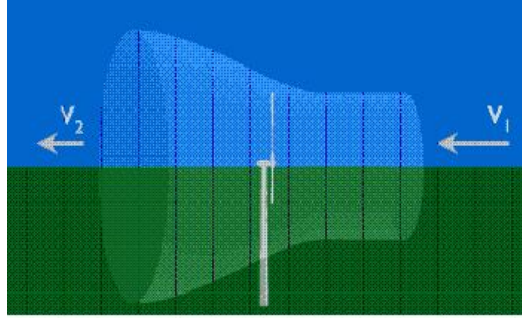
1MW'lık bir rüzgar türbininde rotor çapı 54m'dir. Rotor süpürme alanı türbinin rüzgardan ne kadar enerji elde edeceğini belirler. Rotor çapının arttırılması ile süpürme alanının artması sağlanır.



Resim 2. Rotor Ölçüsü Değişimi ile Elde Edilen Enerji Miktarı Değişimi

Resim 2'den rüzgar türbinlerinin rotor ölçüleri hakkında fikir edinilebilir. Tipik bir rüzgar türbini düşünelim (600 kW gücünde generatöre sahip ve 44m rotor çapında). Eğer rotor çapını 2 kat arttırsak rotor alanı 4 kat artar böylelikle elde ettiğimiz enerjiyi de 4 kat arttırmış oluruz. Rotor çapı arttırılabilir (Rotor çapının arttırılması elde edilen enerji miktarındaki artış Resim 2 ifade edilmiştir.) çünkü türbin üreten firmalar bölgesel rüzgar şartları için ürünlerini optimize ederler. Büyük güçlü bir generatör daha güçlü bir rüzgar ile kullanılabilir bundan dolayı eğer düşük rüzgar gücüne sahip bir bölgeye kurulum yapılıyorsa düşük güçlü generatör seçilmelidir.

2.4. Rüzgar Türbini Rüzgarı Saptırır



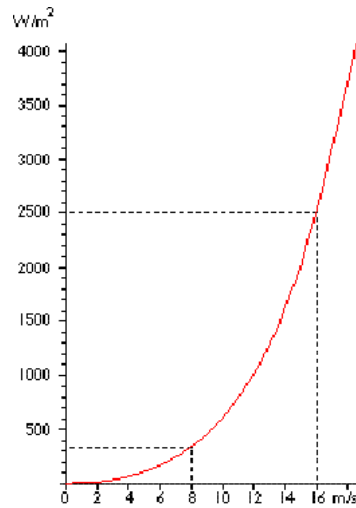
Resim 3. Türbine Rüzgarın Girişi ve Çıkışı

Bir rüzgar türbini rüzgarı, rüzgar rotor düzlemine varmadan, saptırır. Buradan şu sonuca varırız rüzgar türbini kullanarak rüzgardaki enerjinin tamamını elde etmek mümkün değildir. (Yukarıdaki Resim 3’de, sağ taraftan gelen rüzgardaki kinetik enerjiyi elde etmek için bir rüzgar türbininin kullanılması gösterilmiştir.) Bu Betz Kuralı ile açıklanır. Bu kurala göre rüzgardaki kinetik enerjinin %59’nu ($16/27$) rüzgar türbini ile mekanik enerjiye dönüştürebiliriz. Rüzgar türbini rüzgardaki kinetik enerjiyi alıp dönme enerjisine çevirirken rüzgarı yavaşlatır. Buradan rüzgarın türbine gelmeden önce ki hızının, türbinden çıktıktan sonraki hızından daha büyük olduğunu çıkarırız.

2.5. Rüzgardaki Enerji

Rüzgardan elektrik elde edilmesinde rüzgar hızının çok büyük önemi vardır. Elde edilecek enerji ortalama rüzgar hızının kübü ile orantılıdır (eğer rüzgar hızı 2 kat artar ise elde edilen enerji 8 kat artar).

Grafik 8. Rüzgar Hızındaki Değişime Karşın Elde edilecek Enerji Değişimi



Yukarıdaki Grafik 1’den görüleceği üzere rüzgar hızı 8m/s iken elde edilen enerji 314 Watt/metrekaire’dir. Rüzgar hızı 16m/s olduğunda ise 2509 Watt/metrekaire’dir.

Denklem 8. Rüzgardaki Enerji

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times v^3 \times \pi \times r^2$$

P = rüzgardaki enerji (watt)

ρ = havanın yoğunluğu (kg / m^3)

v = rüzgar hızı (m / s)

r = kanat yarıçapı (m)

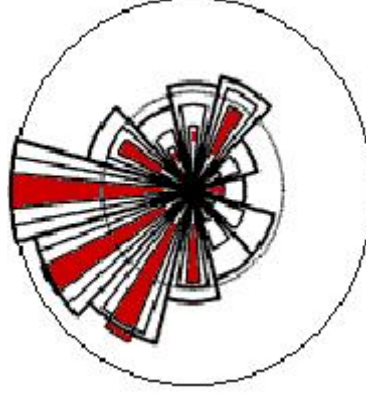
2.6. Anemometre

Rüzgar hızının ölçülmesinde kullanılan ölçü aletine anemometre denir. Ölçümlerde genellikle kap anemometresi (cup anemometer) kullanılır. Kap anemometresi düşey bir eksene ve 3 tane kaba (küçük fincan) sahiptir bu kaplar ile rüzgar yakalanır. Her dakikadaki dönme devri elektronik olarak kaydedilir. Normalde anemometre rüzgar yönünü tespit edebilmek için rüzgar fırılacağı ile donatılmıştır. Diğer anemometre türleri ultrasonik veya lazer anemometrelerdir. Mekanik anemometrelerin dezavantajı elektronik olanlara göre buzlanmaya karşı daha hassas olmalarıdır.

Eğer bir rüzgar santrali kurmak istersek anemometre %10 hata ile ölçüm yaparsa bu kurulum ekonomik anlamda felaket olur. Bu durumda rüzgarı olduğunda %33 daha hızlı ölçmüş oluruz ($1.1^3 - 1 = \%33$). Eğer hesaplamalarımızı farklı rüzgar kuleleri için yeniden yaparsak (10-50m) bu 1.3 bir hata faktörü oluşturur ve sonuçtaki enerji hesaplamalarında %75’lik bir hata yapılır. 700-900\$ fiyat aralığında %1 hata ile ölçüm yapan bir anemometre alınabilir ve böylece bu riski (ekonomik anlamda daha büyük zararı olacak) ortadan kaldırmış oluruz. Rüzgar türbini, üstündeki anemometreden aldığı rüzgar verilerine göre hücum açısını(rotoru rüzgar yönüne çevirir) değiştirir, durma konumuna girer (25m/s rüzgar hızı ve üstü) veya çalışmaya başlar(4m/s rüzgar hızı ve üstü).

2.7. Rüzgar Gülü

Güçlü rüzgarlar genellikle aynı yönden eserler. Rüzgar hızının, frekansının dağılımını veren ve temel rüzgar yönünü ifade eden diyagrama rüzgar gülü denir.



Resim 4. Rüzgar Gülü

Yukarıdaki Resim 4 rüzgar gülünü ifade eder. Burada çevre 12 sektöre bölünmüştür ve her sektör arasında 30 derece fark vardır (8 veya 16 sektöre bölünmüş rüzgar gülleri de vardır fakat standart 12 sektörden oluşan rüzgar gülüdür. Avrupa Rüzgar Atlası.). En dıştaki yarıçap (kamaya benzeyen) 12. sektör bize bağlı frekansı, yönünü verir (rüzgarın bu yönden ne kadar süre estiğini). Diğer sektörlerde aynı şekilde analiz edilirse, bu bize ortalama rüzgar hızına hangi sektörün ne kadar katkıda bulunduğunu verir. Rüzgar gülü sadece yakın rüzgar dağılımlarının yönünü verir gerçek rüzgar hızını vermez.

2.8. Pürüzlülük ve Rüzgar Kesmesi

Yer seviyesinden yükseklerde (1km civarında) rüzgarın etkisi yeryüzünün tamamında hemen hemen aynı etkir. Atmosferin düşük katmanlarında rüzgar hızı yeryüzüne sürtünmeden dolayı etkilenir. Yeryüzünde bir çok keskin engel olduğu yerlerde rüzgarların hızı azalır. Ormanlar ve büyük şehirler rüzgar hızını epey düşürür buna karşın hava alanlarının pistleri gibi (beton zeminler) yerlerde rüzgar hızı çok az düşer. Su yüzeyleri (denizler vb) beton zeminlere daha pürüzsüz olduğu için rüzgar hızına daha az etki yaparlar buna karşın çimlerle veya çalılarla kaplı alanlar rüzgar hızını önemli oranda azaltırlar.

2.9. Pürüzlülük Sınıfı ve Pürüzlülük Uzunluğu

Rüzgar endüstrisinde bir bölgenin rüzgar şartları değerlendirileceği zaman pürüzlülük sınıfı veya pürüzlülük uzunluğu referans alınır. Pürüzlülük sınıfı 3 veya 4 olan bölge

ağaçlarla ve binalarla kaplı bir alını ifade eder buna karşın pürüzlülük sınıfı 0 olan alan su (deniz, göl vb) yüzeylerini ifade eder. Hava limanlarının pistlerinde ise pürüzlülük sınıfı 0.5'dir. Düz ve açık alanlardan oluşan bölgelerde (hayvanların otlatılması için ayrılmış alanlar) bu sınıfa girer. Aşağıda Tablo 7'de pürüzlülük sınıfı ve pürüzlülük uzunluğu tablosu verilmiştir.

Denklem 9. Pürüzlülük Sınıfı ve Pürüzlülük Uzunluğu Arasındaki İlişki

$$z_0 = 0.5 \left(\frac{h \times S}{A_H} \right)$$

$z_0 \rightarrow$ pürüzlülük uzunluğu

$h \rightarrow$ pürüzlülüğe neden olan elamanın yüksekliği

$S \rightarrow$ rüzgara karşı gelen dikey kesit alanı

$A_H \rightarrow$ arazi üzerine dağılmış olan yatay kesit alanı

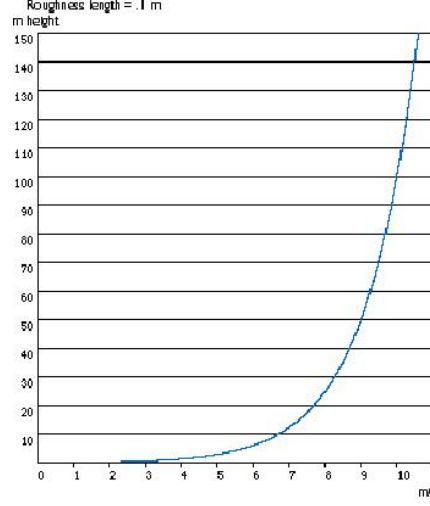
Pürüzlülük sınıfı - pürüzlülük uzunluğu arasındaki ilişki ve bölge tipi ile ilgili Tablo 7 aşağıda verilmiştir.

Tablo 7. Pürüzlülük Sınıfı-Pürüzlülük Uzunluğu

Pürüzlülük Sınıfı	Pürüzlülük Uzunluğu (m)	Enerji Göstergesi (cent başına)	Bölge Tipi
0	0.0002	100	Su yüzeyi
0.5	0.0024	73	Düz yüzeyli tamamıyla açık alan (havaalanları pistleri, biçilmiş çim alanları)
1	0.03	52	Açık tarım arazileri çitsiz, çalısız, ağaçsız, dağınık binalardan oluşan sadece yumuşak tepeler olan

1.5	0.055	45	Birkaç tane evden ve 8m uzunluğunda siperlikten oluşmuş, aralarında yaklaşık 1250m olan ağaçlık veya çalılık alanlar bulunan tarım arazileri.
2	0.1	39	Birkaç tane evden ve 8m uzunluğunda siperlikten oluşmuş, aralarında yaklaşık 500m olan ağaçlık veya çalılık alanlar bulunan tarım arazileri.
2.5	0.2	31	Birkaç tane evden ve 8m uzunluğunda siperlikten oluşmuş, aralarında yaklaşık 250m olan ağaçlık veya çalılık alanlar bulunan tarım arazileri.
3	0.4	24	Köyler, küçük şehirler, birçok veya uzun siperlikten oluşmuş ağaçlık veya çalılık tarım alanları, ormanlar, pürüzlü ve düz olmayan açık alanlar.
3.5	0.8	18	Büyük şehirler, yüksek binalar.
4	1.6	13	Çok büyük şehirler, yüksek binalar ve gökdelenler.

Grafik 9. Rüzgar Hızının Yüksekliğe Göre Değişimi



Önceki sayfada verilen Grafik 2 rüzgar hızının pürüzlülük sınıfı 2 olan bölgedeki yüksekliğe göre değişimini göstermektedir. Yerden yükseklik arttıkça rüzgar hızı artar ve bu rüzgar türbini dizaynı için çok önemlidir. Eğer türbin kulesinin 40m ve rotor çapının 40m olduğunu düşünürsek, kanatlar en üstte iken rüzgar hızı 9.3m/s ve kanatlar en altta iken 7.7m/s' dir. Buradan şu sonuca varırız kanatlar en üst pozisyonda iken etkiyen kuvvet en alt pozisyonda etkiyen kuvvete göre çok büyüktür.

Yükseklikle rüzgar hızı değişimi formülü ise aşağıda Denklem 3'de verilmiştir;

Denklem 10. Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi

$$v = v_{ref} \times \frac{\ln(z / z_0)}{\ln(z_{ref} / z_0)}$$

$v \rightarrow$ yerden z seviyesinde rüzgar hızı (m/s)

$v_{ref} \rightarrow z_{ref}$ seviyesinde referans (ölçülen veya bilinen) rüzgar hızı (m/s)

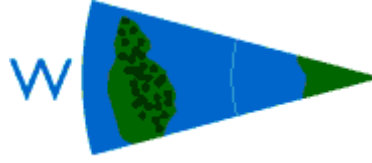
$z \rightarrow$ bulunacak rüzgar hızının (v) estiği yükseklik (m)

$z_0 \rightarrow$ rüzgar yönündeki pürüzlülük uzunluğu (m)

$z_{ref} \rightarrow$ referans (v_{ref} hızı ile esen rüzgarın) yükseklik (m)

2.10. Pürüzlülük Gülü

Eğer elimizde rüzgar türbinini kurmak istediğimiz noktaya ait, tam olarak türbin kulesi yüksekliğinde ölçülmüş, hatasız rüzgar hızı verileri varsa türbinin ne kadar enerji üreteceğini önceden bilebiliriz. Genellikle rüzgar ölçümleri yapılmış alanda hesaplamaları tekrar yapmak zorundayız. Pratikte bu şekilde sonuçlarda yüksek doğruluk sağlanır (tepelerden ve düz olmayan alanlardan oluşmuş bölgeler hariç). Tıpkı rüzgar gülünü kullandığımız gibi (rüzgar enerjisinin farklı yönlerden geldiğini analiz etmekte), pürüzlülük gülünü de türbin kurmayı düşündüğümüz arazinin pürüzlülüğünü analiz etmek için kullanırız. Burada da çevre 12 sektöre bölünmüştür ve her sektör arasında 30 derece fark vardır (8 veya 16 sektörden oluşarlarda vardır). Deniz veya göl yüzeyinden oluşan batı sektöründe bir alan düşünelim (pürüzlülük sınıfı 0).



Resim 5. Pürüzlülük Sınıfı 0 Olan Alan

Bu alan 400m türbin alanı ve 2km ormandan oluşan bir ada olsun. Eğer batı temel rüzgar yönü ise kesinlikle pürüzlülük sınıfı 1, 0 ve 3 için hesaplama yapmalıyız (ileri modeller için gerekir). Bu hesaplamayı yapmak rüzgarın hakim yönünde, türbin yanında (700m veya daha yakın) olan engeller içinde çok önemlidir.

2.11. Rüzgar Hızı Değişkenliği

Rüzgar hızı sürekli inip çıkar bundan dolayı rüzgardaki enerjide sürekli değişir. Yüksek değişimler havaya, yüzey şartlarına ve engellere bağlıdır. Türbinden elde edilen enerji değişimi rüzgar değişimi ile değişir. Yerküre üzerinde çoğu bölgenin gündüz rüzgar hızı gece rüzgar hızından büyüktür. Bu değişim büyük ölçüde sıcaklık farkından kaynaklanır. Rüzgar türbinini işletmecileri veya sahipleri açısından bu bir avantajdır. Çünkü rüzgar türbini ile enerjinin önemli bölümü gündüz üretilir ve elektrik tüketimi oranı gündüz geceye oranla daha yüksektir. Dünyada ki birçok enerji firması gün içinde oluşan tüketim piklerinde normalden daha çok ödeme yapar.

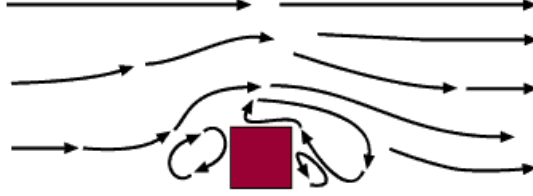
2.12. Türbülans

Eğer arazide düz olmayan alanlar ve ardından engeller(binalar vb) varsa düzensiz rüzgar esmeleri (sıklıkla dönen veya anaför) birbirine benzer türbülanslar oluşur. Türbülans rüzgardaki kullanılabilecek enerjiyi azaltarak rüzgar türbininden elde edilen enerjiyi de

azaltır. Rüzgar türbini kuleleri, türbülansın etkilenmemek için (rüzgarın yere yakın olduğu seviyelerde) yeterli uzunlukta imal edilirler.

2.13. Rüzgar Engelleri

Rüzgar engelleri (binalar, ağaçlar vb) rüzgar hızını önemli ölçüde düşürebilir ve sıklıkla türbülansa sebep olabilir.



Resim 6. Bir Engel Etrafında Rüzgar Akışı

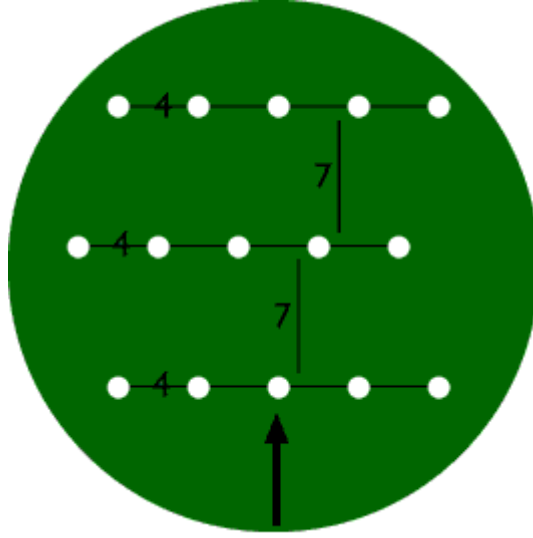
Yukarıdaki Resim 6'da engel etrafında rüzgar akışı gösterilmiştir bu engel yüksekliğinde, 3 tane türbülans bölgesi verebilir. Türbülans engelin arkasında, engelin önüne göre daha belirgindir. Bundan dolayı, rüzgar türbinini engellere uzak noktalar için tasarlamalıyız. Engeller rüzgar hızını, engele akış yönünde azaltır. Rüzgar hızındaki bu azalma engelin gözenekliliğine(girinti-çıkıntı) bağlıdır. Bundan dolayı rüzgar santrali tasarımında engelleri de hesaba katmak gerekir. Eğer türbinler birbirine yakın (1km den daha yakın) ve temel rüzgar yönünde tasarlanırsa bunu da bir engel olarak görmek ve hesaplamaları buna göre yapmak gerekir.

2.14. Wake Etkisi (Wake Effect)

Bir rüzgar türbini enerji ürettiğinden, türbine gelen rüzgarın türbinden çıkan rüzgardan daha düşük bir enerjiye sahip olması gerekir. Bir rüzgar türbini daima aşağıya doğru esen bir rüzgar gölgesi oluşturur. Gerçekte türbin arkasında bir wake meydana gelecektir. Bir rüzgar türbinin arkasından wake izini görmek mümkündür.

2.15. Türbinlerin Yerleşim Etkisi (Park Effect)

Her rüzgar türbini rüzgardaki enerjiyi alıp elektrik enerjisine çevirdikten sonra rüzgarı yavaşlatır. Bundan dolayı türbin yerleşim planında, türbinler arasında, hakim rüzgar yönünde yeterli mesafe bırakılmalıdır. Diğer taraftan, türbinlerin elektrik bağlantıları için türbinleri mümkün olduğunca yakın planlamalıyız. Türbin yerleşim planında, türbinler arasında hakim rüzgar yönünde rotor çapının 5 veya 9 katı, düşey yönde 3 veya 5 katı mesafe bırakılır.



Resim 7. Türbin Yerleşim Planı

Yukarıdaki Resim 7’de 3 sıradan oluşan ve her sırada 5 türbin olan bir örnek vardır(noktalar türbini simgeliyor). Hakim rüzgar yönünde(ok ile gösterilmiş) türbin sıraları arasında rotor çapının 7 katı ve aynı sıradaki türbinler arasında rotor çapının 4 katı mesafe bırakılmıştır.

2.16. Tünel Etkisi (Tunnel Effect)

Yüksek binaların arasında veya dar dağ geçitlerinde yürüdüğümüzde bu etkiyi hissederiz. Hava binalar veya dağlar arasında rüzgarlı taraftan sıkıştırılır ve rüzgarın hızı engeller arasında hissedilir derecede artar. Rüzgar açık alanda 6m/s hızla esiyorsa doğal tünelde (dağ aralarında) 9m/s hızla esebilir.

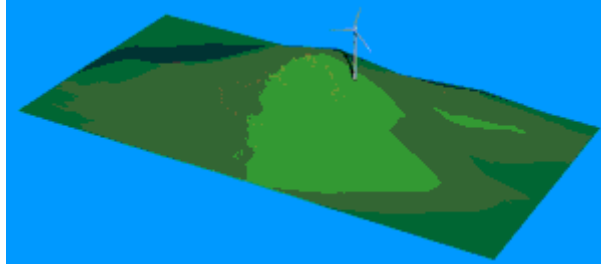


Resim 8. Tünel Etkisi Örneği

Yukarıdaki Resim 8’de görüldüğü üzere, rüzgar türbinini bu şekilde bir tünele yerleştirerek çevre arazide esen rüzgardan daha yüksek bir rüzgar hızı elde edilir. İyi tünel etkisi elde etmek için türbini yumuşak engellerin arasına yerleştirmek gerekir. Eğer tepeler çok pürüzlü ve engebeli olursa alanda türbülanslar oluşur (rüzgar farklı döner yönlerde).

2.17. Tepe Etkisi (Hill Effect-Speed Up Effect)

Türbin yerleşiminde uygulanan yaygın bir yolda, türbini tepenin üstüne yerleştirmektir. Resim 9’da gösterildiği üzere.



Resim 9. Tepe Etkisi Örneği

Özellikle rüzgarın hakim yönünde geniş alanlar varsa bu yerleşim avantajlıdır. Tepelerde rüzgar hızı yere göre daha yüksektir. Rüzgar, rüzgar türbini rotorundan geçerken çok düzensizdir. Eğer tepe sarp (dik) ise veya engebeli ise türbülans göz önünde bulundurulmalıdır.

2.18. Rüzgar Türbini Alanının Seçimi

Rüzgar santrali kurarken (rüzgar tarlası) göz önünde bulundurulması gereken faktörler; Arazinin engebeliği, rüzgar engelleri, park etkisi, tünel etkisi, tepe etkisi olarak düşünülebilir.

Rüzgar türbinini yerleştirecek en uygun yeri bölgenin doğal şartlarına bakarak seçeriz. (Eğer bölgede ağaçlar, çalılar, fundalıklar varsa bunlara bakarak rüzgarın hakim yönünü kolayca belirleriz.) Meteoroloji verileri (30 yıllık bir periyotta çıkarılmış rüzgar gülünden) bizim için en iyi rehberdir. Fakat bu rüzgar verileri direk olarak kurulum yapmayı düşündüğümüz bölgeden elde edilmemiş olabilir buna dikkat edilmelidir. Eğer kurulum yapmayı planladığımız bölgede rüzgar türbini varsa bunlardan elde edilen veriler bölgenin rüzgar şartlarını tespit etmede en iyi rehberimiz olur. Almanya ve Danimarka gibi ülkelerde ülke geneline yayılmış çok sayıda türbin olduğundan, imalatçı firmalar kurulumdan sonrası için hesaplanan değerlerde üretim garantisi verirler.

Rüzgar şartlarını belirledikten sonra bölgenin hakim rüzgar yönünde geniş ve açık olup olmadığı kontrol edilir. Eğer bu geniş ve açık alanda hakim rüzgar yönünde birkaç tane

engel varsa ve düşük pürüzlülük sınıfında ise bunlar kabul edilebilir. Eğer bölgede türbin yerleştirecek yuvarlak tepeler varsa bu çok iyi olur(Hill Effect).

Büyük rüzgar türbinleri elektrik şebekesine bağlanmalıdır. Daha küçük projeler içinde bu gereklidir fakat bağlantı masrafları analiz edilmelidir(uzun iletim hatları gerekebilir.) Modern rüzgar türbini generatörleri 690V’da üretim yaparlar bir transformatörün türbine çok yakın veya türbin kulesi içinde olması gerekir. Eğer iletim hattına çok rüzgar türbini bağlanırsa iletim hattına takviye gerekebilir(dönüştürme oranları daha yüksek transformatörler, hat devre sayısının artırılması, kesicilerin değiştirilmesi).

Türbin alanının seçiminde toprak şartları analizi de gereklidir. Hem türbin temeli için fizibilite hem de türbinin ağır parçalarını bölgeye götürmek için yol yapımı fizibilitesi gereklidir.

Meteoroloji her zaman rüzgar verilerini hava tahmini ve havacılık için toplar ve veriler bölgenin genel rüzgar şartlarını belirlemede (çıkarmada) kullanılır. Rüzgar hızı ölçümlerindeki hassaslık (kesinlik) rüzgar enerjisi planlamasında diğerlerine (hava tahmini vb) göre daha önemlidir.

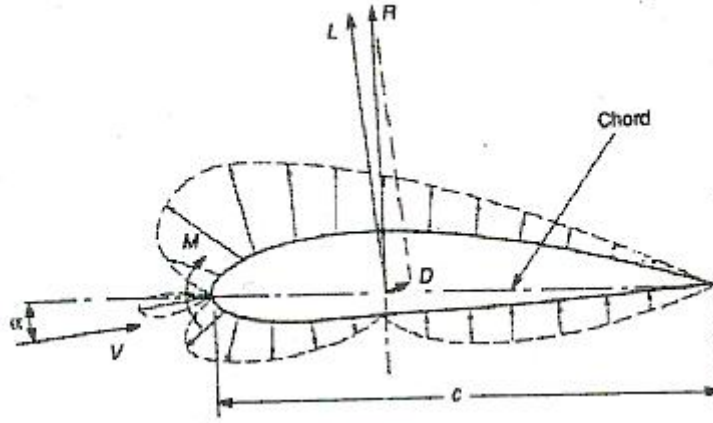
2.19. Rüzgar Türbinleri

*Bu bölüm “Mukand R. Patel, 1999, Wind and Solar Power System, CRC Press, New York” referans alınarak hazırlanmıştır.

Rüzgar türbinlerinin nasıl çalıştığını anlamak için sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri çok iyi bilinmelidir. Sürüklenme kuvveti, cisim üzerinde akış yönünde meydana gelen bir kuvvettir. Örneğin düz bir plaka üzerinde meydana gelecek maksimum sürüklenme kuvveti hava akışının cisim üzerine 90 derece dik geldiği durumda iken, minimum sürüklenme kuvveti de hava akışı cismin yüzeyine paralelken meydana gelir. Kaldırma kuvveti ise, akış yönüne dik olarak meydana gelen bir kuvvettir. (Uçakların yerden havalanmasına da bu kuvvet sebep olduğu için kaldırma kuvveti olarak adlandırılmıştır.) Sürüklenme kuvveti için ise paraşüt örneği verilebilir. Bu kuvvet sayesinde paraşütün hızı kesilmektedir. Sürüklenme kuvvetinin etkilerini minimuma indirebilmek için yapılmış özel cisimlere akış hatlı cisimler(elips, balıklar, zeplin vb) denir. Düz bir plaka üzerine etkiyen kaldırma kuvveti, hava akışı plaka yüzeyine 0 derece açı ile geldiğinde görülür. Havanın akış yönüne göre meydana gelen küçük açılarda akış şiddetinin artmasından dolayı düşük basınçlı bölgeler meydana gelir. Bu bölgelere akış altı da denir. Dolayısıyla hava akış hızı ile basınç arasında bir ilişki meydana gelmiş olur. Yani hava akış hızı arttıkça basınç düşer, hava akış hızı azaldıkça ise basınç artar. Bu olaya Bernoulli etkisi denir. Kaldırma kuvveti de cismin üzerinde emme veya çekme meydana getirir.

2.19.1. Rüzgar Türbini Kanat Profili

Cismin referans hattı ile hava akışı arasında yaptığı açı hücum açısı (α) olarak adlandırılır. Kanat profilinin referans hattına veter hattı da denir. Hafif bombeli yüzeyler, verilen bir hücum açısı için daha büyük bir kaldırma kuvveti meydana getirirler. Dolayısıyla kanat profili denen bu tip şekiller bu durum için uygundur. Kanat profili üst yüzeyde daha hızlı bir akış meydana getirmektedir. Yüksek hava akış hızı, kanat profilinin üst kısmında basıncı düşürerek alçak basınç bölgesi meydana getirir. Bunun sonucu olarak emme etkisi meydana gelerek kanat havalanır. İki temel kanat profili vardır simetrik ve asimetrik. Resim 10'da türbin kanat profili verilmiştir.



Resim 10. Türbin Kanat Profili (L; lift, D; drag, M; moment, c;Kanat uzunluğu R; Bileşke kuvvet)

Bu iki temel kanat profilinde bazı ortak noktalar vardır bunlar; Dışbükey olmaları, hücum kenarlarının(leading edge) dairesel, fırar kenarlarının(trailing edge) da keskin ve sivri olmalarıdır. Aralarında ki temel fark ise, alt yüzeylerin şeklidir. Asimetrik kanat profillerinde, profilin alt yüzeyi hava akışı yönüne en yakın noktadan maksimum kaldırmayı yaparken simetrik kanat profillerinde her iki yüzeyde de aşağı yukarı eşit bir kaldırma görülür.

Kanat profillerinde sürükleme ve kaldırma kuvvetlerinin özellikleri, rüzgar tüneline yapılan testlerle belirlenmektedir. Bu testlerde farklı hücum açılarında birimsiz büyüklükler olan sürükleme katsayısı(C_d) ve kaldırma katsayısı(C_l) hesaplanır. Bu katsayılar yardımı ile türbin için en uygun kanat yapısı tasarlanır.

Denklem 11. Sürüklenme Katsayısı

$$Cd = \frac{D}{0.5 \times \rho \times V^2 \times A_b}$$

D = sürüklenme kuvveti (N)

ρ = hava yoğunluğu (kg / m^3)

V = hava hızı (m / s)

A_b = kanat alanı (m^2)

Denklem 12. Kaldırma Katsayısı

$$Cl = \frac{L}{0.5 \times \rho \times V^2 \times A_b}$$

L = kaldırma kuvveti (N)

Her iki katsayıda rüzgar tünellerinde farklı hücum açıları ve rüzgar hızlarında hesaplanmaktadır. Her bir hücum açısı için hesaplanan Cd , Cl değerlerinin oranları

($\frac{Cd}{Cl}$) alınır, bu oranların en büyük olduğu hücum açısı değeri rüzgar türbininden en iyi verim alınabilecek değerdir.

2.19.2. Kanat Sayısının Etkisi

Türbin dizaynında ilk göz önüne alınması gereken parametre kanat sayısıdır. Rüzgar makineleri kanat sayısı 2 ile 40 arasında değişecek şekilde dizayn edilebilirler. Kanat sayısının çok olduğu durumlar düşük uç hızı oranlı rotorlar için kullanılırlar. Bu durum yüksek kalkma momentinin gerektiği su pompalanması gibi uygulamalar için geçerlidir.

Yüksek uç hızı oranlı rotorlar elektrik enerjisi üretmek için kullanılır ve 2 veya 3 kanatlı olarak tasarlanır. Kanat sayısı kararlaştırılırken dikkat edilecek ana faktörler;

➤ Güç katsayısı üzerine etkisi

- Uç hız oranı (Bu oran pervane dönüş hızının rüzgar hızına oranı olarak tanımlanır)
- Maliyet

Önceleri tek kanatlı ve 2 kanatlı rüzgar türbinleri kullanılsa da, günümüzde yaygın olarak 3 kanatlı rüzgar türbinleri kullanılır. 3, 2 ve 1 kanatlı türbinlerin karşılaştırılması aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- 3 kanatlı rüzgar türbinleri, 2 kanatlılara göre daha düzgün bir çıkış gücüne sahiptir.
- 3 kanatlı rüzgar türbinleri Avrupa'da daha yaygın olmakla birlikte, yaklaşık 1MW'lık türbinlerin geliştirilmesinde önemli rol oynamışlardır.
- 3 Kanatlı pervanenin diğer bir avantajı da bu tipte tüm hızlarda sabit atalet momenti meydana gelir. Bu avantajından ötürü rüzgar türbinleri üzerinde ek bir yük meydana gelmemektedir.
- 2 kanatlı rüzgar türbinlerinin bir kanat eksik olmasından dolayı maliyet ve ağırlık gibi avantajları vardır.
- 2 kanatlı rüzgar türbinleri aynı çıkış gücünü verebilmeleri için daha büyük döndürme hızına ihtiyaç duyarlar. Bu gürültü kirliliği açısından büyük bir dezavantajdır.
- 2 kanatlı rüzgar türbinleri dönmeden dolayı meydana gelen ve kulenin yatay eksenine göre olan bir atalet momentine sahiptir. Bu durum türbin üzerinde ek bir yüklenme meydana getirir ve bu durum sadece sallanan göbek (teeterin hub) ile giderilebilir. Sallanan göbek kullanılmasının nedeni, dönen pervane üzerinde büyük atalet momenti değişimlerinin etkilerini önlemektir.
- Sallanan göbek gereksiniminden dolayı 2 kanatlı rüzgar türbinleri daha kompleks bir yapıya ihtiyaç duyarlar. Bu dizayn öyle olmalıdır ki, sallanan göbek ihtiva etmelidir. Bu sayede, rotor, rotor kanatları kuleyi geçtiği zaman şiddetli şoklardan korunabilmek için eğilme özelliğine sahiptir.
- 1 kanatlı rüzgar türbinlerinin avantajı kanattan tasarruf etmektir
- 1 kanatlı türbinler pek fazla kullanılmamaktadır çünkü 2 kanatlı türbinler için bahsedilen sorunlar bunda daha şiddetli olarak etkili olur.

- 1 kanatlı türbinlerde yüksek hız gereksiniminden dolayı gürültü problemlerine ek olarak rotoru dengelemek için ters yönde ağırlık takviyesine gereksinim duyulur. Bu durumda açıkça 1 kanattan kaynaklanan maliyet avantajı yok olur.

2.19.3. Kanat Yapımında Kullanılan Malzemeler

Rotor kanatlarını yapımında cam lifli güçlendirilmiş plastik (GRP), karbon lifli güçlendirilmiş plastik (CFRP), ahşap alüminyum veya çelikten yapılabilmektedir. Küçük rüzgar türbinler için (çapı 5 metreden az) kullanılacak malzeme seçiminde, ağırlık, sertlik veya kanat karakteristiklerinin yerine daha çok üretim verimliliği ön plana çıkmaktadır. Fakat büyük ölçekli türbinler söz konusu olunca kanat profiline uygun malzeme seçimi oldukça önemlidir. Büyük rüzgar türbinlerinin çoğunda GRP kullanılmaktadır. Bu malzeme hafifliği, yüksek dayanıklılık sağlamasının yanında , diğer malzemelere göre ucuzdur. CFRP yapımı kanatlar prototiplerde başarı sağlamış ve sınırlı bir üretimi vardır. Bu malzeme GRP den daha yüksek dayanıma ve hafifliğe sağlaması bir avantaj olmasına rağmen , çok pahalı olması ekonomik açıdan kullanımını sınırlamıştır.

Ahşap çok uzun zamandan buyana kullanılan bir malzemedir. Ucuz ve hafif olmasına karşın, neme karşı hassas olması ve işlem maliyetleri dezavantajıdır. “Soğuk kalıp” olarak adlandırılan bir teknikle bu problemin üstesinden gelinmiştir. Ahşap kaplama tahtaları bir vakum torbasında epoksi reçine ile haddelenerek, kanat kalıbı şeklinde preslenir. Bu biçimde elde edilen kanatlar, özellikle, büyük rüzgar türbinlerinde dayanıklılık ve hafiflik bakımından diğerlerine göre oldukça büyük bir üstünlük sağlamaktadır. Bunlar üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Çelik ve alüminyum bileşimleri ağırlık ve metal yorgunluğu gibi problemler nedeniyle sadece küçük güçlü türbinlerde kullanılmaktadır.

2.19.4. Kule

Kule, rüzgar türbinlerinde nacelle ve rotoru taşır. Kuleler genellikle tüp şeklinde çelik, kafes yapılı veya betonarme olarak inşa edilir. Halat destekli direk tipi kuleler genellikle küçük türbin uygulamalarında kullanılır.

Tüp şeklindeki kule şekli en çok tercih edilen kule şeklidir. Genellikle 20 – 30 metre yükseklikte üretilir. Kafes yapılı kuleler çelik profillerin kaynaklanarak birleştirilmesi ile oluşturulur. En temel avantajları maliyetlerinin düşük olmasıdır. Benzer boyutlarda bir tüp kulenin hemen hemen yarısı kadar malzeme ve yapım maliyeti vardır. Birçok küçük türbin halat destekli direk tipi kule kullanılarak inşa edilir. En büyük avantajı ağırlığının çok az ve maliyetlerinin çok düşük olmasıdır. Dezavantajları ise araziye kurulum zorluğu ve tarım alanlarının kullanımını engellemesidir.

Rotorun kulenin tepesine yerleştirilmesi durumunda direğin gölgesi kanatlar üzerinde etkili olmayacağı için daha yüksek güç elde edilebilir. Bu durum aynı zamanda daha düşük gürültü daha az kanat yorgunluğu ve daha düzgün güç üretilmesi gibi avantajlar sağlar.

2.19.5. Rüzgar Türbinlerinin Güç Kontrolü

Rüzgar türbinleri elektrik enerjisini en ucuza mal edecek şekilde dizayn edilirler. Bundan dolayı rüzgar türbinleri yaklaşık 15m/s rüzgar hızında maksimum çıkış verebilecek şekilde tasarlanırlar. Daha yüksek hızlarda maksimum çıkış üretebilecek şekilde rüzgar türbinlerini dizayn etmek mantıklı değildir çünkü daha yüksek hızlardaki rüzgarlar pek meydana gelmez. Eğer daha kuvvetli rüzgarlar meydana gelirse rüzgar türbinlerine zarar vermesini önlemek maksadı ile aşırı rüzgarın bir kısmından mahrum olmak gerekmektedir. Bu sebepten dolayı hemen hemen tüm rüzgar türbinleri güç kontrolü içerirler. Günümüzde kullanılan rüzgar türbinleri pitch (değiştirme) veya güç elektroniği sistemlerini kullanarak değişken hızda çalışabilecek şekilde dizayn edilirler. Büyük güçlü rüzgar türbinlerinde hız kontrolü için genelde güç elektroniği sistemleri kullanılır. Kontrol şekilleri;

- Hız kontrolü yapılmaz. (Bu yöntemde türbin, generatör, ve tüm sistem yüksek hıza dayanabilecek şekilde tasarlanır.)
- Yaw (yön) kontrolü. (Yaw mekanizması rotoru rüzgarın karşısına çevirmek için kullanılır. Bu yöntemle, rüzgar hızı dizayn sınırlarını aştığı zaman rotor rüzgar yönünün aksine çevrilir.)
- Pitch (değiştirme) kontrolü. (Rotor hızını düzenlemek için değişen rüzgar hızları ile birlikte pervanelerin yönü değiştirilir.)
- Stall (durdurma) kontrolü. (Bu kontrol yönteminde, rüzgar hızı sistemdeki güvenli çalışma limitini aştığı zaman kanatlar durdurulur. Ani rüzgar sona erdikten sonra türbin yeniden faaliyete geçirilir.)

Son yıllarda stall ile Pitch kontrol sistemlerinin karışımı olan aktif stall sistemi geliştirilmiştir. 1MW ve üstünde ki türbinlerde bu sistem tercih edilmektedir. Teorik olarak bu sistem Pitch kontrollü sistemlerle benzerlik göstermektedir. Çünkü bu sistemde de döndürülebilir kanatlar bulunur. Düşük hızlarda yüksek moment elde edebilmek için makine kanatları düşük hızlarda dönebilecek şekilde programlanmıştır.

2.19.6. Kablo Dönme Sayıcısı

Kablolar türbin generatöründen akımı kule boyunca taşırlar. Eğer türbin uzun bir zaman için sağa sola dönerse bu durumda kablolar birbirlerine karışır. Bu sebepten dolayı kabloların bir birine karıştığını ve düzeltilmesi gerektiğini haber veren bir sayıcı

bulunur. Diğer güvenlik ekipmanları gibi bu durum içinde yedek kurtarma sistemi bulunmaktadır. Bu sistem acil durumlarda (kabloların birbirine çok karıştığı) türbinin pull anahtarı yardımıyla devreden çıkarılması sistemidir.

3. RÜZGAR SANTRALLERİNİN ŞEBEKE BAĞLANTILARI

*Bu bölüm “S. Heier, Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, John Wiley&Sons Ltd., 1996” referans alınarak hazırlanmıştır.

Rüzgar enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin şebeke bağlantısı, sonsuz güçlü şebekeye bağlantı ve zayıf şebekeye bağlantı olarak adlandırılmalıdır. Rüzgar santrallerinin şebeke bağlantısı için gereken cihazlar ve şartlar şunlardır;

- ✓ Anahtar donanımı → (kesici)
- ✓ Koruma cihazları → Generatör için düşük gerilim $[1-0.7] U_n$, yüksek gerilim $[1-1.15] U_n$, düşük frekans $[48-50\text{Hz}]$, ve yüksek frekans $[50-52\text{Hz}]$ koruması ve evirici için frekans koruması gerekmektedir.
- ✓ Reaktif Güç Kompanzasyonu → 0.9 kapasitif 0.8 endüktif arasında olmalıdır.
- ✓ Bağlantı şartları → Senkron generatörler için senkronlama cihazı gerekir, gerilim toleransı $\Delta U \pm \%10 U_n$, frekans toleransı $\Delta f \pm 0.5\text{Hz}$, faz açısı toleransı $\Delta \phi \pm 10$ değerlerinde olmalıdır. Asenkron generatörlerde ise $(0.95-1.05)n_{syn}$ aralığında bağlantı olmaz, ayrıca motor olarak yol vermek için başlangıç akımının sınırlandırılması gerekmektedir. Evirici için AC tarafın yüksüz olması veya senkron generatör için gereken şartların sağlanmış olması gerekir.
- ✓ Şebeke Geri Beslemesi → Çalışma koşullarının bozulmaması için harmonik akımları, gerilim dalgalanmaları ile ilgili geri besleme alınması gerekmektedir.

3.1. Frekans Çevirici Sistemleri

Rüzgar santrallerinde (değişken hızlı sistemlerde) generatörün frekans ve gerilimini şebeke frekans ve gerilimine ayarlamak için kullanılır. Frekans çeviricilerin döner alanlı transformatörlere göre avantajları, az kayıplı dönüşüm, düşük hacim- ağırlık, az bakım, aşınmasız çalışmasıdır. Rüzgar santrali sistemlerinde 3 fazlı generatörler kullanıldığı

için 3 fazlı çeviriciler göz önüne alınmalıdır. Bu çevirici sistemlerinin başlıca parçaları, yarı iletken anahtarlama elamanları, elektronik sinyal işleme ünitesi, koruma ve düzenleme yapan elamanlardır. Doğrudan frekans çeviriciler özellikle frekansın azaltılması için kullanılır. Ara devreli frekans çeviricileri doğrultucu, DC akım veya gerilim devresinden oluşur. Ara devreli frekans çeviricileri enerji çevriminde ve değişken hızlı rüzgar enerjisinin şebekeye bağlantısında bir üstünlük sağlamıştır. Doğrudan frekans çeviriciler ise çift çıkışlı asenkron generatörlerin rotor devresinde kullanılır.

3.2. Generatör ve Doğrultucu Arasındaki Hat

Rüzgar türbinlerinde generatör kulenin üstündedir. Şebeke bağlantısı, kontrol ve frekans çevrim sistemleri kulenin altındadır. Bu nedenle hat frekans çeviricilerini etkiler. Bağlantı kayıplarını azaltmak için, generatör ile 20kHz'e kadar çalışma frekansı olan kontrollü doğrultucu arasında en kısa mesafeden bağlantı yapılmalıdır. Bu da hatta, geçici yüksek gerilimlere ve elektromanyetik emisyonu neden olan, yüksek frekanslı bozucu sinyallere neden olur. Gerilimin ani artışı iletken izolasyonunda bozulmalara neden olur. Uzun dönemde izolasyon zarar görür. Alçak geçiren filtre (LC) kullanılarak gerilim sınırlandırılır fakat generatör akımının şekli bundan etkilenir.

3.3. Doğrultucular

Sürekli uyarmalı değişken hızlarda çalışan senkron generatörler, şebeke frekansından farklı frekanslar üretirler. Generatör çıkış geriliminin veya akımının doğrultulması ve ara devredeki elemanların filtre etkisi şebeke frekansının generatör frekansından izole edilmesini sağlar. Doğrultucunun başka görevi(frekans çevirici sistemlerde) çıkışı kontrol ederek herhangi bir hata durumunda generatörü korumaktır. Dinamik yük altındaki doğrultucu ile senkron generatör kombinasyonunun kararsız çalışmayı başlatacağı göz önüne alınmalıdır. Kararlı çalışma kontrollü doğrultucuların kullanımı ile sağlanır. Kontrollü doğrultucular yüksek maliyete sahiptir. Fakat özellikle sürekli uyarmalı generatör çalıştırılırken önemli avantajlar sağlar. Hem generatör akımının genliğini hem de çıkış momentinin ayarlanmasını ve kontrolünü sağlar.

3.4. Tristörlü Eviriciler

Altı darbeli evirici köprülerinde yüksek harmonik salınımları şebeke akımının sinüzoidal formunda önemli sapmalara neden olmaktadır bundan dolayı maliyeti yüksek filtre cihazları kullanılmalıdır. Ayrıca şebeke akımının faz sırasını ve frekansını ayarlamak mümkün değildir. Bunlar tristörün tetikleme bağlı olduğu gibi, şebeke ve rüzgar santrali sistemine göre önceden de belirlenebilir. Şebekeye uygunluk 12 darbeli eviricileri ile mümkündür. 12 darbeli evirici, iki adet 6 darbeli eviricinin paralel bağlanması ve 30 derece faz farklı 2 sekonder sargılı transformatörün kullanılması ile

elde edilir. Böylece şebeke akımı sinüzoidal forma oldukça yaklaşır. 5. ve 6. harmonikler altı darbeli eviriciye oranla, hemen hemen kaybolur. Bununla beraber 12 darbeli eviriciler, generatörün ve 2 sekonderi olan transformatörün özel tasarımını gerektirir.

3.5. PWM Eviriciler

Şebeke bağlantısının iyi olması özellikle PWM kendinden komütasyonlu frekans çeviricileri kullanılarak yapılır. PWM frekans çeviricisinin karakteristiği darbe düzeninin kontrolü ile belirlenir. Tolerans bandı gerekli tetiklemeleri belirler, seçilen tolerans bandına ve akımın fonksiyonuna bağlı olarak anahtarlama oranı ayarlanır.

3.6. Transformatörler

Rüzgar türbinleri nominal güçlerinde (yaklaşık 300kW) çalışmaya başladıklarında yüksek gerilim kademesindeki iletim hattına bağlanır. Düşük gerilim kademesinde üretim yapan türbinler için transformatör kullanmak gerekir. Transformatör boyutlarından dolayı türbin dışına kurulum ve bu kurulum maliyetlerini artırır. Bundan dolayı türbin ile tümleşik transformatör kullanmak mali açıdan daha iyi bir çözümdür. Klasik yağlı transformatörler genelde büyüktürler ve türbin kulesinin içine sığmazlar. Belçikalı Pauwels adlı firma tarafından, rüzgar türbinleri için çok avantajlı olan silikon soğutmalı transformatör geliştirmiştir.

3.7. Şebekenin Korunması

Şebeke koruması kullanılan ekipmanlara ve cihazlara zarar verebilecek yüksek gerilim ve akımlara karşı korunmayı sağlar. Şebeke kısa devre gücü değişkenlerin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Bu değişkenler şebeke geri beslemesinin değerlendirilmesi ve belirlenmesi için gerekli sınırlandırılmış değerlerin elde edilmesi için kullanılır. Çalışma esnasında senkron veya asenkron generatör şebekenin kısa devre gücünü artırır. Kısa devre gücü hesaplarında şebekeye devamlı bağlı olmayan makinelerin katılmaması kesici cihazlarının boyutlandırılmasında hatalara yol açar. Kısa devre akımının maksimum değerini belirlemek için boyuna reaktansın doymuş değeri göz önüne alınmalıdır. Asenkron makinelerde geçici zaman periyodundaki efektif geçici reaktans başlangıç empedansı ile belirlenir. Generatörden uzakta olan kısa devrelerde hattın ve transformatörün empedansı da göz önüne alınmalıdır. Uzun süreli kısa devrelerde şebekenin senkron veya asenkron Generatörden beslenmesine bağlı olarak önemli farklar ortaya çıkar. Bununla beraber generatör uyarma akımı şebekeden çekiliyorsa kısa devre terminal geriliminin sıfıra düşmesine neden olur.

Generatör tarafından beslenen 3 fazlı hatlarda tek fazlı kısa devrede rezonans etkisi ortaya çıkar. Kapasitif kompanzasyon cihazlarının ve generatörlerin endüktivitelerinin

etkisi, tüketicinin ve şebeke filtre reaktanslarının bağlantısı faz hatlarında yüksek gerilimlerin oluşmasına neden olur. Hesaplamalar ve ölçümler orta ve yüksek gerilim şebekelerindeki bu tip hatalarda gerilimin (düşük yüklerde) nominal gerilimin 20 katına ulaştığını göstermiştir. Yüksek gerilim koruma cihazları bu tip yüksek gerilimleri sınırlandırabilmeli ve böyle bir durumda ortaya çıkan enerjiyi absorbe edebilmelidir.

3.8. Rüzgar Santralinin Şebekeye Etkileri

Rüzgar santrallerinin şebekeye etkileri, kısa devre gücündeki değişimler, gerilim dalgalanmaları, gerilim simetrisizliği, harmonikler, çıkış değişiklikleri olarak sıralanabilir.

Rüzgar elektrik santralleri normal çalışma koşullarında (kısmi veya tam yükte) santralin dizaynına bağlı olarak 10Hz ile 1kHz arasında çıkış verir. Çıkış dalgalanmaları, genlikler ve değişme oranları ile belirlenir. Çıkış dalgalanmasına periyodik olan veya olmayan rüzgar hızı gradyeni neden olur. 50kW civarında şebekeye direk bağlı sabit hızlı asenkron generatörlerde doğrultucusu ve eviricisi bulunan değişken hızlı senkron generatörlere oranla çıkış dalgalanması daha azdır. Daha büyük güçlü asenkron generatörlerde, kaymanın küçük değişikliklerinde çıkış dalgalılığı artar. Diğer taraftan rotorun yüksek zaman sabiti (değişken hızlı sistemlerde) çıkış düzgünlüğünü artırır. Çıkışın düzgünlüğü rüzgar enerjisi türbinlerinin yerleştirme şekline ve yerel rüzgar koşullarına bağlıdır. Şebekeye bağlı sabit hızlı rüzgar türbinlerinin düzgünlük etkisi şebeke bağlantısının sütunlara veya satırlara göre bağlantısıyla farklılık gösterir.

Rüzgar santrallerinin şebekeye etkisi şebeke bağlantısı ve gerilim seviyesi ile belirlenir. Hem gerilimin simetrik olmayışı hem de gerilimdeki dalgalanmalar ve titreşimler göz önüne alınmalıdır. Maliyet nedeniyle rüzgar santrallerindeki elektriksel elemanlar alçak gerilime (1000V) göre tasarlanır. Orta ve yüksek gerilimli hatları besleyen 100kW ile 1MW arasındaki sistemler transformatör ile şebekeye bağlanır. 380kV seviyesindeki şebekenin beslenmesi rüzgar santralleri için bir seçenek değildir. Şebeke bağlantılı rüzgar enerjisi santrallerinde sadece simetrik sargılı 3 fazlı generatörler kullanılır. Güçlü makinelerde, normal çalışmada şebeke üzerindeki asimetric etki ihmal edilebilir. Şebekede simetrik olmayan yükler hem senkron ve asenkron generatörleri hem de transformatörleri ve iletim hattını bozar. Bu da uyarma alanına ters ve iki kat hızla dönen bir döner alan oluşturur bu alan özellikle rotorda ek kayıplara neden olur.

Eğer şebeke yükünün büyük bir bölümü rüzgar santrallerinden besleniyorsa, rüzgar hızına bağlı olarak, çıkış değişkenleri gerilim dalgalanmalarına ve titreşim etkisine neden olur. Gerilim değişimleri, rüzgar hızının değişimi, generatör tarafındaki anahtarlama, yükün veya generatörün şebekeye bağlanması gibi özel durumlarda oluşur. Büyük rüzgar enerjisi sistemlerinde (değişken hızda çalışmada) küçük rüzgar santrallerine oranla çıkış düzgünlüğü daha iyidir. Bu tür santrallerde, kısa süreli gerilim değişimleri ve titreşimler ikinci derecede önemlidir. Küçük ve orta büyüklükteki rüzgar santralleri, büyük gruplar halinde şebekeye bağlandıklarında şebekeyi etkilerler.

Bununla beraber, bir çok ünitenin bağlantısı toplam çıkışta daha iyi düzgünlük sağlar. Bu nedenle normal çalışmada gerilim dalgalanmalarının herhangi bir zarar vermesi beklenmez. Tek başına çalışan rüzgar enerjisi santralinin çıkışındaki yüksek dalgalanmalar, zayıf şebekelerde gerilim değişimlerine neden olur. Bu nedenle büyük ünitelerin çıkışındaki dalgalanmaların mümkün olduğunca az olması istenir. Bu da değişken hızlı türbin ve yüksek zaman sabitli rotora sahip generatör sistemi ile sağlanır.

Şebeke gerilimindeki periyodik veya periyodik olmayan dalgalanmalar filamanlı lambalardaki ışığın titreşimine neden olur. Tüketicie sağlanan gerilimdeki dalgalanmaların sınırlandırılması gerekmektedir. Uygun santral tasarımı ve kontrol ile bozucu etkiye sahip olan gerilim dalgalanmaları ve titreşim mümkün olduğunca azaltılmalıdır.

Harmonikler akım ve gerilim sinüzoidal değilse oluşur. Harmonikler, lineer olmayan empedans karakteristiğine sahip kullanıcılar, güç elektroniği elamanları ve elektrik makinelerinin doyuma gitmesi ile oluşur. Temel frekansın tamsayı katlarına sahip olmayan frekansa sahip sinüzoidal salınımlara iç harmonikler denir. Bu tip salınımlara frekans çeviricileri sebep olduğu gibi elektrik makineleri de sebep olur. İç harmonik frekanslar harmonik salınım frekansının yüksek ve düşük bantlarında oluşur ve temel frekanstan küçüktür. Şebeke gerilimindeki distorsiyonu ölçmenin bir yolu harmonik distorsiyonu faktörüdür. Harmonik distorsiyonu faktörü(k_u), temel dalgası olmayan salınının efektif değeri ile temel dalgalı salınının efektif değerinin oranını verir. Toplam harmonik distorsiyonu(k_{THD}) ise temel dalgalı salınının efektif değeri ile temel dalganın efektif değerinin oranını verir.

Denklem 13. Toplam Harmonik Distorsiyonu

$$k_{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{v=2}^n U_v^2}{U_1^2}}$$

Denklem 14. Harmonik Distorsiyonu Faktörü

$$k_u = \sqrt{\frac{\sum_{v=2}^n U_v^2}{\sum_{v=1}^n U_v^2}}$$

Rüzgar santralini şebekeye bağlamanın bir yolu olan şebeke komütasyonlu çeviriciler harmonik oluştururlar. Eğer şebeke bir veya birkaç rüzgar santralinin bağlantısı olarak düşünülürse, bu konfigürasyonun toplam empedansının şebekeyi besleme sırasındaki davranışı bellidir ve bu empedans kaynaktaki dağıtım sistemindeki ve kullanıcıdaki

omik endüktif ve kapasitif yüklerin bileşimi temel alınarak belirlenir. Bu tip bir uyardırmaya kullanıcılar, reaktörler, elektrik makineleri ve özellikle güç eviricileri neden olur. Elektrik makinelerinin şebekeye verebileceği harmonik uygun yerleşimlerle veya özel tasarımlarla düşük tutulabilir. Bu nedenle rezonans uyarımına hem rüzgar santrallerinde kullanılan frekans çeviricilerinin hem de güç elektroniği devrelerinden oluşan tüketici sistemlerin neden olduğu söylenebilir.

Elektronik güç çevrim sistemlerinin kullanılması yüksek verim ve iyi kontrol gibi avantajlar sağladığı gibi özellikle şebeke geriliminin bozulmasına neden olmak gibi dezavantajları da vardır. Zayıf şebekelere bağlı yüksek performanslı frekans çeviricileri, şebekedeki harmonik geriliminin artmasına neden olur. Çalışma hatalarını sisteme arıza etkilerini engellemek için harmonik akımları düşük tutulmalıdır. Bu amaçla şebeke etkisini azaltan özel sistemler kullanılmalı veya varolan harmonikler pasif devrelerle azaltılmalıdır.

Kapasiteler harmonik filtresi olarak kullanılsa bile büyük önem taşır, motorların ve generatörlerin endüktif reaktif gücünü kompanze ederler ve güç faktörünü iyileştirirler. Frekanstaki ve kapasitedeki artış düşük empedanslara neden olur. Bu harmonik akımlarını etkilemez fakat temel dalgayı etkiler. Dolayısıyla kompanzasyon kapasitelerinin filtre etkisi vardır.İyi filtreleme yöntemlerinden biriside kapasitif ve endüktif elemanların seri bağlanması ile sağlanır. Bu şekilde elde edilen filtre seri rezonans filtresidir. Bu filtreler rezonans frekansına yakın çok küçük empedanslara sahiptir. Rezonans frekansının altında, filtre kapasitif davranış gösterir rezonans frekansının üstünde ise endüktif davranış gösterir.Seri rezonans filtreleri dar frekans aralığında filtre edilecek akımlarda kullanılır. Bu nedenle filtre devresinde kullanılacak kapasite düşük tutulmalıdır. Geniş frekans bandındaki akımları şebekeden temizlemek için geniş band geçiren filtreler kullanılmalıdır. Geniş band filtrelerinin davranışı düşük frekanslarda kapasitör ile yüksek frekanslarda direnç ile karakterize edilir. Eğer değişik rezonans frekanslı filtreler kullanılırsa paralel bağlantı nedeniyle, paralel bağlantı rezonansı oluşur. Bu durum paralel bağlı filtrelerden endüktif ve reaktif empedans bileşenlerinin eşit olması halinde oluşur.

Rüzgar santrallerinin şebekeye bağlantısının yapılması aşamasında çıkış dalgalanmalarını, harmonikleri ve grilim değişimlerini en aza indirecek tasarım yapılmalıdır. Çıkış dalgalanmalarını ve gerilim değişimlerini en aza indirecek tasarımda büyük önem taşıyan hakim rüzgar yönü, ortalama rüzgar hızı ve rüzgar frekansı için iyi bir fizibilite çalışması yapılmalıdır.

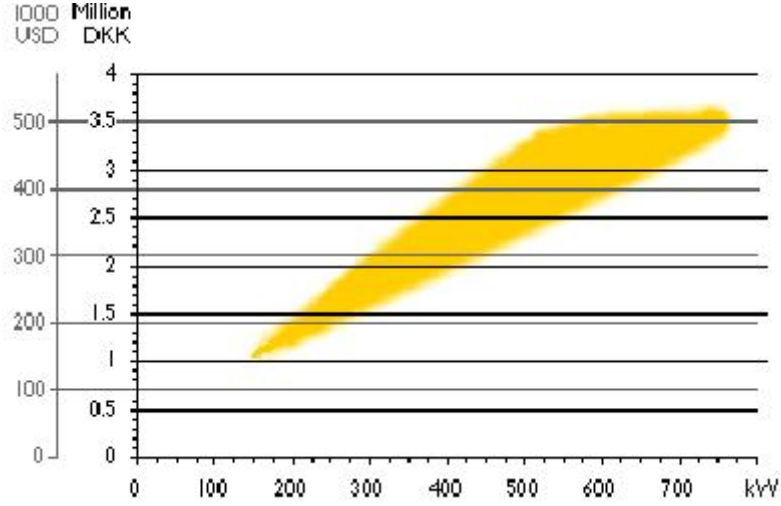
4. RÜZGAR SANTRALİ EKONOMİSİ

*Bu bölüm Danimarka Rüzgar Endüstrisi Kurumu referans alınarak hazırlanmıştır.

4.1. Rüzgar Türbini Fiyatları

Aşağıdaki grafikte Danimarka’da kullanılan rüzgar türbinlerinin fiyat karakteristiği gösterilmiştir (Şubat 1998). Grafikten de görüleceği üzere fiyatlar generatör gücü ile değişmektedir. Çünkü generatör gücünün değişimi ile rotor çapı ve kule yüksekliği de değişmektedir. Kulenin boyunun 1m artması maliyeti 1500 USD arttırmaktadır. Büyük rotor çapına sahip küçük rüzgar türbini (bütün maliyetleri göz önünde bulundurursak), küçük rotor çapına sahip büyük rüzgar türbinine göre daha pahalıdır.

Grafik 10. Rüzgar Türbini Fiyat-Güç Eğrisi



150kW gücünde ki rüzgar türbini ile 600kW gücündeki rüzgar türbinini maliyet olarak karşılaştırsak, gücün 4 kat artmasına karşın fiyatın kabaca 2 kat arttığı görülür. Bu fiyat artışındaki oran sebebi 150kW'lık türbin inşa etmek ile 600kW'lık türbin inşasında yapılan harcamaların hemen hemen aynı olmasıdır. Tek türbin yerine, bir rüzgar tarlasını(bir çok türbinden oluşmuş) işletmek ekonomik olarak daha avantajlı olabilmektedir. Maliyet ve ürün karşılaştırmaları 1000kW civarında yapılır. Bu şekilde mevcut rüzgar şartlarına en uygun türbin seçilir. 600kW – 700kW civarında maliyetler birbirine çok yakındır, bu durumda büyük güçlü olanı seçmek gereklilik olarak düşünülmemelidir. 750kW gücünde generatörü olan türbin küçük rotor çaplı olarak, 600kW gücünde generatörü olan türbine nazaran daha az enerji üretir(düşük rüzgar şartlarının olduğu bölgede). Generatör gücü, kule yüksekliği ve rotor çapı için tipik olarak bir ölçü şöyledir. 1000kW gücünde generatöre sahip bir türbinin kule uzunluğu 60-80m arasında ve rotor çapı 54m civarındadır. Bir rüzgar santrali kurulumu için ortalama fiyatlandırma her kilo Watt için 1000USD şeklindedir. (Bu sadece kurulum içindir, üretim maliyeti değildir. Örneğin, 10000kW gücünde bir rüzgar santrali için

kurulum maliyeti ortalama olarak $10000 \times 1000 = 10000000$ USD' dir.) Tek türbin veya az sayıda türbinlerden oluşan rüzgar santrallerin maliyeti, çok sayıda türbinden oluşan santrallere göre daha fazladır.

4.2. Rüzgar Türbini Kurulum Maliyetleri

Kurulum maliyetlerinin temel bileşenleri, betonarme temel(kuleyi yerleştirmek için), yol yapımı(ağır ve büyük parçalardan oluşan türbini taşımak için), transformatör(gerilim seviyesini değiştirmek için), iletişim bağlantıları(türbini uzaktan kontrol etmek ve durumunu takip etmek için), kablo maliyetleri(türbinden transformatöre ve transformatörden iletim hattına) şeklinde sıralanır.

Yol ve kulenin dikileceği temelin yapım maliyetleri tümüyle toprağın şartlarına bağlıdır. Yapılan bu yol veya yollar 30 tonluk kamyonları taşıyacak kapasitede olmalıdır. Maliyeti etkileyecek değişken türbin kurulumu yapılacak yerin yollara olan uzaklığı (montaj için kurulum yerine vinç getirmek gerekir) ve santralde üretilecek enerjiyi iletecek iletim hattına olan uzaklıktır. İletişim bağlantıları ve uzaktan kontrol kurulum için zorunluluk değildir(bu sistemler pahalı değildir). Fakat bu sistemler türbin kurulum maliyetlerinin içinde tutulur. Türbin ekipmanlarının kurulum yerine taşınması, kurulum yapılacak alan çok uzak ise maliyet hesaplamalarına katılır ve bu maliyet genellikle 15000 USD' yi aşmaz.

Bir rüzgar tarlası oluşturup bir çok türbini kurmak, tek bir türbin kurmaya göre daha ucuza mal olur (burada maliyeti etkileyen faktörler, yıllık bakım için gitme, işletme ve üretim takibi vb). Fakat elektrik şebekesine bağlanmada bir sınır vardır. Eğer kurulum yapılacak bölgenin şebekesi (veya en yakın şebeke) üretilecek enerjiyi taşıyacak kapasitede de değilse (gerilim kademesi düşük vb) iletim hatlarının güçlendirilmesi gerekir. Bundan dolayı kurulum yapılacak bölge incelenerek, iletim hatları için bir harcama yapıp yapılmayacağı değerlendirilir.

4.3. İşletme ve Bakım Masrafları (O&M)

Modern rüzgar türbinleri 20 yıllık ömür ve 120000 saat işletme süresi esasına göre tasarlanırlar. Türbinin gerçek ömrü, türbinin kalitesine ve bölgenin hava şartlarına bağlıdır.

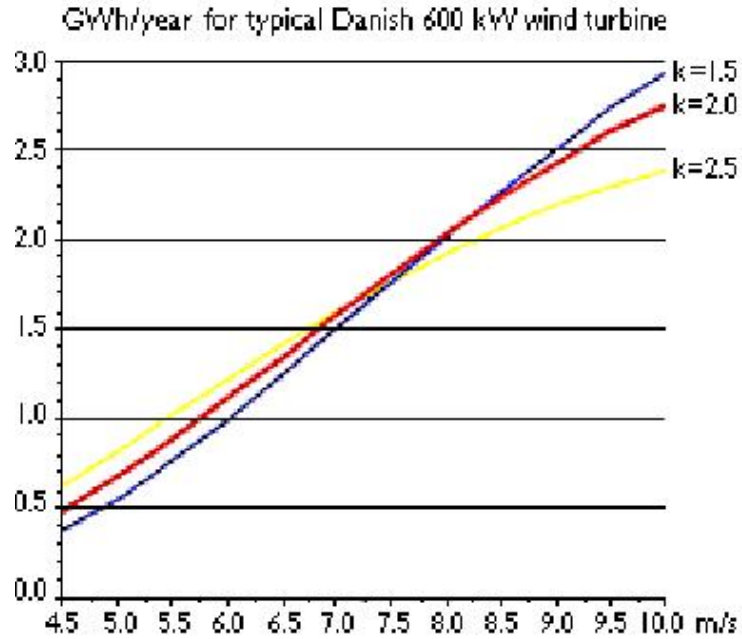
Elde edilen tecrübeler türbinler yeni iken bakım masraflarının çok düşük olduğunu fakat türbinler eskidikçe bakım maliyetlerinin arttığını göstermiştir. Bu tecrübe Danimarka' da 1975 yılından beri kurulan 5000 rüzgar türbininin işletilmesi esnasında elde edilmiştir. Bu çalışma da aynı yaşa sahip fakat farklı üretim kapasitesine sahip türbinler karşılaştırılmıştır. Eski türbinlerin (25kW-150kW) yıllık bakım maliyeti ortalama olarak (türbin kurulumunda ki güce göre) 3cent/kW dir. Büyük ve sağlam yeni türbinler, daha az bakım masrafı gerektirir (modern makineler büyüdükçe bakım masrafları aynı oranda artmaz). Yeni makineler, türbin ilk kurulum gücüne göre, yıllık 1.5-2 cent bakım

masrafı gerektirir. Türbinin yıllık bakımlarından oluşan masraflar sabittir ve 0.001USD/kWh civarındadır.

4.4. Türbinden Elde Edilecek Enerji

Aşağıdaki Grafik 4’de türbinden elde edilecek enerjinin rüzgar hızına bağlı değişimi verilmiştir (600kW’lık rüzgar türbini için). Grafikten anlaşılabacağı üzere kule yüksekliğinde 6.75m/s hızla rüzgar eserse türbinden yılda 1.5GWh enerji elde edilir ($k=2$ için) ve elde edilecek enerji kule yüksekliğindeki rüzgar hızına bağlıdır. Bu grafik 3 farklı k (shape faktörü) için çizilmiştir.

Grafik 11. Türbinden Elde Edilecek Enerjinin Rüzgar Hızına Göre Değişimi



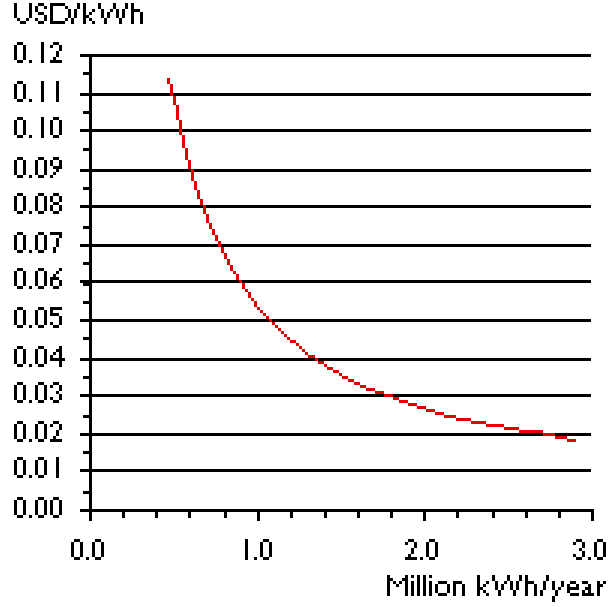
Grafik 4’de yıllık enerji çıktısı için türbinin işletilmeye hazır olduğu ve sürekli işletildiği farz edilmiştir. Gerçekte ise türbinler her 6 ayda servise ve kontrole alınırlar. Türbin ekipmanlarındaki arızalarından (yıldırım düşmesi vb) dolayı türbin devre dışı kalabilir. Geniş kapsamlı araştırmalar ve istatistik çalışmalar, türbin üreticilerinin türbinin işletilme süresini türbin ömrünün %98’ni aldığını gösterir. Türbin yüksek hızlı rüzgarlar süresince hiç servise alınmazsa, bu enerji çıkışını %2 olarak artırır.

Rüzgar türbinini diğer elektrik üretim sistemleri ile karşılaştırsak. Yüksek güvenilirlik derecesi diğer elektrik üretim teknolojilerini kapsar. Güvenirlilik faktörü (rüzgar hızı değişimleri vb) ekonomik hesapların en önemli etki faktörüdür.

4.5. Rüzgar Enerjisi Ekonomisi

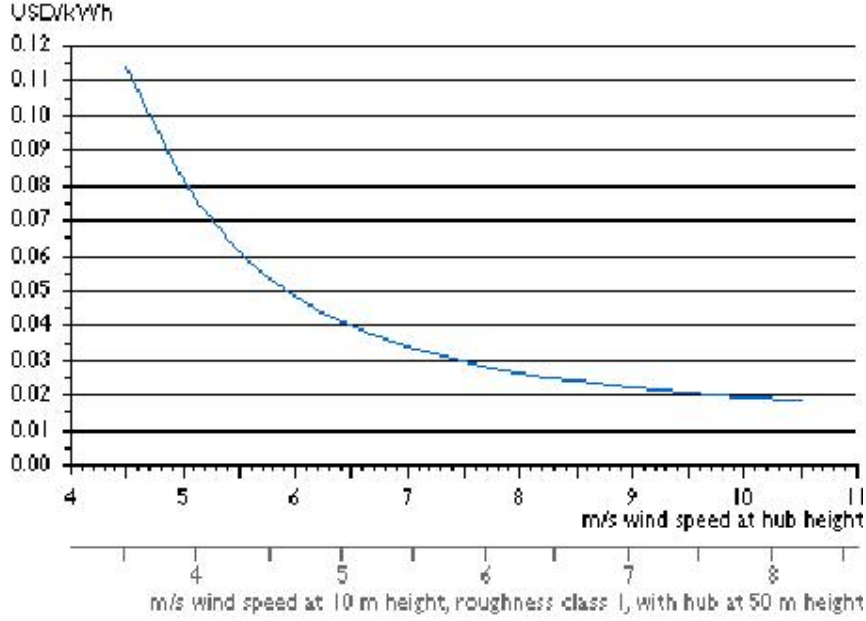
Daha öncede ifade ettiğimiz üzere rüzgar türbininden elde edilecek enerji rüzgar hızı ile orantılıdır. Bundan dolayı rüzgar enerjisi için ekonomik değerlendirmede tek fiyat yoktur, bu fiyat rüzgar hızı ile değişir.

Grafik 12. Enerji Birim Fiyatı-Üretilen Enerji Miktarına Göre Değişimi



Yukarıdaki Grafik 5’de 600kW’lık bir rüzgar türbininin enerjinin birim fiyatının (1kW enerji üretim maliyeti) yıllık üretilen enerjiye göre değişimi gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, yıllık üretilen enerjinin 2 kat artması durumunda, birim enerji fiyatının aynı oranda azaldığı görülür. Eğer bakım maliyetleri yükselirse (türbinin yaşı arttıkça) bu grafik doğru olmaz fakat doğruya çok yakın olur.

Grafik 13. Enerji Birim Fiyatının Rüzgar Hızına Göre Değişimi



Yukarıdaki Grafik 6'da ise enerjinin birim fiyatının rüzgar hızına bağlı değişimi gösterilmiştir. (Grafikte gösterilen rüzgar hızı kule yüksekliğindeki hız ve türbin gücü 600kW'dır. Rüzgar hızı için iki kadran vardır.)

Yukarıdaki grafik, 600kW gücünde türbin, proje ömrü 20 yıl, yatırım maliyeti (kurulum dahil) 585000 USD, O&M masrafları 6750 USD/yıl, yıllık %5 faiz durumuna göre çizilmiştir. Yerden 10m yükseklikteki rüzgar hızı yükseklik 50m olduğunda %28-%35 oranında artar. Grafik altındaki ikinci (alttaki) ekseninde verilen rüzgar hızı grafik üzerinde de açıklandığı üzere kule yüksekliğinde değil, 10m yükseklikteki hızdır. 10m yüksekliğindeki rüzgar hızını referans alarak 50m (kule yüksekliği) yüksekliğinde ki rüzgar hızına geçerseniz yüksek rüzgar hızına geçmiş oluruz. Böylece üretilen enerji miktarının kule yüksekliğinde esen rüzgar hızına göre değişimi elde edilir. 10m yüksekliğinde rüzgar hızı 6.25m/s ise 50m yüksekliğinde(kule yüksekliğinde) 8m/s'dir (pürüzlülük sınıfı 1-2 arasındadır).

Rüzgar santrali için ortaya çıkacak masrafları etkileyecek 3 temel unsur vardır. Bunlar; Amortisman, İlk yatırım tutarı, İşletme ve bakım masraflarıdır.

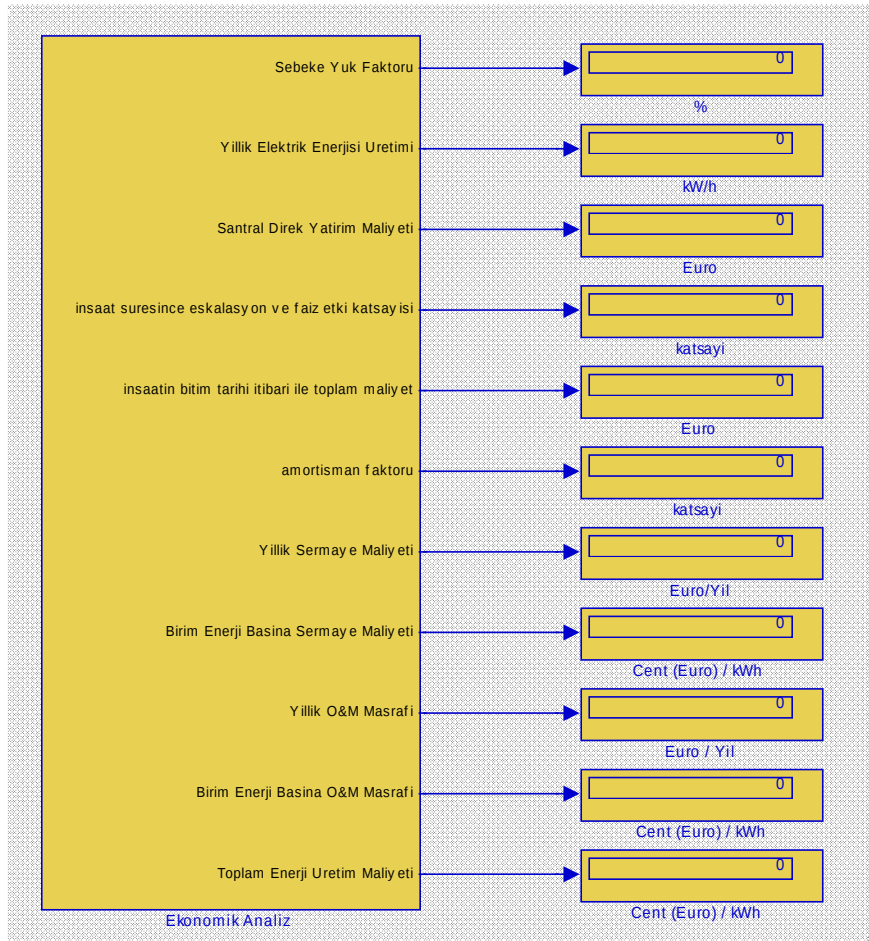
Yukarıda sıralanan 3 temel unsurdan anlaşılacağı üzere santral masrafı olarak sadece türbinlerin satın alınıp kurulmasından oluşan (ilk yatırım) masrafları anlaşılmalıdır.

5. MATLAB & SİMULİNK İLE HAZIRLANMIŞ RÜZGAR SANTRALİ KURULUM VE MALİYET VERİLERİNİ VEREN PROGRAM

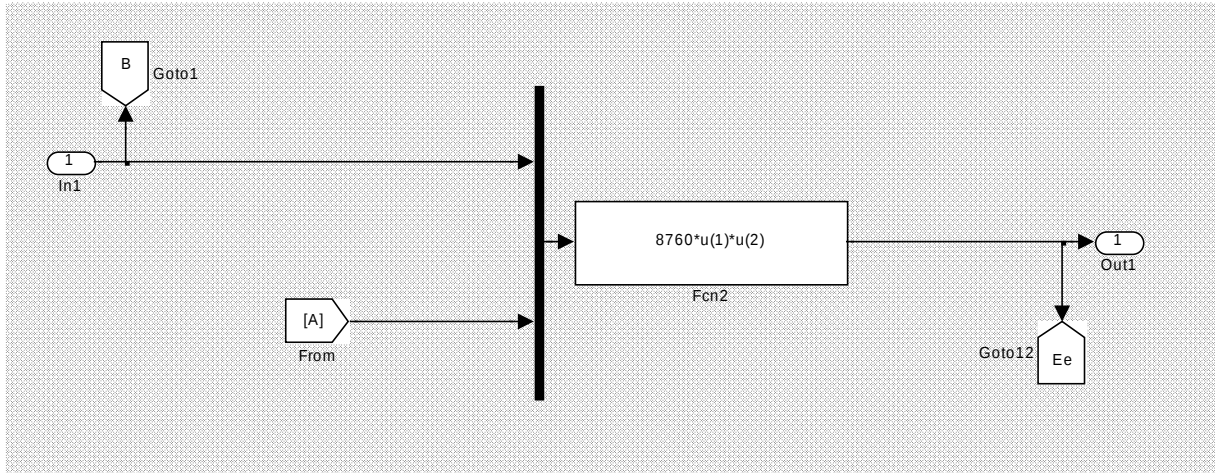
Hazırlamış olduğum program 3 bölümden oluşmaktadır. Bu programdaki amaç rüzgar santrali kurulumu düşünülen bölgenin rüzgar verileri ve ekonomik veriler girildiğinde santral ile ilgili gerekli olacak üretim ve ekonomik analiz parametrelerine ulaşmaktır. Bu program gerçek rüzgar verileri ve ekonomik veriler girildiğinde kurulum sonrası olacak ekonomik ve enerji üretim parametrelerini bire bir verir.

5.1.Bölüm1: Bu bölümde ekonomik analiz yapılmaktadır.

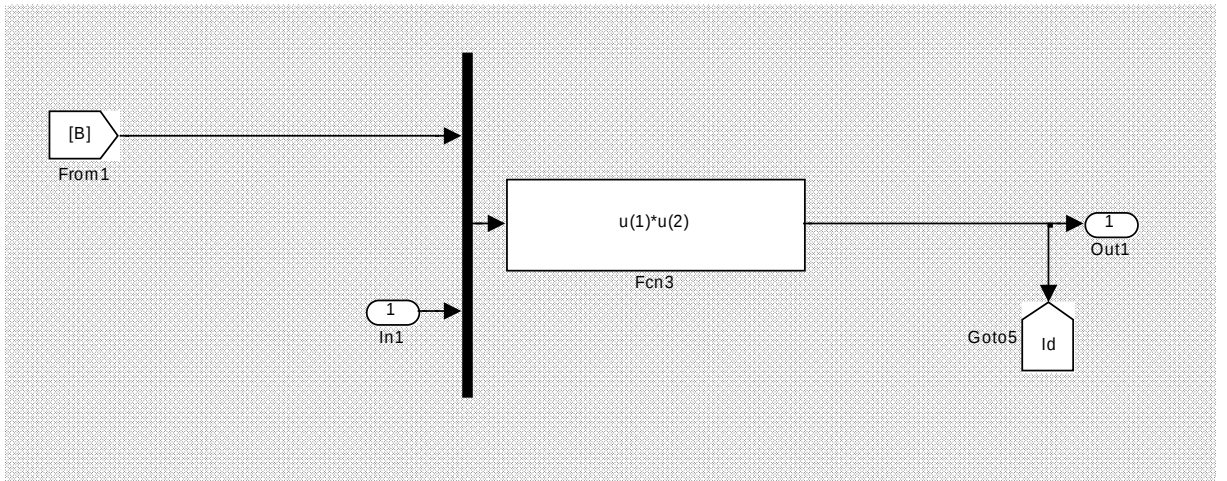
Program Şeması 1. Ekonomik Analiz Penceresi



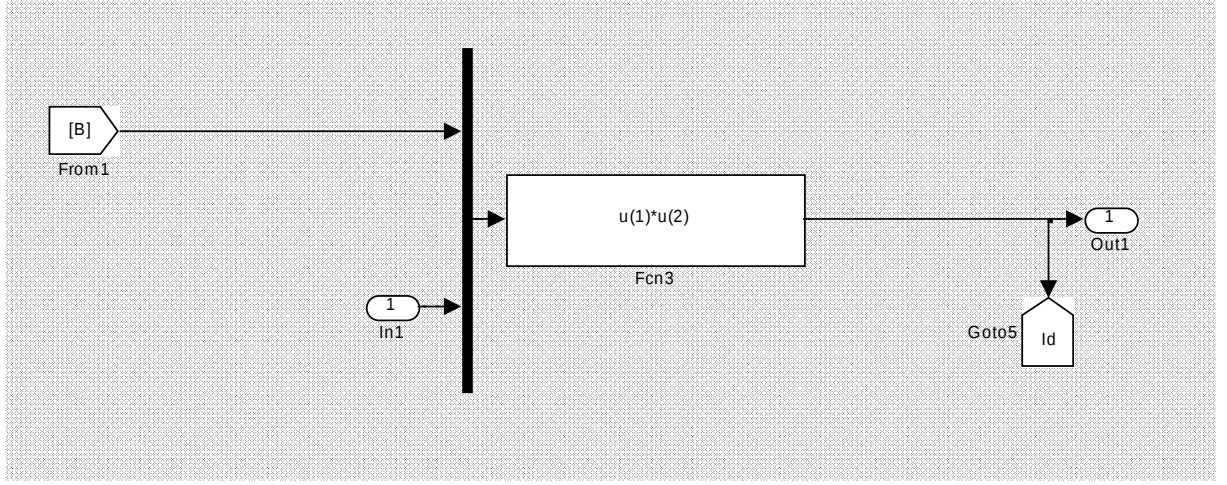
Program Şeması 4. Ekonomik Analiz Bölümü Alt Programları



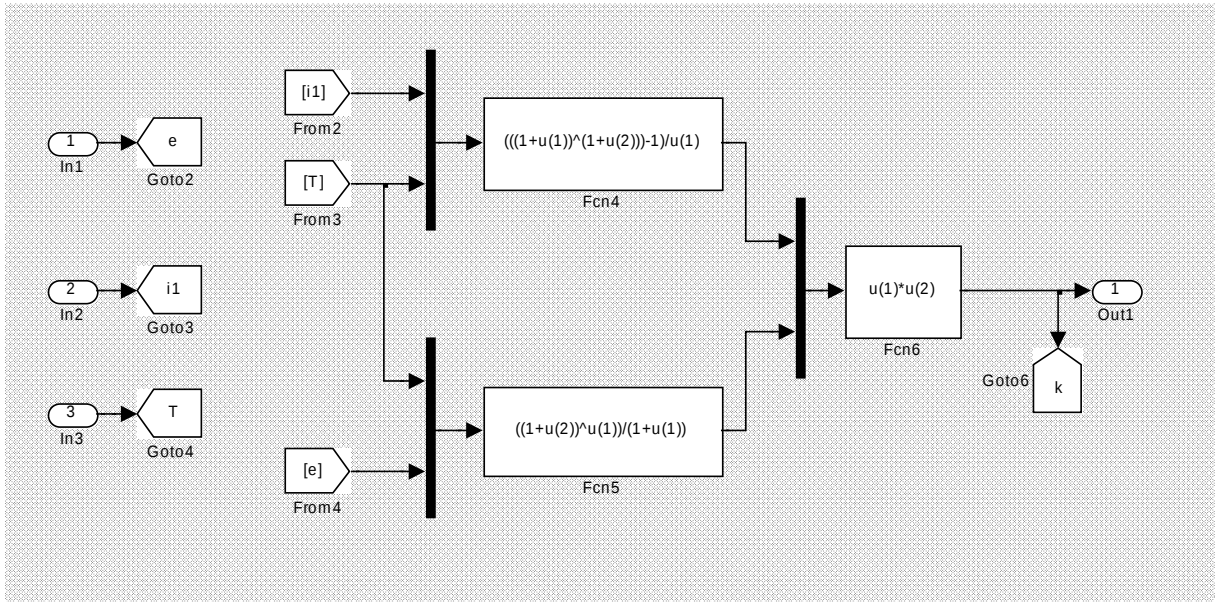
Program Şeması 5. Ekonomik Analiz Bölümü Alt Programları



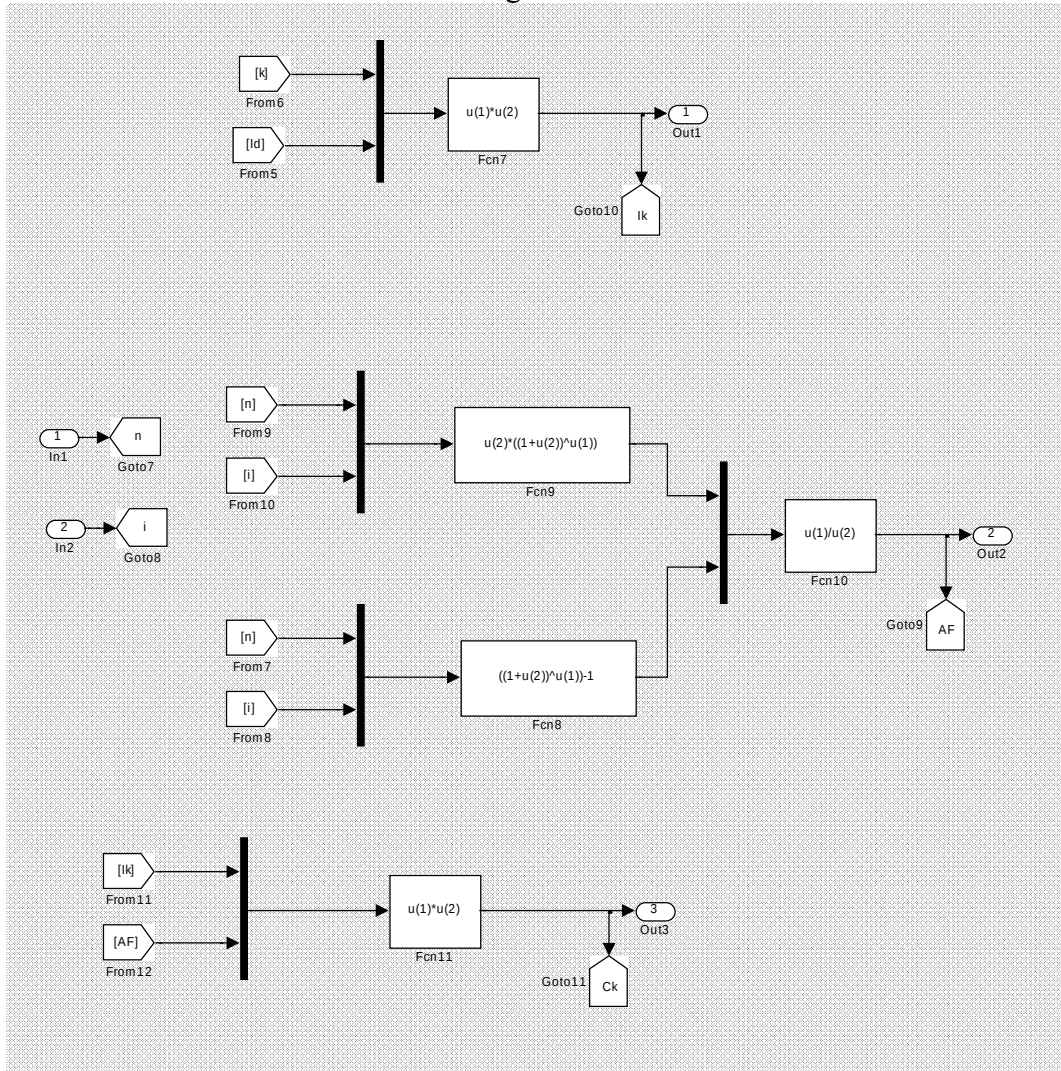
Program Şeması 6. Ekonomik Analiz Bölümü Alt Programları



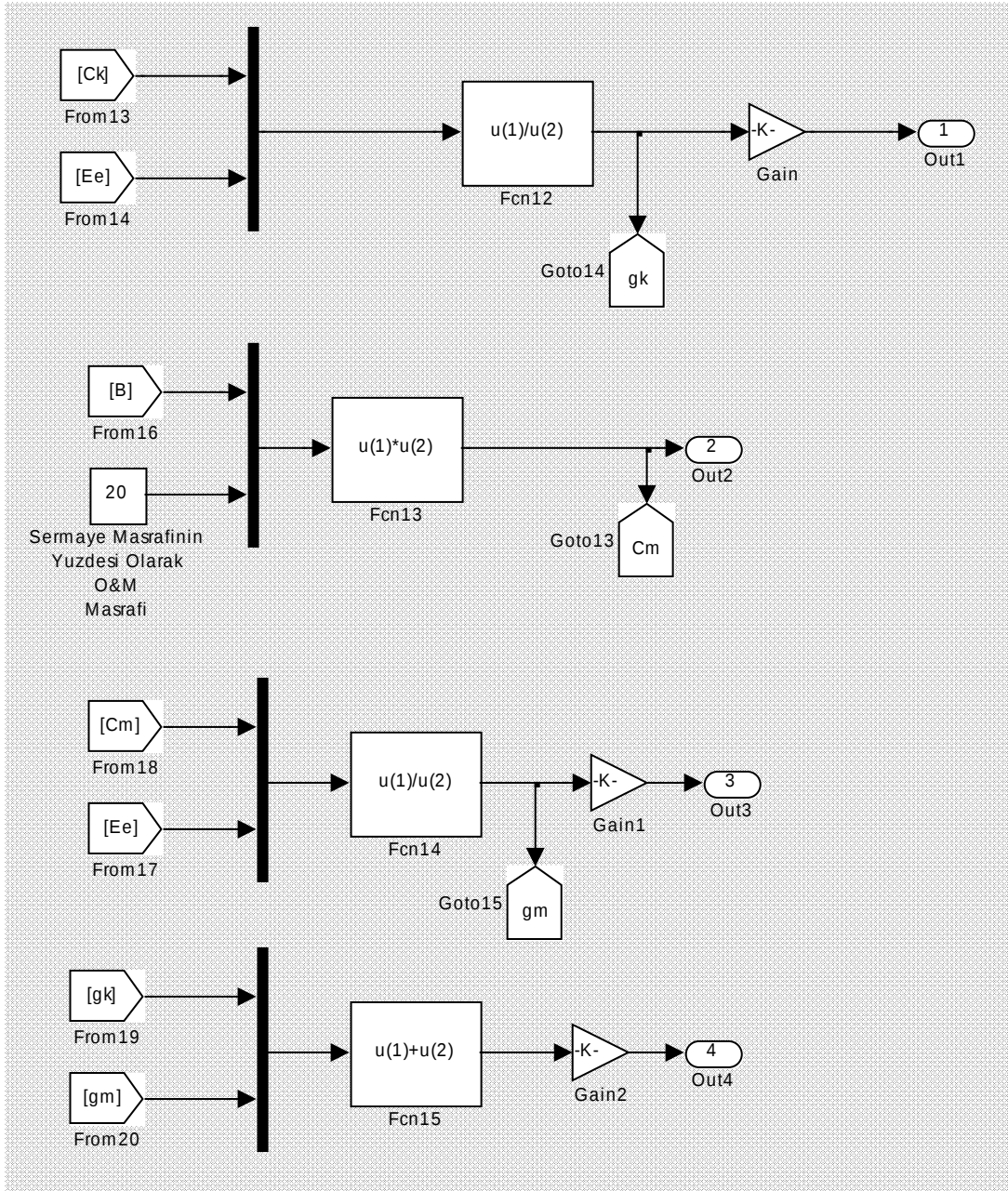
Program Şeması 7. Ekonomik Analiz Bölümü Alt Programları



Program Şeması 8. Ekonomik Analiz Bölümü Alt Programları



Program Şeması 9. Ekonomik Analiz Bölümü Alt Programları



Bu bölüm için girilmesi gereken ekonomik veriler;

- Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)
- Çalışma İçin Gerekli Rüzgar Hızı(m/s)
- Santralin Toplam Gücü (kW)

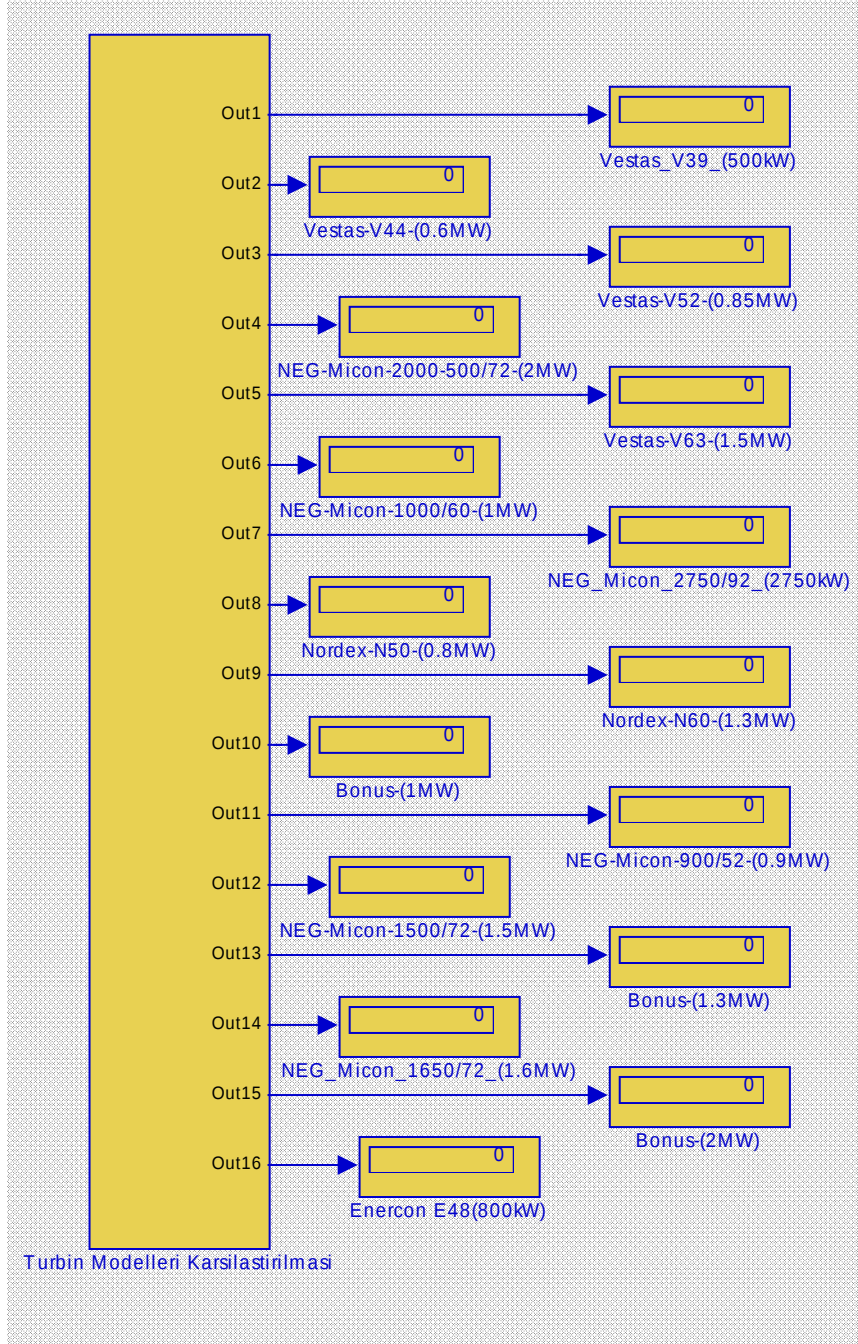
- Aylık Faiz Oranı
- İnşaat Süresi (ay)
- Ortalama Aylık Eskalasyon (%)
- Yıllık Faiz Oranı
- Amortisman Süresi (yıl)
- Sermaye Masrafının Yüzdesi Olarak O&M (işletme&bakım) Masrafı
- Birim Tesis Bedeli (inşaata başlama tarihinde) (\$/kW)

Girilen bu verilerin program tarafından işlenmesi ile elde edilecek veriler;

- Rüzgar Santralinde Şebeke Yük Faktörü (%_Lf)
- Rüzgar Santralinde Yıllık Enerji Üretimi (kWh/yıl)
- inşaat suresince eskalasyon ve faiz etki katsayısı (k)
- Amortisman Faktörü
- İnşaatın bitim tarihi itibari ile toplam maliyet (\$)
- Fiziki Santral Direk Yatırım Maliyeti (Id) (\$)
- Yıllık Sermaye Maliyeti (\$/yıl)
- Birim Enerji Başına Sermaye Maliyeti (mills/kWh)
- Yıllık O&M Masrafı
- Birim Enerji Başına O&M Masrafı (mills/kWh)
- Elektrik Enerjisi Üretim Maliyeti (mills/kWh)

5.2. Bölüm2: Bu bölümde kurulum için düşünülen yere en uygun türbin seçimi yapılmaktadır.

Program Şeması 10. Türbinleri Üretim Parametrelerine Göre Karşılaştırma

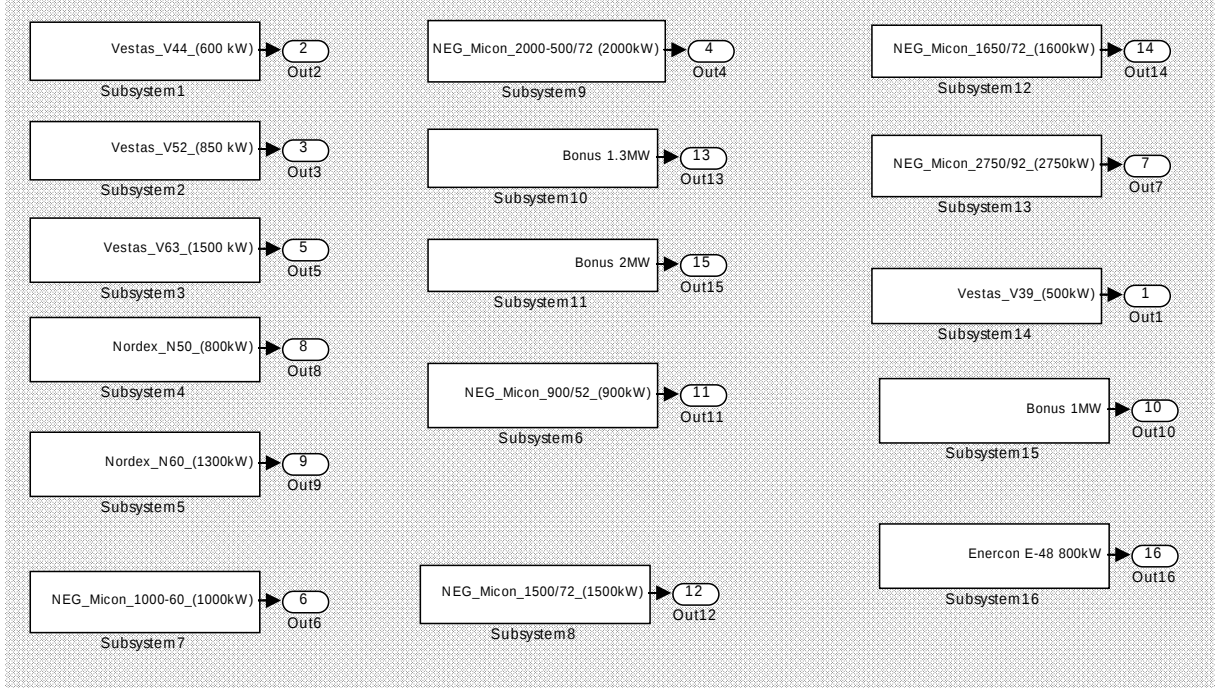


Bu bölüm 16 alt programdan(subsistem) ve bu alt programların her biri 0-25 m/s rüzgar hızları için 25 alt programdan(subsistemden) oluşmuştur. Burada ki karşılaştırmada esas

alınan gerçek rüzgar verilerini girerek üreticileri tarafından verilen türbin üretim parametreleri esas alınarak türbinin yapacağı üretim hesaplanmaktadır.

(NOT: Bu bölümün detayları için ekteki CD'ye bakınız)

Program Şeması 11. Türbin Karşılaştırma Bölümünün Alt Programları



Bu bölüm için girilmesi gereken veriler;

- Kurulum için düşünülen bölgenin 0 m/s' den, 25 m/s' ye kadar olan rüzgarların bir yıllık esme saatleri. (örnek, 3m/s esen rüzgar 1 yılda 150 saat esmiş)

Girilen bu verilerin program tarafından işlenmesi ile elde edilecek veriler;

- 15 farklı türbin için bölgede üretilebilecek enerji miktarı. Karşılaştırması yapılacak türbinler ve teknik özellikleri aşağıdaki Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Üretim Değerleri Karşılaştırılan Türbinler ve Teknik Özellikleri

Türbin Marka Modeli	Rotor Çapı (m)	Default Yükseklik(m)	Hava Yoğunluğu (kg / m^3)	Düşük Rüzgar Hızında Durma (m/s)	Düşük Rüzgar Hızında Başlama (m/s)	Yüksek Rüzgar Hızında Durma (m/s)	Yüksek Rüzgar Hızında Başlama (m/s)
NEG-Micon 1000/60 (1000 kW)	60	70	1.225	4	4	20	20
Vestas V39 (500 kW)	39	40.5	1.225	5	5	25	25
Vestas V44 (600 kW)	44	40.5	1.225	5	5	25	25
Vestas V52 (850 kW)	52	55	1.225	4	4	25	25
NEG-Micon 2000-500/72 (2000 kW)	72	68	1.225	4	4	25	25
Vestas V63 (1500 kW)	63	60	1.225	5	5	25	25
NEG-Micon 2750/92 (2750 kW)	92	70	1.225	4	4	25	25
Nordex N50 (800 kW)	50	50	1.225	4	4	25	25
NordexN60 (1.3 MW)	60	50	1.225	4	4	25	25
Bonus 1 MW	54.2	50	1.225	4	4	25	25
NEG-Micon 1650/72 IEC1 (1650 kW)	72	78	1.225	5	5	25	25

NEG-Micon 900/52 (900 kW)	52	55	1.225	4	4	25	25
Bonus 2 MW	76	60	1.225	4	4	25	25
Bonus 1.3 MW	62	60	1.225	3	3	25	25
NEG-Micon 1500/72 50 Hz (1500 kW)	72	78	1.225	4	4	25	25
Enercon E48 (800kW)	48	56	1.225	2	2	25	25

Burada ki bölümde kurulum yapmayı düşündüğümüz yerde en yüksek miktarda üretim yapacak türbin-generatör modelini seçeriz. Fakat burada dikkat edilmesi gereken tek husus üretim miktarlarının karşılaştırmaları değildir. Bölgenin hava yoğunluğu ve kurulumunu düşündüğümüz türbinin bölgeye ulaştırılıp kurulumunun yapılmasında yaşanacak zorluklar ve ekstra maliyetlerde göz önüne alınmalıdır.

5.3. Bölüm3: Programın bu bölümünde rüzgar hızı ölçümü yaptığımız yükseklik referans alınarak; Türbin göbek yüksekliğinde ki rüzgar hızı, bu yükseklikte rüzgardan elde edilebilecek maksimum güç ve türbine iletilebilecek mekanik gücü hesaplanır.

Bu bölüm için girilmesi gereken veriler;

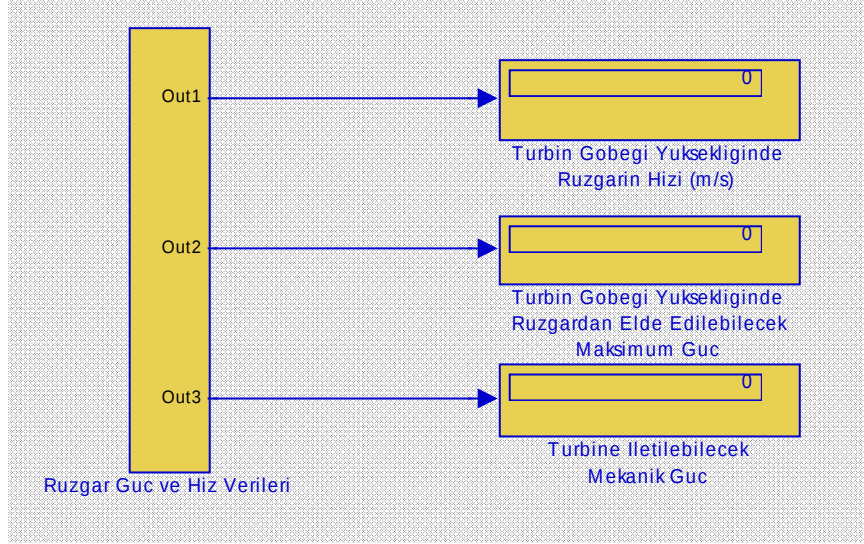
- Türbin verimi
- Süpürme alanı
- Hava yoğunluğu
- Türbin göbek yüksekliği
- Ölçüm yapılan bölgenin pürüzlülük sınıfı

Girilen bu verilerin program tarafından işlenmesi ile elde edilecek veriler;

- Türbin göbek yüksekliğinde ki rüzgar hızı
- Bu yükseklikte rüzgardan elde edilebilecek maksimum güç

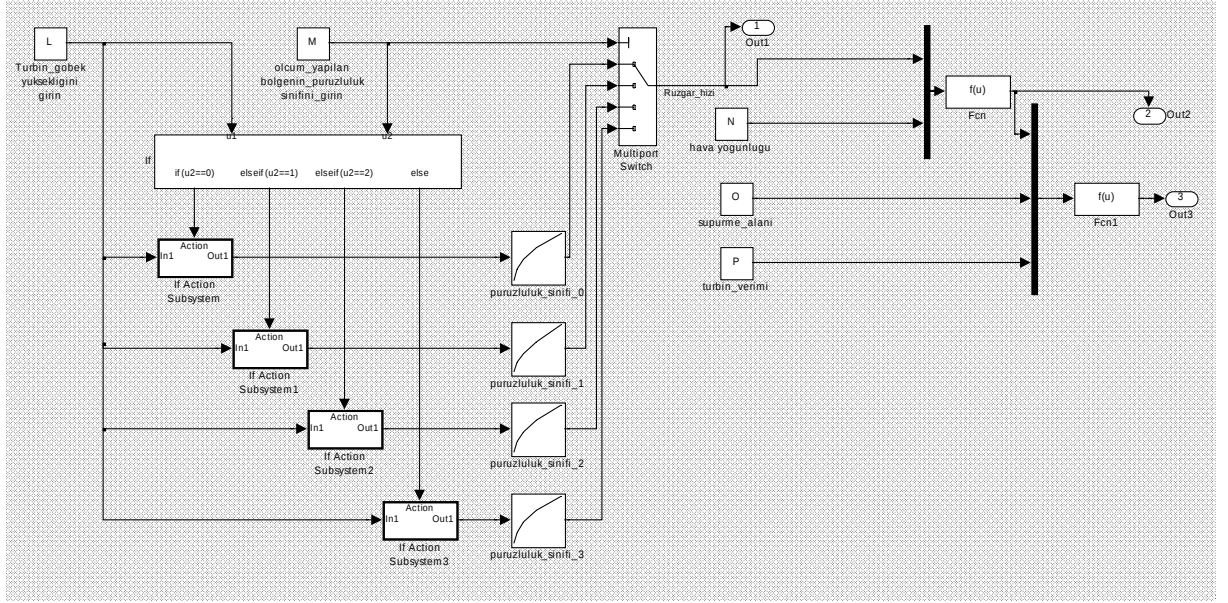
- Türbine iletilebilecek mekanik gücü hesaplanır

Program Şeması 12. Rüzgar Gücü ve Hızı Verilerinin Hesaplandığı Bölüm



Aşağıda Program Şeması 13' de bu programın alt programı gösterilmektedir. Görüleceği üzere bu bölüm için 5 veri girişi gerekmektedir(türbin verimi, süpürme alanı, hava yoğunluğu, türbin göbek yüksekliği, ölçüm yapılan bölgenin pürüzlülük sınıfı). Programın bu bölümü programın altında yazılan notta da görüleceği üzere Çanakkale'de Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü ve Elektrik Etüd İdaresi Tarafından 1988-1998 yılları arasında 10m yükseklikte yapılan ölçümler baz alınarak hazırlanmıştır. Farklı bir bölge için şu verilerin programa tanıtılması yeterlidir. 0,1,2,3 pürüzlülük sınıfları için 10,25,50,100,200 metre yükseklikteki rüzgar hızları.

Program Şeması 13. Programın 3. Bölümünün Alt Programı



6. GELİBOLU RÜZGAR ELEKTRİK SANTRALİ TASARIMI

*Bu bölümde kullanılan mali bilgiler, teknik bilgiler ve kurulum süresi bilgileri Demirer Holding Teknik Müdürü Elektrik Yüksek Mühendisi Halil Durutürk ile yapılan görüşmede ve Kanada Doğal Kaynaklar Bakanlığı internet sitesinden alınmıştır.

Bu bölümde tümü ile gerçek, ekonomik ve rüzgar verileri kullanılmıştır. Rüzgar verileri Elektrik Mühendisleri Odası'nın maddi desteği ile Elektrik İşleri Etüt İdaresinden alınmıştır.

Bir türbinin kurulumu 2 gün içerisinde tamamlanıyor türbin alt yapısı ise 2-3 ay gibi bir süre alıyor. Çok iyi organize edilmiş bir ekiple, sırası ile türbin altyapısı hazırlanması ve kurulumun tamamlanması için oluşturulmuş ekipler ile 50 tane türbin kurulumunu 15 ay içerisinde tamamlayabiliriz.

Kurulacak rüzgar elektrik santralinin toplam gücüne TEİAŞ tarafından getirilen bir sınırlama vardır. TEİAŞ bağlantının yapılacağı bölge transformatörünün kısa devre gücünün %5' inden büyük rüzgar santrali bağlantısına izin vermiyor.

Kurmayı düşündüğümüz türbin modeline karar verirken göz önüne almamız gereken 2 önemli nokta vardır.

- Türbin gücü büyüdükçe türbin boyutları da büyür (Bunu programda karşılaştırması yapılan türbinlerin teknik özelliklerini içeren yukarıdaki tablodan kolayca görebiliriz). Boyutların artması ile taşıma zorlukları ortaya çıkar ve kurulum maliyetleri artar. (Bölgedeki mevcut yollar yetersiz kalabilir, kurulum için daha büyük tonajlı vinç kullanmak gerekir.)
- Herhangi bir arıza anında veya bakım (Türbinin durması gereken bakımlar, yıldırım vb) durumunda kayıp güç artar.

NOT: Büyük güçlü türbinlerin birim maliyeti daha yüksek olmasına karşın bu maliyet giderek azalmaktadır. Birim maliyetin azalması ile büyük güçlü türbinlerin kullanımı yaygınlaşacaktır.

Bu projede kurulumu planlanan türbin ekipmanlarının generatör ve türbin makineleri yurt dışından getirilecektir(Gelibolu'ya deniz yolu ile getirilecektir). Gelibolu Limanı'nda gümrük olmadığı için bu ekipmanlar önce Çanakkale Limanı'na ardından Gelibolu Limanı'na nakledilecektir. Gelibolu Limanı'nın ve liman bağlantı yolları Uydu Fotoğrafi 1 ve2 'de verilmiştir.



Uydu Fotoğrafi 1. Gelibolu Limanı



Uydu Fotoğrafi 2. Gelibolu Limanından Santral Sahasına Bağlantı Yolları

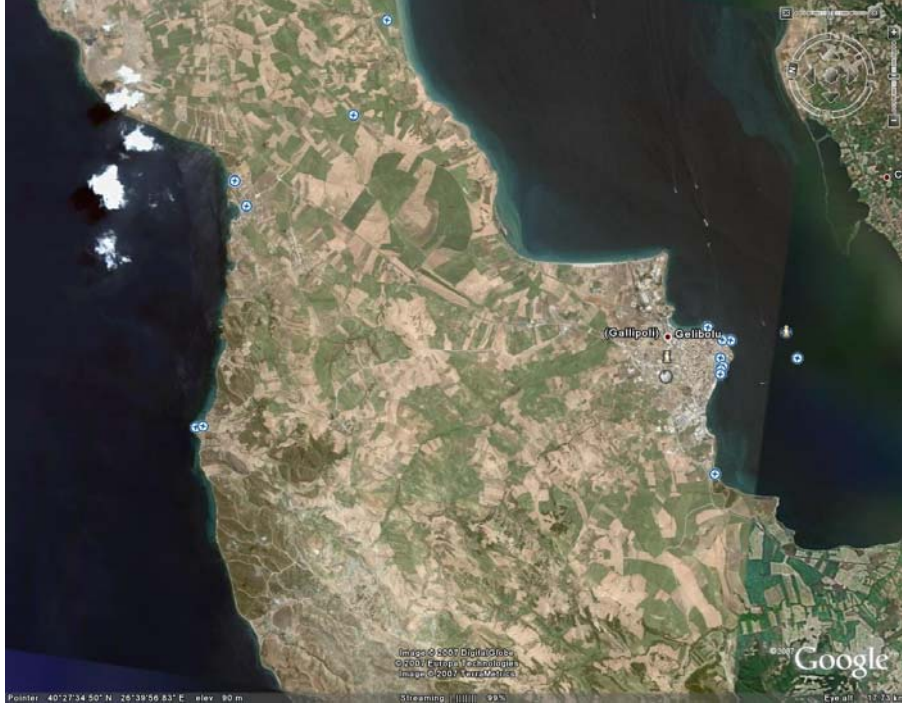
Kanatlar Demirer Holding tarafından İzmir’de üretilmektedir. Gelibolu’ya kara yolu veya deniz yolu ile getirilebilir. Türbin kuleleri Çimtaş tarafından Bursa-Gemlik’te üretilmektedir. Gelibolu’ya deniz yolu ile taşınacaktır. Bu projede E-48 800kW türbin seçmemin sebebi de türbin makineleri dışındaki ekipmanların ülkemizde üretiliyor olmasıdır. Gelibolu Limanı, Çanakkale Limanı ve Gemlik Limanı Uydu Fotoğrafi 3’de gösterilmiştir.



Uydu Fotoğrafi 3. Gelibolu-Gemlik ve İzmir

Yukarıdaki Uydu Fotoğrafi 3’e baktığımızda santrali kurmayı düşündüğümüz bölge olan Gelibolu’nun büyük boyutlardaki türbin ekipmanlarının taşınmasında ki en kolay yöntem olan deniz yolu ile taşımacılığa çok uygun olduğunu görebiliriz.

Türbinin kurulabileceği bölgenin genel görünümü Uydu Fotoğrafi 4’te verilmiştir. Bu genel görünümünden yola çıkarsak türbin kurulumunda dikkat edilecek ana hususların bölge için gayet uygun olduğu anlaşılır.



Uydu Fotoğrafl 4. Santralin Kurulabileceği Bölgenin (Gelibolu) Genel Görünümü

Bu genel görünümünden yola çıkarak türbin kurulumu için 4 bölge belirledim. Belirlediğim yerlerin görünümleri Uydu Fotoğrafl 4, 5, 6 , 7 ve 8’ de verilmiştir.



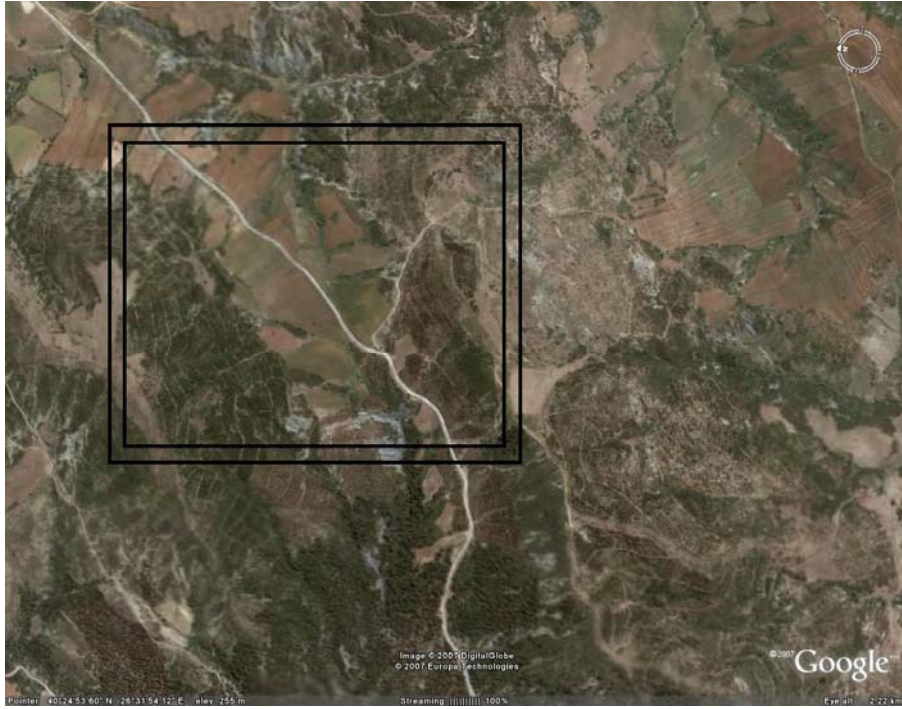
Uydu Fotoğrafi 5. Santralin Kurulabileceği Alan 1



Uydu Fotoğrafi 6. Santralin Kurulabileceği Alan 2



Uydu Fotoğrafi 7. Santralin Kurulabileceği Alan 3



Uydu Fotoğrafi 8. Santralin Kurulabileceği Alan 4

Kurulum alanlarını tespit ederken dikkat edeceğimiz hususlar bölüm 2’de ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bunlar genel hatları ile aşağıda sıralanmıştır.

Rüzgarın teknik özellikleri ve türbin yerleşimi.

Ulaşım yolları.

Kurulacak alanın özel mülkiyet olup olmaması.

Göçmen kuşların göç yolları üzerinde olmaması.

Enerji iletim şebekelerine uzaklığı.

Yapılan rüzgar ölçümleri ile kurulum için tasarlanan yerin rüzgar değerlerinin aynı olması.

Kurulum zeminin temel için nitelikleri.

Yarım adanın tarihi konumunu bozmayacak olması.

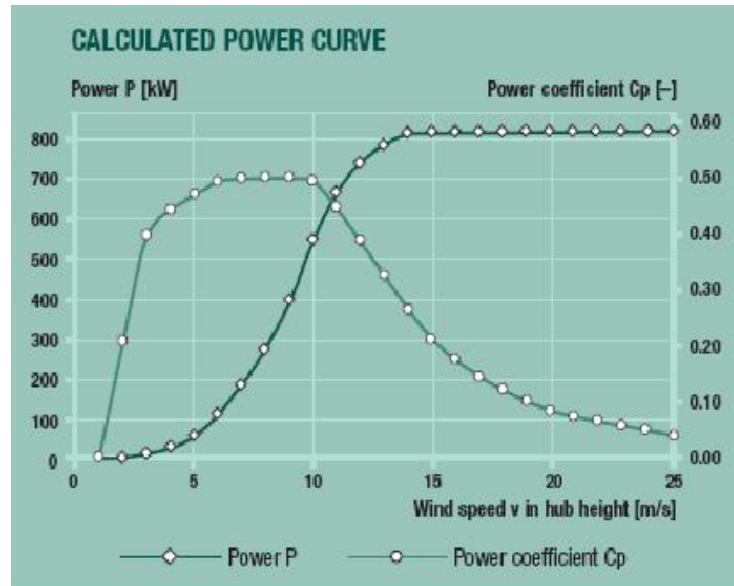
Hakim rüzgar yönünün dikkate alınması.

Yerleşim birimlerine 2km uzaklıkta olması (radyo,TV sinyallerini etkilememek için.)

6.1. Bu Projede Kullanılacak Enercon-E48 Türbininin Teknik Özellikleri

Aşağıdaki grafikte E-48 türbininin hesaplanmış güç eğrisi görülmektedir.

Grafik 14. Enercon E-48 Türbininin Güç Eğrisi



Aşağıda Enercon E-48 türbininin rüzgar hızına karşılık ürettiği enerjiyi gösteren tablo verilmiştir.

Tablo 9. Enercon E-48 Türbinin Teknik Özellikleri ve Üretim Parametreleri

rüzgar	dağılım	güç	üretilen enerji	güç katsayısı
$v[m/s]$	$H[h/a]$	$P[kW]$	$W[kWh/a]$	$c(p)[-]$
1	274	0.0	0	0.00
2	522	2.0	1044	0.23
3	723	12.0	8681	0.40
4	863	32.0	27614	0.45
5	935	66.0	61700	0.48
6	942	120.0	113013	0.50
7	894	191.0	170665	0.50
8	804	284.0	228467	0.50
9	691	405.0	279707	0.50
10	567	555.0	314830	0.50
11	447	671.0	299821	0.45
12	338	750.0	253594	0.39

13	246	790.0	194449	0.32
14	173	810.0	139756	0.27
15	117	810.0	94416	0.22
16	76	810.0	61514	0.18
17	48	810.0	38671	0.15
18	29	810.0	23468	0.13
19	17	810.0	13754	0.11
20	10	810.0	7786	0.09
21	5	810.0	4259	0.08
22	3	810.0	2252	0.07
23	1	810.0	1151	0.06
24	1	810.0	569	0.05
25	0	810.0	272	0.05

6.2. Ekonomik Veriler

Santral Toplam Gücü (50×800) = 40MW

Enercon E48 (800kW) türbin fiyatı = 650000 Euro

Altyapı (1 türbin için) = 150000 Euro

Birim Tesis Bedeli = 800 Euro

- Ortalama Rüzgar Hızını m/s)= 7.9769 (türbin göbeği yüksekliğinde)
- Çalışma İçin Gerekli Rüzgar Hızını Giriniz (m/s)= 14 (tam kapasite)
- Kurmayı Planladığınız Santralin Toplam Gücünü Giriniz (kW)= 40000kW
- Aylık Faiz Oranını Giriniz (%5 ise 0.05 olarak)=
- İnşaat Süresini Giriniz (ay)= 15
- Ortalama Aylık Eskalasyonu Giriniz (%5 ise 0.05 olarak)=
- Yıllık Faiz Oranını Giriniz (%5 ise 0.05 olarak)=
- Amortisman Süresini Giriniz (yıl)= 10 (normal amortisman oranı %10)
- Sermaye Masrafının Yüzdesi Olarak O&M Masrafını Giriniz= %5
- İnşaata Başlama Tarihinde Birim Tesis Bedelini Giriniz (Euro/kW)= 800 €
- 0m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 41 saat
- 1m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 352 saat
- 2m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 587 saat
- 3m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 791 saat
- 4m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 472 saat
- 5m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 725 saat
- 6m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 710 saat

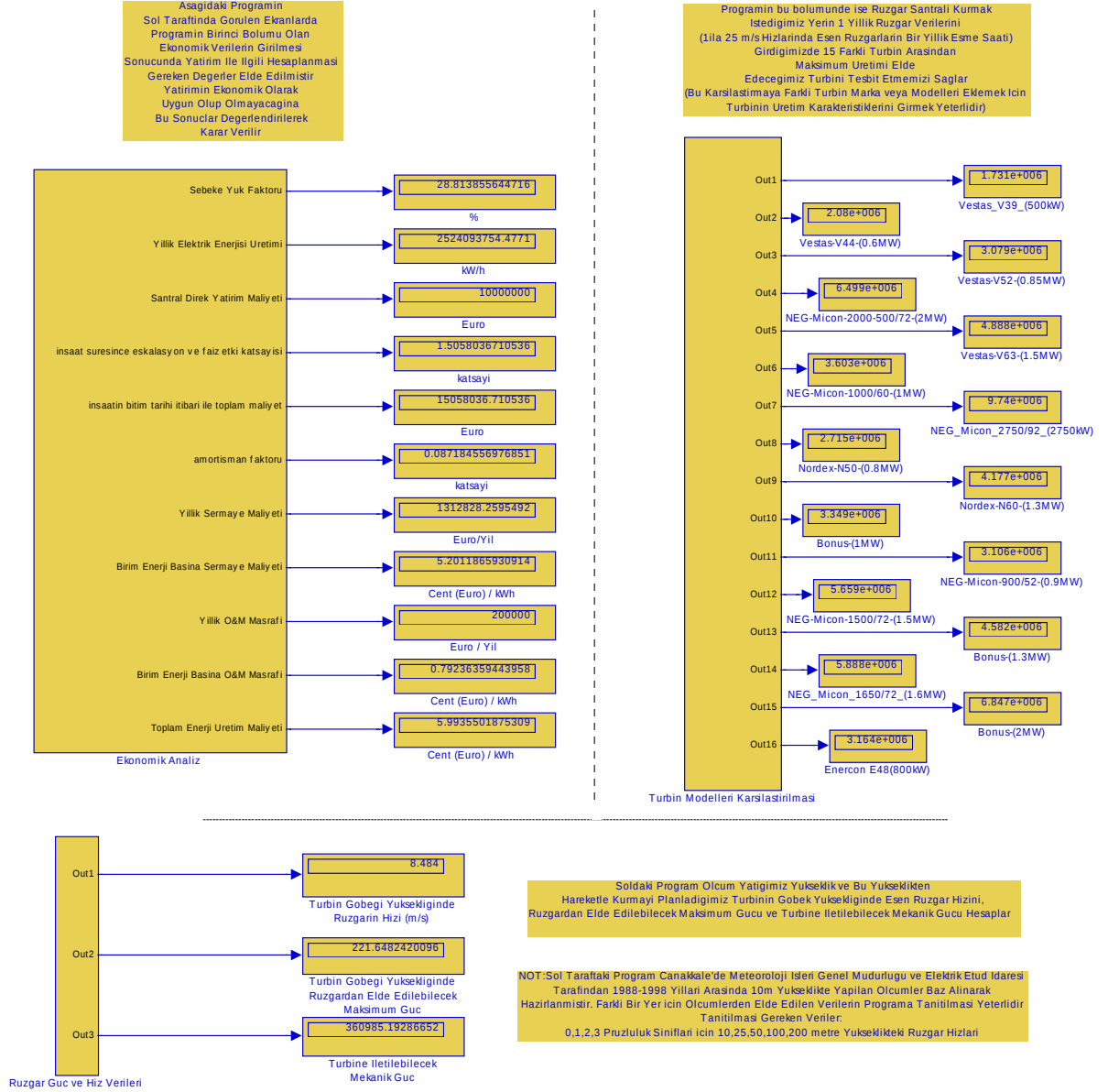
- 7m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 689 saat
- 8m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 659 saat
- 9m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 637 saat
- 10m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 641 saat
- 11m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 534 saat
- 12m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 479 saat
- 13m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 375 saat
- 14m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 309 saat
- 15m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 198 saat
- 16m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 152 saat
- 17m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 120 saat
- 18m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 100 saat
- 19m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 71 saat
- 20m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 55 saat
- 21m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 39 saat
- 22m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 22 saat
- 23m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 17 saat
- 24m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 16 saat
- 25m/s Hızla Esen Rüzgarın Bir Yıl İçinde Kaç Saat Estiğini Giriniz= 10 saat
- Kurmayı Planladığınız Rüzgar Türbininin Göbek Yüksekliğini Giriniz(m)= 56m
- Rüzgar Hızı Ölçümü Yapılan Yerin Pürüzlülük Sınıfını Giriniz(0-1-2 veya 3)= 0
- Hava Yoğunluğunu Giriniz=

- Türbinin Süpürme Alanını Giriniz= $1809,6 \text{ m}^2$
- Türbini Mekanik Verimini Giriniz (Üretimi Esnasında Türbine Kazandırılan Karakteristik)=

NOT: Rüzgar verilerinin yıllık esme saatlerini bulmak için yazdığım Matlab M-file proje ekinindeki CD' mevcuttur. (Bu M-file çalıştırıldığında EİE tarafından ölçülen Gelibolu'ya ait rüzgar verilerinden, türbin göbek yüksekliğindeki rüzgar hızı hesaplanır ve aylık rüzgar hızları olarak sınıflandırılır. Bu M-file 10938 satırdan oluşuyor.)

Yazmış olduğum programda fizibilite, ulaşım, işçilik, mühendislik giderleri dahil değildir. Programın simülasyonunu yaptığımızda sonraki sayfadaki verilere ulaşırız.

Program Şeması 14. Simülasyon Sonuçları



Simülasyondan görüleceği üzere Enercon E-48 türbini tamamı ile gerçek verilerden yola çıktığımızda yılda 3164000 kWh saat enerji üretiyor. Santral için toplamda 50 türbin tasarladığımız için yılda üreteceğimiz enerji 158200000 kWh' dir. Diğer türbinlere baktığımızda örneğin NEG-Micon 2750/92 türbini bizim tasarladığımızın 3 katı enerji üretiyor. Fakat bu türbinin boyutları daha büyük olduğundan taşıma, kurulum ve en önemlisi santral birim maliyeti (türbin fiyatı gücü oranından daha fazla artar) çok

artar. Ayrıca herhangi bir bakım veya arıza durumunda devreden daha büyük güç eksilmesi olur, buda ekonomik işletme amacımızdan sapmamıza neden olur.

Daha kapsamlı bir maliyet ve üretim analizini aşağıda yapılmıştır;

Tablo 10. Gelibolu RES Kurulum Maliyeti

Harcama Başlıkları	Miktar(\$)
Fizibilite	245.200
Hazırlık	835.500
Mühendislik	610.500
Türbinler	40.000.000
Yedek parçalar	1.200.000
Taşıma	1.650.000
Santral dengelemesi	5.868.000
TOPLAM	54.914.522

Kanada Doğal Kaynak Bakanlığı verilerini baz alarak, Gelibolu için yukarıdaki Tablo 10 oluşturulmuştur.

Bu analizden sonra;

- ✓ enerji üretim birim maliyeti $\rightarrow 0.0738$ \$/kWh
- ✓ yıllık enerji üretimi $\rightarrow 117406$ MWh (Enercon E-48 türbini için Matlab&Simulink'te yazdığım program ile yapılan enerji üretim analizi daha gerçekçidir. Çünkü bu analizde tamamı ile gerçek rüzgar verileri ve türbin üreticisi tarafından verilen üretim parametrelili göz önüne alınarak yapılmıştır.)

Santral kurulumunda gereken paranın kredi olarak temin edilmesi durumu için (alınacak faiz oranı vs) bu maliyetler değişir. Faiz ve eskalasyon etkisi ile birim enerji maliyeti değişecektir.

Santrali kurduğumuzda;

- ✓ Her sene 158200000 kWh (0.1582 milyar kWh) elektrik enerjisi üreteceğiz. (Ülkemizin 2006 yılında ürettiği elektrik enerjisi 173.1 milyar kWh)
- ✓ Ürettiğimiz enerjinin birim fiyatı 7.38 Cent(\$)/kWh
- ✓ Enerji üretim hammaddesi olarak dışa bağımlı bir durum söz konusu değil.
- ✓ Hammadde maliyeti yok ve hammadde sonsuz.
- ✓ Ürettiğimiz 1kWh enerji ile dünyamızı 0.7kg karbondioksit salınışından koruruz.
- ✓ Bölgede yaşayan insanlar ve doğal hayat için hiçbir tehlikesi yok.
- ✓ 25 yıllık ömrü sonunda 3.955 milyar kWh enerji üretmiş olacağız ve diğer enerji santrallerine göre çok çok düşük maliyetlere kurulumu kaldırabileceğiz.
- ✓ Santral sahasında tarım ve hayvancılık santral yokken nasıl yapılıyorsa öyle devam edecek. Arazinin hak sahiplerinden satın alınmasına gerek kalmayacak sadece kira verilmesi yeterli olacak.

SONUÇ

Tüm dünya ülkelerinin en önemli hedefi minimum maliyete enerji üretebilmektir. Çünkü enerji üretim maliyeti ne kadar düşük olursa, sanayi üretim birim fiyatları da aynı oranda düşük olur. Buna yönelik olarak gelişmiş ülkeler enerji üretim kapasitelerini alternatif enerji kaynaklarına yönelerek arttırmaktadır. Böylece doğaya ve insana zarar vermeksizin, başka bir ülkeye bağımlı olmaksızın elektrik enerjisi üretilmektedir.

Ülkemiz sürekli enerji açığı ile karşı karşıyadır bunun sebebi mevcut kaynaklarımızı etkin bir şekilde kullanamayışımdan kaynaklanıyor. Enerji politikaları belirlenirken önümüzdeki 20 yıllık dönem göz önüne alınarak projeksiyonlar üretilmelidir. Enerji üretim santralleri mümkün olduğunca yerli kaynaklardan bu yapılamıyorsa bile farklı kaynaklardan bir ülkeye bağımlı olmayacak şekilde kurulmalıdır. Ülkemizde yerli kaynaklarımız yeterince kullanılmamasının yanında pahalı ve dış ülkelere bağımlı olacağımız üretim yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde de elektrik enerji birim fiyatını azaltmaya ve enerji üretim kapasitesini dışa bağılı olmaksızın arttırmaya yönelik çalışmalara hız verilmelidir. Bu projede ülkemizin elektrik enerjisi üretim kapasitesinin minimum maliyet ile arttırılabileceği miktar gösterilmiştir.

Ülkemiz için en uygun alternatif enerji kaynağı rüzgar enerjisidir. Ülkemizin rüzgar enerjisi potansiyeli 200 milyar kWh/yıl dır (2006 yılında elektrik enerjisi tüketim miktarımız 173 milyar kWh dir.) Rüzgar potansiyelimizin bu kadar büyük olmasına rağmen, ülkemizde bu potansiyelin sadece %0.086 sı kullanılmaktadır. Buna karşın hammaddesini ithal ettiğimiz doğal gaz santralleri ile 2006 yılı elektriğimizin %42.2'sini ürettik. Bu yanlış üretim yöntemlerine mümkün olduğunca kısa sürede son vererek sadece rüzgar potansiyelimizin %50 sini kullansak 2006 yılı elektrik enerjisi tüketimimizin %57.7 sini üretebiliriz.

Ülkeler mevcut elektrik şebekelerinde herhangi bir yenileme yapmadan tüketimlerinin %15'ni rüzgar enerjisi santrallerinden şebekelerine verebilirler. Burada dikkat edilmesi gereken husus mevcut şebekeye bağlanan rüzgar santrali ile bağlantının yapılacağı baranın kısa devre gücü artar. Bundan dolayı iletim şebekelerinde bağlantı yapılacak barada herhangi bir yenileme (kesicilerde) yapılmayacaksa, baranın kısa devre gücünün %5'inden fazla rüzgar santrali bağlantısına izin verilmez.

Bu projede tümüyle gerçek verileri kullanarak tasarlamış olduğum rüzgar santrali (santral gücü 40 MW) yılda 158.200.000 kWh elektrik enerjisi üretebilecektir ve projenin ilk yatırım bedeli 54.914.522 \$ olacaktır. Enerji birim fiyatı santralin ekonomik işletme ömrü göz önüne alınırsa 4 cent civarında olacaktır. Santral ekonomik ömrünün sonunda 3,955 milyar kWh elektrik enerjisi üretecektir. Santralin ekonomik ömrü dolduğunda fosil ve nükleer santrallerde olduğu gibi santrali kapatmak için yüksek maliyetlere gerek yoktur. Ülkemizin rüzgar haritasının 10 yıllık dönem sonunda

ıkarıldığını göz önüne alırsak santralin her yıl hemen hemen aynı miktarda enerji üreteceğini görürüz.

Ülkemizin enerji politikasına yönelik olarak; Alternatif enerji kaynağı olarak rüzgar ve su kaynaklarının kullanımını maksimum seviyeye çıkartırsak. Baz ve pik santral olarak ta fosil yakıt santrallerini bunlarında yetersiz kaldığı durumlarda ithal hammadde ile üretim yapan santralleri kullanırsak ülkemizin enerji sorununu önemli ölçüde çözebiliriz.

KAYNAKLAR

- [1] **ACAROĞLU** Mustafa Doç Dr “Alternatif Enerji Kaynakları” Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul 2003
- [2] **AKIN** Sebahat, **ZEYBEK** Orhan, “Rüzgardan Elektrik Üretimi” III. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI SEMPOZYUMU 19.10.2005-21.10.2005 Mersin
- [3] **ALTINDİŞ** Ahmet, **UMURKAN** Nurettin Doç. Dr. “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Rüzgar Enerjisi” YTU Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001
- [4] **ATLI** Cahit, **ÇAKIR** Hüseyin Prof. Dr. “Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar enerjisi” YTU Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000
- [5] **AYBERS** Nejat, **ŞAHİN** Bahri “Enerji Maliyeti” YTÜ Yayınları No:299, İstanbul 1995
- [6] **ÇAKIR** Hüseyin Prof. Dr., **GÖKALP** Erdin Yar. Doç. Dr. “Enerji İletim Laboratuvarı Notları” YTU 2006 Güz Yarıyılı
- [7] **DA ROSA** Aldo, “Fundamentals of Renewable Energy Processes”, Amsterdam-Boston, Elsevier Academic Press, 2005 (EMO’ nun Maddi Desteği ile Alınmıştır)
- [8] **DOCUMENT OF THE WORLD BANK** “ Project Appraisal Document on a Proposed Loan in the Amount of US\$202.03 Million to the Republic of Turkey for Renewable Energy Project ” 26.02.2004
- [9] **GELİBOLU RÜZGAR VERİLERİ** “Elektrik İşleri Etüt İdaresi” (EMO’ nun Maddi Desteği İle Alınmıştır)
- [10] **HEIER** S., Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, John Willey&Sons Ltd., 1996
- [11] **KÖSETORUNU** Alev “Türkiye’de Enerji Sektörünün Geleceği” Ekonomik Araştırmalar ve Değerlendirme Genel Müdürlüğü (TC Başbakanlık ve Dış Ticaret Müsteşarlığı)
- [12] **MUKAND** R. Patel, Wind and Solar Power System, CRC Press, New York, 1999

- [13] **ONAR O.Ç., UZUNOĞLU M., ALAM M.S.** “Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system” Science Direct 28.03.2006
- [14] **PEŞİNT M.** Adnan, “Elektrik Santralleri Enerji İletimi ve Dağıtımı”, MEB İstanbul 2001
- [15] **REHMAN** Shafiqur, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Saudi Arabia “Wind Energy Resources Assessment For Yanbo,Saudi Arabia” Elsevier Ltd. 2003
- [16] **SARIKAYALAR** Okan, **ATTAR** Ferit Yar. Doç. Dr. “Rüzgar enerjisi ve Rüzgar Enerjisinin Türkiye’deki Potansiyeli” , YTU Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998
- [17] **TÜİK** (T.C Başbakanlık Türkiye İstatistik Kurumu-www.tuik.gov.tr) Sayı:156, 25Eylül 2006
- [18] **TÜRKİYE RÜZGAR ATLASI** Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Elektrik İşleri Etüt İdaresi 2002
- [19] **UYAR** Tanay Sıdkı Doç. Dr. “Türkiye Enerji Sektöründe Karar Verme Ve Rüzgar Enerjisinin Entegrasyonu.”
- [20] **ÜLTANIR** Mustafa Özcan Prof. Dr. “Türkiye elektrik enerjisi üretim planlama çalışması (2005-2020) irdelemesi ile su ve rüzgâr enerjilerinin yeri” RESSİAD (Rüzgar Enerjisi ve Su Santralleri İşadamları Derneği) Tel: +(90) 312 419 34 10 - Faks: +(90) 419 34 29 Atatürk Bulvarı 103/66, İnce Han Kat 9, Kızılay / Ankara
- [21] **YILMAZ** Levent, “Yenilenebilir Enerji Kaynakları Açısından Rüzgar Enerjisinin Türkiye’deki Kapasitesi”, İTÜ, İnşaat Fakültesi, Hidrolik ve Su Yapıları Kürsüsü, 80626, Maslak, İstanbul. III. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI SEMPOZYUMU 19.10.2005-21.10.2005 Mersin
- [22] **WIND BLATT** “Enercon Magazine for Wind Energy” Şubat 2006
- [23] www.teias.gov.tr
- [24] www.demirer.com.tr
- [25] www.windstuffnow.com
- [26] www.awea.org

[27] www.otherpower.co.uk

[28] www.mathworks.com