

126883

RÜZGAR ENERJİSİ VE UYGULAMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Müh. Serhan KIRIM
(504971316)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Eylül 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Ekim 2002

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Kevork MARDİKYAN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Kevork MARDİKYAN
Prof.Dr. Nejat TUNÇAY
Doç.Dr. Erol ŞENOCAK

K. Mardikyan

Erol Senmali

EKİM 2002

126883

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında desteğini ve ilgisini eksik etmeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Kevork Mardikyan'a teşekkürlerimi ve saygılarımı bir borç bilirim.

Sayın Hocam dışında gerek doküman sağlamak gerekse mülakatlarım sırasında ilgi ve zamanlarını benden esirgemeyen Alstom ve Vestas şirketlerinin değerli yöneticilerine de teşekkürlerimi sunarım.

20 Eylül 2002

Serhan KIRIM



İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Rüzgar Enerjisinin Doğuşu	1
1.2 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretiminin Öncüsü: Poul La Cour	2
1.3 La Cour'un İlk Rüzgar Türbinleri (RT)	2
1.4 1940 Sonrasında Rüzgar Enerjisinin Dünya'da Durumu	2
1.5 Rüzgar Enerjisi İle Elektrik Üretiminde Azalan Enerji Maliyeti	4
1.6 Dünya'da Rüzgar Enerjisi Kurulu Gücü	5
1.7 Türkiye'de Durum	6
1.8 Rüzgar Enerjisinin Diğer Enerji Kaynaklarıyla Karşılaştırılması	8
1.9 Çalışmanın Amacı	10
2. RÜZGAR OLUŞUMU VE HESAPLAMA YÖNTEMLERİ	11
2.1 Giriş	11
2.2 Rüzgarın Temel Oluşum Mekanizması	11
2.3 Atmosferik Sınır Tabaka Ve Rüzgar Akışına Etki Eden Faktörler	12
2.3.1 Rüzgarın Oluşumu	13
2.3.2 Basınç Gradyanı (Eğimi) Kuvveti	14
2.3.3 Coriolis Kuvveti	15

2.4 Rüzgar Enerjisi Formülasyonun Çıkarılması	16
2.4.1 Rüzgardan Elde Edilen Güç	17
2.5 Rüzgar Süpürme Alanı	19
2.6 Hava Özgül Kütlesi	19
2.7 Farklı Yüksekliklerde Rüzgar Hızının Hesap Edilmesi	20
2.8 Rüzgar Şiddeti Dağılımı	20
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ	23
3.1 Giriş	23
3.2 Rüzgar Türbinleri Kanat Profili	24
3.2.1 Sürüklenme Katsayısı (C_d)	26
3.2.2 Kaldırma Katsayısı (C_l)	26
3.3 Sistem Dizayn Özellikleri	27
3.3.1 Kanat Sayısının Etkisi	27
3.3.2 Pervane Kanat Sayısına Göre Türbin Çeşitleri	28
3.3.2.1 3-Kanatlı Rüzgar Türbinleri	28
3.3.2.2 2-Kanatlı Rüzgar Türbinleri	28
3.3.2.3 Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri	29
3.3.3 Kanat Yapımında Kullanılan Malzeme Çeşitleri	30
3.3.4 Rotor Yerleşimi	30
3.3.5 Yatay Aks Ve Dikey Aks	31
3.3.6 Rüzgar Türbini Kuleler	32
3.3.6.1 Tüp Yapılı Kuleler	33

3.3.6.2 Kafes Yapılı Kuleler	33
3.3.7 Kulelerin Yerleştirilmesi	34
3.4 Rüzgar Türbinlerinin Güç Kontrolü	34
3.4.1 Yaw (Yönerge) Control	36
3.4.1.1 Yaw (Yönerge) Mekanizması	37
3.4.1.2 Kablo Dönme Sayıcısı	37
3.4.2 Stall (Durdurma) Kontrol	38
3.4.3 Pitch (Değiştirme) Kontrol	40
4.RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ELEKTRİK SİSTEMİ	41
4.1 Elektrik Genaratörleri	42
4.1.1 Senkron Generatörler	44
4.1.2 Asenkron (Endüksiyon) Generatörleri	45
4.1.2.1 Kafes Yapılı Rotorlar	45
4.1.2.2 Endüksiyon Makinalarının Verimi Ve Soğutması	47
4.1.2.3 Uyarma Kapasitesi	48
4.2 Elektronik Kontrol Cihazı	48
4.2.1 Güç Kalitesinin Kontrolü	49
4.2.1.1 Reaktif Güç Kontrolü	49
4.3 Elektromagnetik Uyumluluk	50
4.4 Rüzgar Türbinlerinin Endirek Olarak Şebekeye Bağlanması	51

4.4.1 Değişken Frekansta Alternatif Akımın Üretilmesi	51
4.4.2 Doğru Akıma Çevrilmesi	52
4.4.3 Sabit Frekanslı Alternatif Akıma Çevrilmesi	52
4.4.4 Şebekeye Endirek Bağlanmanın Avantajları	52
4.4.5 Şebekeye Endirek Bağlanmanın Dezavantajları	53
4.5 Stand-Alone (Tekli) Sistem	53
4.6 Rüzgar Türbinleri Ve Diesel le Hibrid Sistem	54
4.7 Mode Control	55
4.8 Yük Paylaşımı	56
4.9 Güç Kalitesi	58
4.9.1 Harmonik Distorsiyonu	58
4.9.2 Geçici Gerilimler Ve “Sag”(Çökme)ler	60
4.9.3 Gerilim “Flicklerları” (Gidip Gelmeleri)	60
4.10 Türbinlerinin Çalıştırılması Ve Durdurulması	60
4.11 Rüzgar Türbinlerinde Güvenlik	61
4.11.1 Sensörler	61
4.11.2 Aşırı Hız Koruması	61
4.11.3 Aerodinamik Frenleme Sistemi	62
4.11.4 Mekanik Frenleme Sistemi	62
4.11.5 Tiristörlerle Yumuşak Kalkış	62
5. SANTRALIN EKONOMİK OLARAK İŞLETİLMESİ	63
5.1 Enerji Sağlama Faktörü	63
5.2 Kapital Maliyeti	64
5.3 Santralin Kullanılabilirliği Ve Bakım	65

5.4 Enerji Maliyeti	65
5.5 Hassasiyet Analizi	66
5.5.1 Rüzgar Hız Değişimlerinin Etkileri	67
5.5.2 Kule Yüksekliğinin Etkisi	67
5.6 Karlılık Endeksi	67
6. ÇANAKKALE RÜZGAR SANTRALİ İHALESİ	69
6.1 Giriş	69
6.2 Yerleşim	69
6.3 Düzenleme	69
6.4 Miktarlar ve Lump Sum Maliyet Tablosu	70
6.5 Malzemeler	70
6.6 İhalede Verilecek Teklifin Saptanması	74
6.7 Karar Ağacı İle Programlama	77
7. RÜZGAR ENERJİSİNİN GELECEĞİ	85
7.1 2015 Yılında Dünya Elektrik Enerjisi Talebi	85
7.2 Rüzgar Enerjisinin Geleceği	86
7.3 Düşen Üretim Maliyetleri	87
8. SONUÇLAR	88
KAYNAKLAR	89

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1 Rüzgar Enerjisinin düşen maliyeti	5
Tablo 1.2 Dünyada kurulu güç	7
Tablo 1.3 Türkiye’de İşletmede Olan Rüzgar Santrali	7
Tablo 1.4 Türkiye’de Sözleşme Taslağı Üzerinde Mutabakat Sağlanıp DPT Görüşü Beklenen.....	7
Tablo 1.5 Türkiye’de Sözleşme Görüşmeleri Aşamasında Olan Projeler	7
Tablo 1.6 Türkiye’de Fizibilite Raporu Değerlendirilen Projeler	8
Tablo 1.7 Farklı enerji kaynakları için maliyet analizi	9
Tablo 5.1 Kapital Maliyetleri	64
Tablo 5.2 Ekipmanların % Olarak Maliyete Katkıları	65
Tablo 5.3 Farklı Enerji Kaynaklarının Maliyetleri.....	66

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Atmosferdeki hava hareketi.....	13
Şekil 2.2 : Hava akımı üzerine net kuvvetin etkisi.....	15
Şekil 2.3 : Nehir Akımları.....	15
Şekil 2.4 : CP değerlerinin hesaplanması.....	18
Şekil 2.5 : Weibull dağılımı.....	21
Şekil 2.6 : k değerleri	22
Şekil 3.1 : Kanat profilleri	24
Şekil 3.2 : Kanat profilleri üzerindeki kuvvetler.....	25
Şekil 3.3 : Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin rüzgar türbininin kanatları üzerine etkisi.....	27
Şekil 3.4 : Rüzgar türbini kuleleri.....	32
Şekil 3.5 : Küçük ve orta ölçekli türbinlerde kullanılan hız kontrol metodları.....	36
Şekil 3.6 : Yaw (yönerge) mekanizması.....	37
Şekil 3.7 : Kablo sayıcısı.....	38
Şekil 4.1 : Elektrik generatörleri.....	42
Şekil 4.2 : Senkron generatörleri.....	44
Şekil 4.3 : İndüksiyon generatörleri.....	45
Şekil 4.4 : Reaktif gücü ayarlayan kapasite bankası	49
Şekil 4.5 : Metal duvarlı radyasyonsuz oda.....	50
Şekil 4.6 : Rüzgar türbinlerinin endirek olarak şebekeye bağlanması.....	51
Şekil 4.7 : Sabit hızlı generatör kullanan bir stand-alone rüzgar sistemi.....	53
Şekil 4.8 : Dizelle hibrid sistem.....	55
Şekil 4.9 : Thevenin Eşdeğer Devresi.....	56
Şekil 4.10 : Yük paylaşımı.....	57
Şekil 4.11 : Vibrasyon sensörü.....	61

RÜZGAR ENERJİSİ VE UYGULAMALARI

ÖZET

Meteorolojik değişkenlerden olan rüzgar, M.Ö.'den başlamak üzere insanoğlu tarafından enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Önceleri çiftçiler tarafından daha çok su çekmek için kullanılan rüzgar gücü, aynı zamanda yelkenli araçlarda gemiciler tarafından da kullanılmıştır. Daha sonraları ise değirmenciler tarafından tahıl öğütme işleminde kullanılan rüzgar gücü tarih boyunca insanlara ilham kaynağı da olmuştur.

Doğu medeniyetlerinin Batı medeniyetlerine tanıttığı rüzgar enerjisi sanayi devrimi ile birlikte 20. Yy ortalarına kadar popüleritesini yitirmiştir. Petrol, kömür, doğal gaz vb. fosil yakıtlarının kullanıldığı termik santraller daha revaçta olmuştur. Fakat fosil yakıtlarının çevre dostu olmaması ve kullanıldığı zaman tükenilir olması insanları temiz ve tükenmeyen enerji kaynaklarına itmiştir.

Bu çalışmada rüzgar enerjisinin Türkiye'deki, Dünyadaki potansiyeli ve teknolojisi incelenip, bir rüzgar santrali ihalesinde verilen teklife nasıl karar verildiği de açıklanmıştır.

WIND ENERGY AND ITS APPLICATIONS

SUMMARY

Wind as a meteorological variable has been exploited as energy source by human beings since before Christ. Initially farmers have used wind power for material withdrawal but later sailors used it for navigation purposes for sails. This source of energy has become an inspiration source for creative activities of human beings and it has been used also for grinding wheat and other dry agricultural products. Eastern civilizations have introduced the wind power to the western societies but its significance has been lost until middle of the 20th century. Thermo centers have been comparatively very preferred that worked with the oil, coal, natural gas and other fossil energy sources. But since fossil based sources are not environmentally friendly and limited, this spurred people to use renewable and environmentally friendly sources.

In this thesis, the potential, technology of wind power both in Turkey and the World has been analyzed. In addition, I stressed the fact of how a bid for a wind power plant can be determined.

1. GİRİŞ

1.1 Rüzgar Enerjisinin Doğuşu

“Rüzgar enerjisinin ilk defa, Asya Medeniyetlerinden olan Çin, Tibet, Afganistan, ve İran’da kullanıldığı bilinmektedir. Rüzgar Türbinleri (RT) kullanımına ait ilk yazılı bilgiler Büyük İskender tarafından M.Ö. 200...300 yıllarında basit yapıdaki RT’leri hakkındadır. Ayrıca, M.Ö. 700 yıllarında Farslıların da düşey eksenli RT’leri kullandığı somut kanıtlardan bilinmektedir.

Rüzgar gücü kullanımı Asya’dan Avrupa’ya 10. Yüzyıl civarında geçmiştir. Bu geçişin ilk belirtileri olarak 11. Ve 12. Yüzyılda İngiltere’de rüzgar millerinin kullanıldığı bilinmektedir. Mesela, 1190’lı yıllarda Alman Haçlıları rüzgar millerini Suriye’ye getirmişlerdir. Dolayısı ile Ortaçağ döneminde rüzgar enerjisinin Avrupa’da kullanıldığını görmekteyiz. Hala günümüzde birçok ülkede çiftçiler tarafından kullanılan rüzgar milleri daha çok kuyulardan su çekmek amacıyla kullanılmaktadır.

Endüstri devrimi ile birlikte, 18. Yüzyılda buhar makinalarının ortaya çıkması sonucunda dünya, enerji gücünün temini için termodinamik işlemlere dayanan makinalardan yararlanmaya başlamıştır. Özellikle kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların kullanımı ile beraber, bu makinalar daha avantajlı duruma gelmiştir. ^{[[1]]}

İstenildiği zaman enerji kaynağı sağladıkları için, rüzgar enerjisinden daha popüler hale gelmişlerdir.

^{[[1]]} Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

Bu yüzden 19. Yüzyılda ve 20. Yüzyılın ortalarına kadar rüzgar enerjisinin önemi azalmıştır. Sadece Amerika, Rusya ve Avustralya gibi nüfusun geniş bir yelpazeye yayıldığı ülkelerde rüzgar enerjisi çiftçiler tarafından su çekmek maksadıyla kullanılmıştır.

1.2 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretiminin Öncüsü: Poul La Cour

Rüzgar Enerjisinden elektrik enerjisi üretmeyi düşünen ilk kişi Poul La Cour (1846-1908) Danimarka’da yaşamıştır. La Cour rüzgardan enerji üreten ilk türbini 1891 yılında yapmıştır. La Cour aynı zamanda aerodinamik alanında yaptığı çalışmalar ile de tanınmıştır.

1.3 La Cour’un İlk Rüzgar Türbinleri (RT)

“Askov Folk High School’ da 1897 yılında La Cour tarafından yapılan RT 89 W gücünde idi. 1905 yılında La Cour’un kuruculuğunu yaptığı Society of Wind Electricians’in 356 üyesi bulunmakta idi.

Diğer taraftan, rüzgar enerjisi ile ilgili ilk dergi (Journal of Wind Electricity) de La Cour’un editörlüğünde bu birlik tarafından yayınlanmıştır.”^[2]

1918 yılına ulaşıldığında, Danimarka’da rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretmek maksatlı 120 adet RT bulunmakta idi. Güçleri 20 ile 35 kW arasındaki bu türbinlerin toplam gücü 3 MW civarındaydı.

1.4 1940 Sonrasında Rüzgar Enerjisinin Dünya’da Durumu

İkinci Dünya Savaşı yıllarında Danimarkalı bir şirket olan F.L. Smith, 2 ve 3 kanatlı rüzgar türbinleri inşa etmiştir.

Bu türbinler de, öncekiler de olduğu gibi doğru akım üretiyorlardı. Fakat 1951 yılından itibaren doğru akım üreten generatörler, yerlerini yavaş yavaş alternatif akım üreten 35 kW asenkron generatörlere bırakmaya başlamışlardı.

^[2] EWEA, 2000. Wind force report

Mühendislik eğitimi almış olan Johannes Juul ve Vester Egeborg, Poul La Cour'un ilk öğrencilerindendi. Juul, 1950'lerde dünyada kullanılmaya başlanan alternatif akım üreten generatörlerin öncüsü olmuştur.

Daha sonra 1956-1957 yıllarında 200 kW gücünde ilk Gedser RT, Juul tarafından Gedser'de SEAS elektrik şirketi için yapılmıştır. Bu türbin günümüzde kullanılan RT'lere öncü niteliklere sahiptir. Bunlar 3 kanatlı, elektromekanik yaw(yönerge) sistemli ve asenkron motor kullanmakta idi. Stall (durdurma) kontrol prensibine göre çalışan Gedser türbininde, ayrıca aerodinamik uç freni bulunmakta idi. Bu sistem günümüzde kullanılan Stall (durdurma) kontrollü türbinlerde hala bulunmaktadır.

1960'lı yıllardan sonra rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ekonomik nedenlerle azalma göstermiştir. Daha ucuz olan fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz vb.) kullanılarak yapılan termik santraller revaçta olmaya başlamıştır. Fakat 1970'li yıllarda meydana gelen petrol krizi tekrar alternatif enerji kaynaklarını ön plana çıkarmıştır.

Rüzgar, güneş vb. alternatif enerji kaynaklarının yenilenebilir olması, çevre kirliliğine yol açmaması, ham maddeye gereksinim duymaması gibi özellikleri sebebiyle, bu enerji kaynakları yaygınlaşmaya başlamıştır

“Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjinin avantajları aşağıda belirtilmiştir:

- Sera gazı etkisi yaratmazlar
- Temiz enerji kaynağıdır
- Güvenilirliği ve ucuzluğu gittikçe artmaktadır
- Rüzgar türbini kurulan bir arazi ikili kullanım imkanına sahiptir

Bütün bu avantajlarına karşın, rüzgar enerjisinin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar ise,

- Gürültü kirliliğine yol açması
- TV görüntüleri ve iletişim sistemlerine etki etmesi

sayılabilir.

Günümüzde rüzgar enerjisi sektörü yıllık toplam cirosu 2 milyar dolar olan dev bir sektör haline gelmiştir. Günümüzde kullanılan rüzgar enerjisi, dünyadaki toplam enerji üretiminin %1 lik payına sahipken, önümüzdeki zaman diliminde bu oranın artacağı tahmin edilmektedir.”^[2]

1.5 Rüzgar Enerjisi İle Elektrik Üretiminde Azalan Enerji Maliyeti

“Gelişen türbin dizaynları rüzgar enerjisi ile elektrik enerjisi üretiminde maliyetin azalmasına katkıda bulunmuştur. Rüzgar enerjisi ile üretilen elektriğin maliyeti 1980 yılında 35 cent/kWh iken maliyet 1997 yılında uygun alanlarda 5 cent/kWh altına kadar düşmüştür.” ^[2] Bu maliyette rüzgar enerjisi en uygun fiyatlı enerji kaynaklarından birisi olmuştur. Rüzgar enerjisi teknolojisinin gelişimine katkıda bulunan faktörler aşağıda belirtilmiştir:

- Yüksek dayanıklılıkta fiber bileşimlerin kanatların yapımında kullanılması
- Güç elektroniği cihazlarının ucuzlayan fiyatları
- Elektrik generatörlerinin değişken hızda işletilebilir bu sayede maksimum enerjinin kullanılabilmesi
- Türbinler ve santraller ebat olarak büyüdükçe maliyetin azalması
- Öğrenme etkisi ile oluşan artmış tecrübe .

^[2] EWEA, 2000. Wind force report

“Tablo 1.1: Rüzgar Enerjisinin düşen maliyeti”^[1]

YIL	Maliyet(CENT)
1980	35
1985	20
1990	10
1995	5
2000	4

1.6 Dünyada Rüzgar Enerjisi Kurulu Gücü

“Yapılan araştırmalar, rüzgar gücünün şu anda dünyada en hızlı yazılan enerji kaynaklarından biri olduğunu göstermektedir. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği’nin yaptığı araştırmalara göre, Avrupa’nın 1998 yılı kapasite arttırımı 1600 MW’tır. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği (EWEA) 2010 yılında, hedef olarak 60,000 MW belirlemiştir. EWE’ nin 2020 yılı hedefi ise 150,000 MW dir.”^[1]

Avrupa’da kurulu güç son 6 yıl içerisinde %40 artmış olup, yaklaşık 5 milyon kişinin enerji ihtiyacını karşılamaktadır.

Tablo 1.2’de 2000 yılı sonu itibariyle Avrupa’daki rüzgar enerjisi kapasitesi görülmektedir.

^[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

“1.2 Dünyada kurulu güç”^[3]

EU ÜLKELERİ	KURULU GÜÇ(MW)
Almanya	6113
Danimarka	2300
İspanya	2235
Hollanda	446
İtalya	427
UK	406
İsveç	231
Yunanistan	189
İrlanda	118
Portekiz	100
Avusturya	77
Fransa	66
Finlandiya	38
Belçika	13
Luksemburg	10
Toplam EU	12769
ÜLKELERİ	
<i>Türkiye</i>	<i>19</i>
Norveç	13
Çek Cumhuriyeti	12
Polonya	5
İsviçre	3
Romanya	1
TOPLAM	12822

1.7 Türkiye’de Durum

Ülkemizde son yıllarda rüzgar enerjisine olan ilgi artmıştır. Şu anda rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretme amaçlı 2 adet rüzgar çiftliği bulunmaktadır. Bunlardan ilki 3 adet rüzgar türbini bulunan Çeşme Alaçatı Germiyan Köyü’nde 1.7 MW kurulu güçlü; diğeri de yine İzmir Çeşme Alaçatı’da 12 adet rüzgar türbinine sahip 7.2 MW kurulu güçlü santraldir. Bununla beraber, yakın bir gelecekte ülkemizde rüzgar santrallerinin önemli bir artış göstereceği resmi kaynaklar tarafında da doğrulanmaktadır.

Aşağıda Türkiye’deki rüzgar santrali potansiyeli tablo halinde gösterilmiştir

^[3] EWEA, 2000. Wind energy technology

“1.3 Türkiye’de İşletmede Olan Rüzgar Santrali”^[4]

İşletmede Olan Rüzgar Santrali		
Projenin Adı	Kurulu Güç(MW)	Yeri
Çeşme Alaçatı	7,2	İzmir Çeşme Alaçatı

“1.4 Türkiye’de Sözleşme Taslağı Üzerinde Mutabakat Sağlanıp DPT Görüşü Beklenen”^[4]

Sözleşme Taslağı Üzerinde Mutabakat Sağlanıp DPT Görüşü Beklenen Projeler		
Projenin Adı	Kurulu Güç(MW)	Yeri
Kocadağ	50,4	İzmir Çeşme
Çanakkale	30	Çanakkale
Bozcaada	10,2	Çanakkale

“1.5 Türkiye’de Sözleşme Görüşmeleri Aşamasında Olan Projeler”^[4]

Sözleşme Görüşmeleri Aşamasında Olan Projeler		
Projenin Adı	Kurulu Güç(MW)	Yeri
Mazıdağı	39	İzmir Çeşme Alaçatı

^[4] Namık Orhun 2001. Çanakkale Wind Farm Project

“1.6 Türkiye’de Fizibilite Raporu Değerlendirilen Projeler”^[4]

Fizibilite Raporu Değerlendirilen Projeler		
Projenin Adı	Kurulu Güç(MW)	Yeri
Datça	28,8	Datça
Datça	12,5	Datça
Yalıkavak	7,92	Muğla
İntepe	30	Çanakkale
İntepe	13,2	Çanakkale
Akhisar	12	Manisa
Akhisar	30	Manisa
Bandırma	15	Balıkesir
Beyoba	7,92	Manisa
Çeşme	12	İzmir
Karaburun	22,5	İzmir
Kocadağ	43,5	İzmir
Yaylaköy	15	İzmir
Lapseki	15	Çanakkale
Şenköy	12	Hatay
Hacıömerli	45	İzmir
Belen	20-30	Hatay
Kapıdağ	20-35	Balıkesir
Kumkale	12,6	Çanakkale
Karabiga	15-50	Çanakkale
Mazıdağı	90	İzmir
Mazıdağı	39,6	İzmir
Yellice Belen	70-100	Karaburun

1.8 Rüzgar Enerjisinin Diğer Enerji Kaynaklarıyla Karşılaştırılması

Rüzgar değerli ve yeniden elde edilebilir bir enerji kaynağıdır. Bunlara ek olarak rüzgar bol miktarda bulunmakla birlikte oldukça da güvenli bir enerji çeşididir ve temiz bir çevre sağlanmasına katkıda bulunur.

Diğer enerji kaynaklarından farklı olarak, rüzgar enerjisi atmosferi kirletmez ve tehlikeli artıklarda meydana getirmez. Rüzgar enerjisi ileri teknoloji ürünü olup, rüzgar türbinlerinin %90’ı Avrupa’da üretilir.

Diğer taraftan, rüzgar enerjisi ekonomik açıdan da oldukça karlıdır. Diğer enerji kaynaklarının maliyeti zamanla artmasına karşın, rüzgar enerjisinin maliyeti zamanla azalmaktadır.

^[4] Namık Orhun 2001. Çanakkale Wind Farm Project

Rüzgar türbinlerinin ortalama ömrü 40 yıl olup bu değer atmosferik, nem , rüzgar yapısı gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Türbinler ömrünü tamamladıkları zaman kolaylıkla sökülebilirler ve kullanıldıkları saha kendi orijinal kullanım amacına kolaylıkla dönebilir. Ayrıca, bu hurda malzeme satıldığı zaman de montaj ücretini kolaylıkla çıkarabilir.

Diğer bir avantajı da şu şekilde özetlenebilir; 20 türbinli tipik bir rüzgar santrali yaklaşık 1 km² bir alan işgal etmiş olup, diğer enerji kaynaklarından farklı olarak, bu bölgeyi işgal eden rüzgar santrali bu alanın sadece %1 ini kullanmaktadır. Kalan alan, tarım amaçlı olarak türbinlerinin temeline kadar kullanılabilir.

Rüzgar enerjisinin maliyetinin diğer enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığı tablo aşağıda 1.7 numarası ile verilmiştir. Bu tablo da rüzgar enerjisinin diğer enerji kaynaklarından daha ekonomik olduğunu ispatlamaktadır.

“Tablo 1.7: Farklı enerji kaynakları için maliyet analizi”^[1]

Güç Kaynağı	Minumum(Cent)	Maksimum(Cent)	Ortalama(Cent)
Güneş	6,00	7,80	6,90
Nükleer	5,30	9,30	7,30
Doğal Gaz	4,40	5,00	4,70
Hidrolik	5,20	18,90	12,05
Rüzgar	4,70	7,20	5,95
Kömür	4,50	7,00	5,75
Jeotermal	4,30	6,80	5,55

[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

1.9 Çalışmanın Amacı

Gelişmekte olan bir ülke olarak ülkemizde enerji tüketimi günden güne artmaktadır. Bu amaçla, rüzgar, güneş vb. gibi alternatif, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bulunması ve geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Diğer enerji kaynaklarının yenilenebilir olmaması ve çevreyi kirleten yapıda olması, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini daha da arttırmaktadır. Ülkemiz gibi rüzgar potansiyelinin yüksek olduğu yerlerde temiz enerji kaynaklarının değerlendirilip kullanılması yoluna hızla gidilmelidir. İşte bu amaçla, öncelikle rüzgar enerjisi teknolojisi tanıtılıp daha sonra da elektrik üretimi için analiz yapılmıştır.

Bölüm 1’de rüzgar enerjisinin eski çağlardan günümüze kadar geçirmiş olduğu evreler anlatılmış olup buna ek olarak dünyada ve ülkemizde rüzgar enerjisinin son durumu gözden geçirilmiştir. Rüzgar oluşum mekanizması ve etki eden faktörler ise Bölüm 2’ de verilmiştir.

Aerodinamik yapı ve rüzgar türbininin rüzgardan enerjiyi nasıl oluşturduğu ile ilgili açıklamalardan ve günümüzde kullanılan modern rüzgar türbinlerinden Bölüm 3 de bahsedilmiştir. Rüzgar türbinlerinin elektriksel yapısı bölüm 4’te genel olarak anlatılıp, rüzgar enerjisinin ekonomik olarak incelenmesi ise bölüm 5’te verilmiştir. Bununla birlikte, Çeşme Rüzgar Santrali’nin keşif özeti ve bu santralle ilgili verilen teklifin incelenmesi de Bölüm 6 kapsamındadır. Bölüm 7’de ise rüzgar santrallerinin geleceğiyle ilgili görüşler verilir, bölüm 8 ile de sonuç kısmı bağlanmıştır.

2. RÜZGAR OLUŞUMU VE HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

2.1 Giriş

“Rüzgar enerjisinin kaynağı güneştir. Rüzgar, yeryüzünün eşit olmayan ısınması sonucunda ortaya çıkan kuvvetlerin etkisi ile oluşan hava hareketidir. Rüzgar enerjisinden yararlanmanın en önemli bölümü ise, rüzgar enerji potansiyelinin doğru bir şekilde belirlenebilmesidir. Rüzgar enerjisi, rüzgar şiddeti, havanın özgül kütlesi, rüzgarın tutulacağı rotor alanının ve rotorunun bulunduğu yüksekliğin fonksiyonudur.

Rüzgar potansiyeli belirlenirken dikkat edilmesi gereken en önemli faktör rüzgar şiddetidir, çünkü enerji şiddetin küpü ile orantılıdır

Rüzgar şiddet ve yön olmak üzere 2 parametre ile belirlenir. Rüzgarın yönü, coğrafi kuzey veya pusula yönü ile bulunarak saat yelkovanı dönüşüne göre daire şeklinde ifade edilir. Bu şekle rüzgar gülü şablonu denir. Rüzgar gülü şablonu toplam olarak 360°'lik bir alan süpürür. Bu alan, 16 parçaya yani 22,5°'lik yönlerle ayrılır.

Rüzgar hızı km/h veya m/s olarak ölçülmektedir. Enerji potansiyeli belirleme amacına yönelik çalışmalarda m/s birimi kullanılmaktadır.”^[2]

2.2 Rüzgarın Temel Oluşum Mekanizması

Yukarıda belirtildiği gibi, rüzgar oluşumuna yeryüzündeki farklı sıcaklık dağılımı neden olur. Sıcaklık dağılımını ise, enlem, kara-deniz, yükseklik ve mevsimler etkilemektedir. Okyanus ve deniz kıyısına sahip kara parçalarında sıcaklık farkı yüksek olduğu için rüzgar potansiyeli de yüksektir.

^[2] EWEA, 2000. Wind force report

Rüzgarın arazi üzerinde aşındırma ve taşıma etkileri vardır. Bitkiler rüzgarın yön ve şiddetine göre eğiklik gösterirler.

Meteorolojik ve topoğrafik açılardan rüzgarın oluşabileceği yerler:

- Basınç gradyanının yüksek olduğu yerler
- Yüksek engebesiz tepe ve vadiler
- Güçlü jeostrofik rüzgarların etkisi altında kalan bölgeler
- Jeostrofik rüzgar ve termal etkileşimlerin meydana geldiği kıyı şeritleri
- Kanal etkileşimlerinin meydana geldiği dağ silsileli, vadiler ve tepeler

Rüzgarın topografya ile ilişkisi de çok önemlidir. Dağ rüzgarı, vadi rüzgarı, kara ve deniz meltemleri, fon rüzgarları, katabatik rüzgarlar gibi topoğrafik etkilerle meydana gelen rüzgarlar bulunmaktadır. Topoğrafyanın rüzgar üzerinde 3 önemli etkisi bulunmaktadır. Bunlar, pürüzlülük, oroğrafik ve perdeleme etkileridir.

Oroğrafik etkilerden kasıt, tepeler, sırtlar, basamaklı arazi yapısı, oluk, vadi ve yüksek platoların bulunması sayılabilir. Bu elemanlar rüzgar üzerinde ilave bir etkiye sahiptir. Örneğin, rüzgar bir zirveye yaklaşırken, üstünden aşarken veya dağın eteklerine kadar hızlanırken; zirve tabanında yavaşlamaktadır.

2.3 Atmosferik Sınır Tabaka Ve Rüzgar Akışına Etki Eden Faktörler

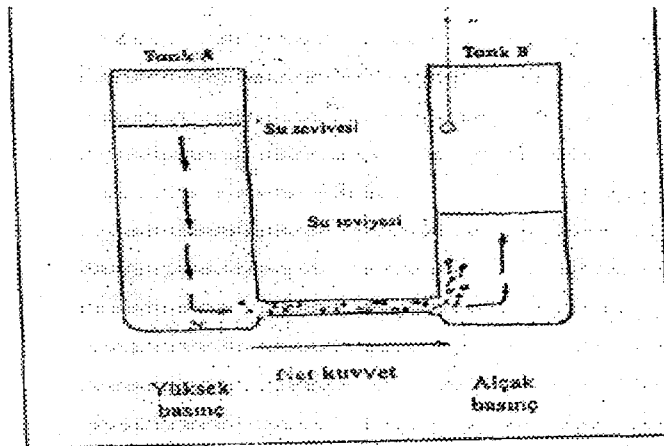
“Rüzgar akışına etki eden faktörlere girmeden önce atmosferik sınır tabaka ile ilgili bilgi vermek faydalı olacaktır. Atmosferik sınır tabaka, yüzeydeki değişikliklerden en fazla etkilenen ve bu etkilenmeye hızlı bir şekilde tepki veren atmosferin yüzey tabakası olarak tanımlanır. Atmosferik sınır tabakada, momentum, ısı ve kütle alışverişi meydana gelir. Rüzgar enerjisinde kullanılan rüzgar eşitlikleri atmosferik sınır tabaka için geliştirilmiştir. Atmosferik sınır tabakada rüzgara etki eden faktörler arasında:

- Büyük ölçekli basınç ve sıcaklık gradyanları

- Yüzey sürtünmesi ve momentum alışverişine neden olduğundan dolayı yüzey pürüzlülük parametresi
 - Sınır tabakada rüzgar kaymalarını meydana getiren sınır tabaka yüksekliği
 - Sıcaklık ve momentum yatay taşınımı,
- sayılabilir.

2.3.1 Rüzgarın Oluşumu

Rüzgar en basit anlamda, hava hareketi olduğundan atmosferde havayı harekete, hangi mekanizmanın başlattığını incelemek yeterli olacaktır. Bunun için öncelikle suyu örnek vererek başlayabiliriz. Aşağıdaki şekil 2.3.1 incelendiğinde, A tankının 2/3'ü su ile dolu iken, B tankının 1/3'ünün su ile dolu olduğunu varsayalım. Herbir tanktaki su basıncı, tankın üzerinde bulunan suyun ağırlığına eşit olduğundan, A tankının basıncı daha büyüktür. Basınç tanım olarak birim alana uygulanan net kuvvet olduğundan, net kuvvet, A tankından B tankına doğru olacaktır ve bunun sonucunda da A tankından B tankına doğru bir su akışı başlayacaktır. Hava da su gibi bir akışkan olduğundan dolayı, aynı mantık atmosfer için de geçerlidir. Basıncı yatay farklılıklardan dolayı, atmosferik basınç havanın hareketine neden olacaktır”²¹



Şekil 2.1 : Atmosferdeki Hava Hareketi

2.3.2 Basınç Gradyanı (Eğimi) Kuvveti

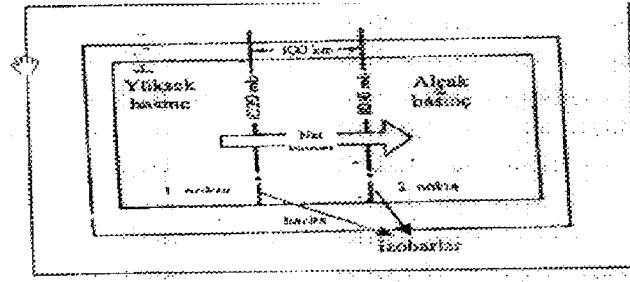
“Rüzgarın nasıl oluştuğunu anlayabilmek için üzerinde durulması gereken önemli bir konu da basınç gradyanı kuvvetidir. Gradyan kavramı belirli bir aralıktaki değişim olarak tanımlanır. Basınç gradyanı derken, basıncın belli bir mesafedeki (iki nokta arasında) değişimini anlayabiliriz. Bu söylediklerimizi formül halinde aşağıdaki eşitliklerle verebiliriz.”^[2]

Gradyan=İncelenen fiziksel büyüklüğün iki nokta arasındaki farkı/Aradaki mesafe

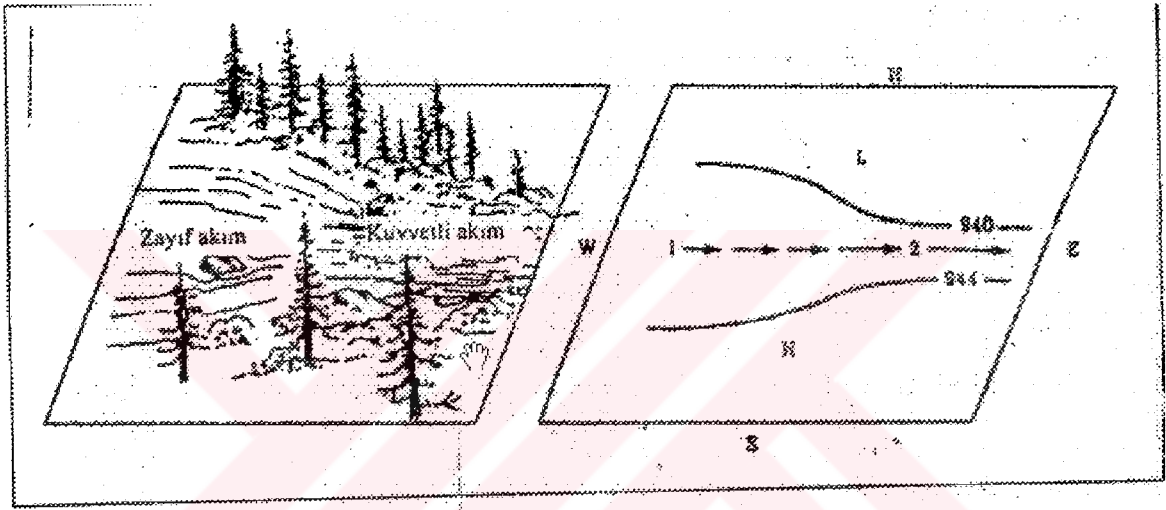
Basınç Gradyanı=İki nokta arasındaki basınçtaki farklılık/Aradaki Mesafe

Şekil 2.1 incelendiği zaman, sol taraftaki yüksek basınç alanı, sağ tarafta ise alçak basınç alanı olduğu görülmektedir. İzobarlar (eş basınç eğrileri) ise, basınç değişimini vermektedir. Basınç değerlerindeki bu farklılık, hava akımı üzerine net bir kuvvet etki ettirir. Bu kuvvete basınç gradyanı kuvveti denir. Basınç gradyanı kuvveti izobarlara dik olarak yüksek basınçtan alçak basınca doğru yönelmiştir. Basınç gradyanı büyüdükçe, basınç gradyanı kuvveti dolayısıyla rüzgar şiddeti de artmaktadır. Hava haritaları incelendiğinde, birbirine yakın izobarların bulunduğu yerlerde daha büyük basınç gradyanı ve şiddetli rüzgar bulunduğunu söyleyebiliriz. Doğada da bu olayı gözlemlemek mümkündür, nehir akımlarında nehrin geniş olduğu yerde su yavaş akarken, nehrin daralmaya başladığı yerlerde ise, daha hızlı akmaktadır(Şekil 2.2)

^[2] EWEA, 2000. Wind force report



Şekil 2.2 : Hava Akımı Üzerine Net Kuvvetin Etkisi



Şekil 2.3 : Nehir Akımları

Hava kuvveti üzerinde etkiyen tek kuvvet basınç gradyanı kuvveti değildir. Hava parseli harekete başladıktan sonra üzerine Coriolis kuvveti denen bir kuvvet etki etmektedir.

2.3.3 Coriolis Kuvveti

Coriolis kuvveti dünyanın dönüşü nedeni ile ortaya çıkan bir kuvvettir ve kuzey yarımkürede cismi daima sağına doğru saptırıcı bir kuvvettir. Bu kuvvet matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$C = f V_h \times k$$

(Denklem 2.1)

Burada kullanılan parametreler ise,

V_h =Rüzgar Hızı

f = Coriolis Parametresi

olarak verilmektedir.

2.4 Rüzgar Enerjisi Formülasyonun Çıkarılması

“Bilindiği gibi hareket halindeki her cisim bir kinetik enerjiye sahiptir. Rüzgar da hareket halinde bir hava akımı olduğu için rüzgarın da bir kinetik enerjisi vardır.

M kütleli ve V hızına sahip havanın sahip olduğu kinetik enerji:

$$\text{Kinetik Enerji} = \frac{1}{2} m V^2 \text{ jule}$$

Hareket halindeki havanın gücü ise kinetik enerjinin saniye başına akış oranıdır.

$$\text{Güç} = \frac{1}{2} \times (\text{kütlenin saniye başına akış oranı}) \times V^2$$

$$\rho = \text{Özgöl kütle, kg/m}^3$$

$$A = \text{Rotor kanatlarının süpürdüğü alan, m}^2$$

$$V = \text{Havanın hızı, m/s}$$

Buna dayanarak, hacimsel akış oranı $A.V$, hava kütlelerinin akış oranı saniye başına $\rho.A.V$, olmak üzere, güç aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir:

$$P = \frac{1}{2} (\rho.A.V).V^2 = \frac{1}{2} \rho.A.V^3 \quad (\text{Denklem 2.2})$$

Denklem 2.2 de görüldüğü üzere, kanatlar yönündeki rüzgardaki güç, kanatları süpüren havanın özgül kütlesiyle lineer olarak, rüzgar hızının da küpüyle de değişir.”^[1]

^[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

2.4.1 Rüzgardan Elde Edilen Güç

Rotor bıçakları tarafından elde edilen gerçek güç, kanat yönündeki ile aksi yöndeki güçlerinin farkıdır. Bu,

$$P_0 = 1/2 \text{ kütle akış hızı/s. } \{ V^2 - V_o^2 \}$$

Bu eşitlikte,

$$P_0 = \text{Türbin çıkış gücü}$$

$$V = \text{Rotor bıçaklarına giren rüzgarın hızı}$$

$$V_o = \text{Rotor bıçaklarını terk eden rüzgarın hızı}$$

Havanın kütlelerinin akış hızı ortalama hızla özgül kütle çarpımına eşittir.

Bu da,

$$\text{Kütleli Akış Hızı: } \rho \cdot A \cdot (V + V_o)/2$$

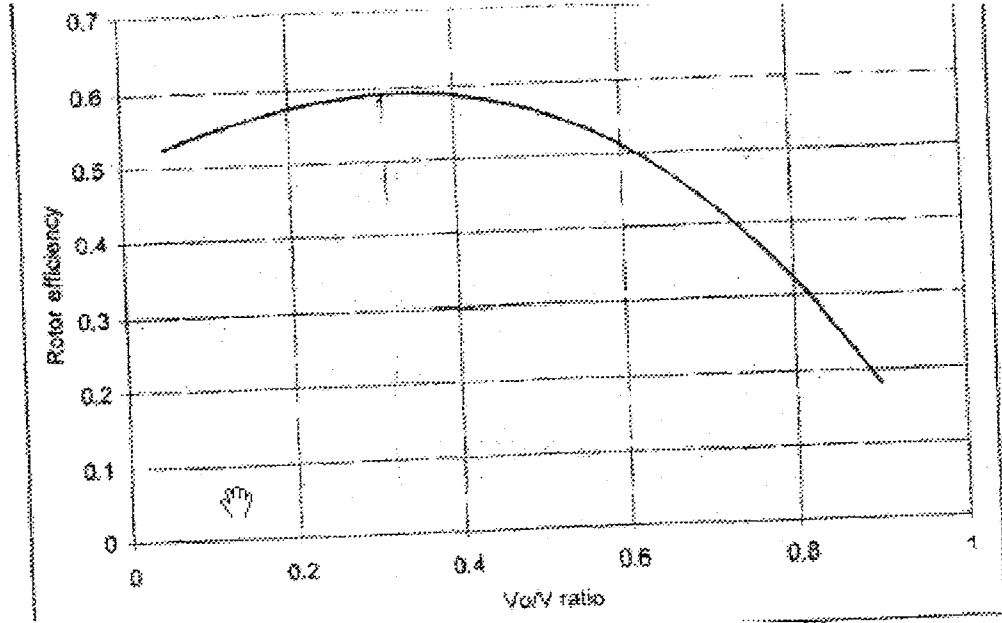
Genaratörü süren rotor tarafından elde edilen mekanik güç,

$$P_0 = 1/2 \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \quad (\text{"Denklem 2.3"}^{[1]})$$

$$C_p = (1 + V_o/V)[1 - (V_o/V)^2]/2 \quad (\text{"Denklem 2.4"}^{[1]})$$

" C_p değerleri kanat yönündeki rüzgar hızının aksi rüzgar hızına oranına bağlı olarak değişir, bu V_o/V 'dir. C_p güç katsayısı veya rotor verimi olarak adlandırılır. Güç katsayısının V_o/V 'ye bağlı olarak çizilmiş eğrisi, C_p nin tek ve maksimum değer fonksiyonu olduğunu gösterir.(Şekil 2.3)"^[1]

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press, New York.



“Şekil 2.4 : C_p değerlerinin hesaplanması”^[1]

Şekilden 2.4 de görüldüğü üzere, C_p nin maksimum değeri 0,59’dur. Bu değer V₀/V’nin 1/3 olduğu durum için geçerlidir.

Bu koşul altında,

$$P_{max} = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot 0,59 \quad (\text{“Denklem 2.5”}^{[1]})$$

C_p nin teorik maksimum değeri 0,59 olmasına karşın, pratikte maksimum değer. 2 kanatlı türbinler için 0,50’nin altında olup, bu değer daha fazla bıçaklı türbinler için ise 0,2 ile 0,4 arasındadır.

Eğer maksimum değer için 0,50 değerini alırsak, rüzgar türbinin maksimum çıkış gücü daha basit bir hal alır ve ,

$$P_{max} = 1/4 \cdot \rho \cdot V^3 \quad (\text{“Denklem 2.6”}^{[1]})$$

^[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

2.5 Rüzgar Süpürme Alanı

“Daha önce de belirttiğimiz gibi rüzgar türbinin çıkış gücü rotorun süpürdüğü alanla lineer olarak değişir. Yatay eksenli türbinler için, rotorun süpürdüğü alan:

$A=\pi/4D^2$ burada D rotor çapıdır.

Dikey eksenli makinalarda ise, eşitlik biraz daha karmaşık olmakla birlikte, yaklaşık olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$A=2/3.(Merkezden\ maksimum\ rotor\ genişliği).(Rotorun\ Yüksekliği)^{[1]}$

2.6 Hava Özgül Kütlesi

“Rüzgar gücü bıçakları süpüren havanın özgül kütlesi ile lineer olarak değişir.

Havanın özgül kütlesi basınç ve sıcaklığa bağlıdır.

$$\rho=P/R.T$$

Yukarıdaki eşitlikte,

P=Havanın Basıncı

T=Mutlak Sıcaklık

R=Gaz sabiti

Deniz seviyesinde hava özgül kütlesi (1 atm basınç ve 60F) 1,225 kg/m³.

Bu referans değerini ışığında, farklı bölgeler için yani farklı basınç ve sıcaklık değerleri için, yeni ρ değerleri hesaplanabilir. Hem sıcaklık hem de basınç denizden yüksekliğe bağlı olarak değişir.

Buna göre yeni ρ değerleri aşağıdaki denklemle hesap edilebilir.”^[1]

$$\rho=\rho_0-1.194.10^{-4}.Hm$$

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

2.7 Farklı Yüksekliklerde Rüzgar Hızının Hesap Edilmesi

Belirli bir yükseklikte ölçülmüş rüzgar hızını kullanarak, herhangi bir yükseklik için rüzgar hızı hesap edilebilir.

$$V1/V2=(h1/h2)^{\alpha} \quad (\text{"Denklem 2.7"}^{[1]})$$

Denklem 2.7’de

H1=Rüzgar Şiddetinin ölçüldüğü yükseklik(m)

H2=Rüzgar Şiddetinin Hesaplanmak istendiği yükseklik(m)

V1=h1 yüksekliğinde rüzgar hızı (m/s)

V2=h2 yüksekliği için hesaplanacak rüzgar hızı(m/s)

α pürüzlülük katsayısı olup birimsizdir ve 0 ile 1 arasında değişir. Bu değer kararlılık ve pürüzlülük uzunluğuna göre değişir olmasına karşın genellikle 1/7 olarak alınır.

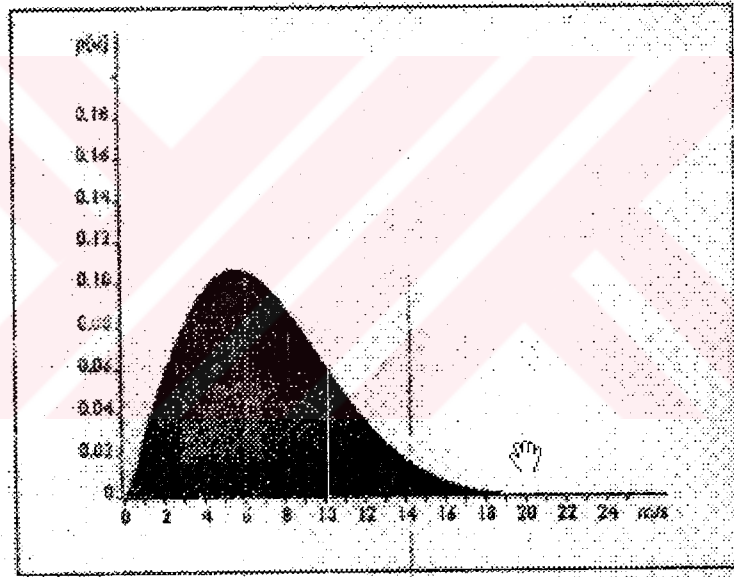
2.8 Rüzgar Şiddeti Dağılımı

“Güçle kübik ilişkisi olduğu için, rüzgar hızı herhangi bir sahanın güç potansiyelini değerlendirebilmek için en önemli parametredir. Herhangi bir sahadaki rüzgar asla sabit değerde kalmaz. Rüzgar şiddeti hava sistemi, yüzeyden yükseklik ve araziye bağlı olarak değişimler gösterir. Rüzgar hızı her dakika, saat, gün ve mevsim için farklılık gösterdiği için, yıllık ortalama rüzgar hızının hesap edilebilmesi için en az 10 yıllık izleme periyodu gerekir. Bu uzun süre herhangi bir sahanın enerji potansiyelini değerlendirme güvenini artırır. Buna karşın, uzun süreli ölçümler pahalı ve pek çok proje bu kadar uzun süre bekleyemezler.”^[1] Bu gibi durumlarda, örneğin 1 senelik izleme süresi için toplanmış veri benzer özelliklere sahip ve daha uzun süre için izlenme verilerine sahip saha ile kıyaslanır ve böylece ilgili sahanın rüzgar hızı bildirilebilir. Bu teknik, ölçüm bildirme olarak adlandırılır.

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

Rüzgar güneş ve mevsimler tarafından sürüldüğü için, rüzgar paterni genellikle 1 yıllık periyotlarla tekrar eder. Rüzgar sitesi, takvim aylarında ortalama alınarak hız datası ile tarif edilir.

Rüzgar hızı değişimleri herhangi bir periyot için olasılık dağılım fonksiyonu ile tanımlanır. Rüzgar hızındaki değişimler en iyi şekilde Weibull olasılık dağılım fonksiyonu ile tanımlanır. Eğer uzun bir süre (örneğin 1 yıl) boyunca rüzgar verilerini ölçersek, rüzgarın hangi şiddette ne kadar sıklıkla estiğini gösteren grafik şekil 2.8 deki grafiğe benzeyecektir. Şekilde ortalama hız değeri 7 m/s olarak görülmektedir.



“Şekil 2.5 Weibull dağılımı”^[1]

İki parametrelili Weibull dağılımının matematiksel ifadesi ise,

$$f(V)=(k/A)(V/A)^{k-1} \exp[-(V/A)^k] \quad (\text{Denklem 2.8})$$

Denklem 2.8’de

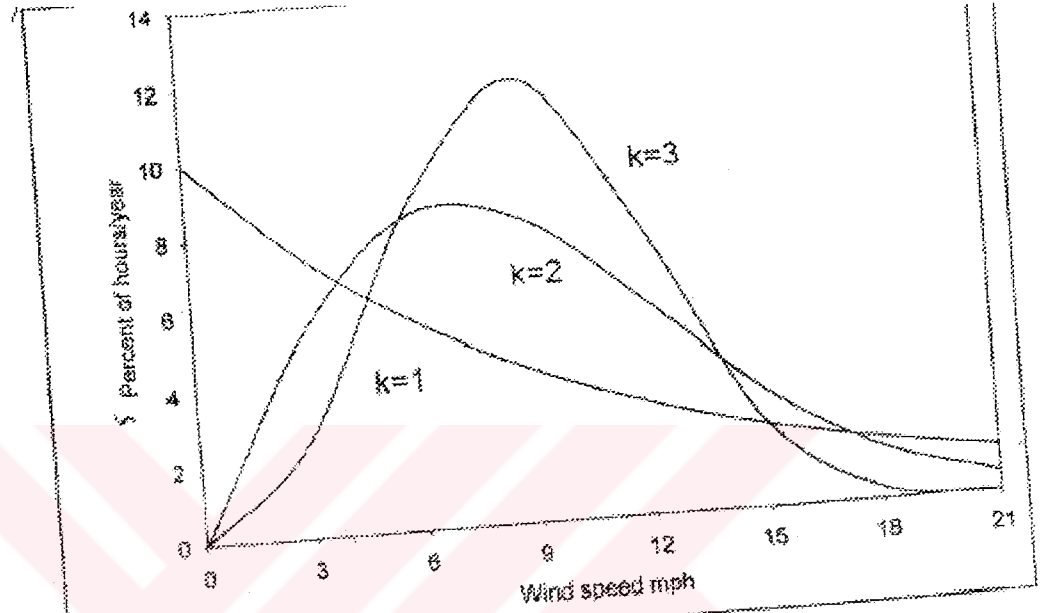
V =Rüzgar Hızı (m/s)

$f(V)$ =Rüzgar Hızı frekansı

A=Weibull büyüklük katsayısı (m/s)

k=Weibull Şekil Katsayısı

k, şekil katsayısı, eğriye bağlı olarak değişiklik gösterir. Farklı eğri şekilleri için k değerleri aşağıdaki(şekil 2.5) de gösterilmiştir.



“Şekil 2.6 : k değerleri”^[1]

^[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press, New York.

3.RÜZGAR TÜRBİNLERİ

3.1 Giriş

“Rüzgar türbinlerinin nasıl çalıştığını anlamak için iki önemli aerodinamik kuvvet iyi bilinmelidir: Bunlar sürüklenme ve kaldırma kuvvetleridir.

Sürüklenme kuvveti, cisim üzerinde akış yönünde meydana gelen bir kuvvettir. Örneğin düz bir plaka üzerinde meydana gelebilecek maksimum sürüklenme kuvveti hava akışının cisim üzerine 90° 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 kuvvetine en iyi örnek olarak paraşüt verilebilir. Bu kuvvet sayesinde paraşütün hızı kesilmektedir. Sürüklenme kuvvetinin etkilerini minimuma indirebilmek için yapılmış özel cisimlere akış hatlı (streamlined) cisimler denir. Bu cisimlere örnek olarak elips, balıklar, zeplin verilebilir.

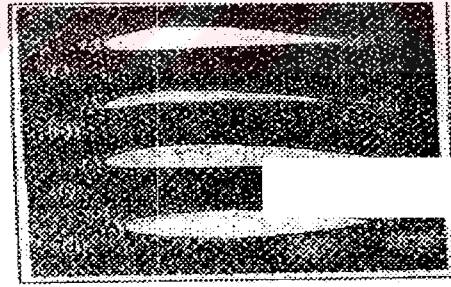
Düz bir plaka üzerine etkiyen kaldırma kuvveti, hava akışı plaka yüzeyine 0° açı ile geldiğinde görülür. Havanın akış yönüne göre meydana gelen küçük açılarda akış şiddetinin artmasından dolayı düşük basınçlı bölgeler meydana gelir. Bu bölgelere akış altı da denir. Dolayısı ile, hava akış hızı ile basınç arasında bir ilişki meydana

gelmiş olur. Yani hava akışı hızlandıkça basınç düşer, hava akışı yavaşladıkça ise basınç artar. Bu olaya Bernoulli etkisi denir. Kaldırma kuvveti de cismin üzerinde emme veya çekme meydana getirir.”^[1]

3.2 Rüzgar Türbinleri Kanat Profili

“Cismin referans hattı ile hava akışı arasında yaptığı açısı hücum açısı olarak adlandırılır ve α ile gösterilir. Kanat profiline 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 profiline üst kısmında basıncı düşürerek alçak basınç bölgesi meydana getirir. Bunun sonucunda emme etkisi meydana gelerek kanat havalanacaktır. İki temel kanat profil tipi vardır:

- Simetrik
- Asimetrik



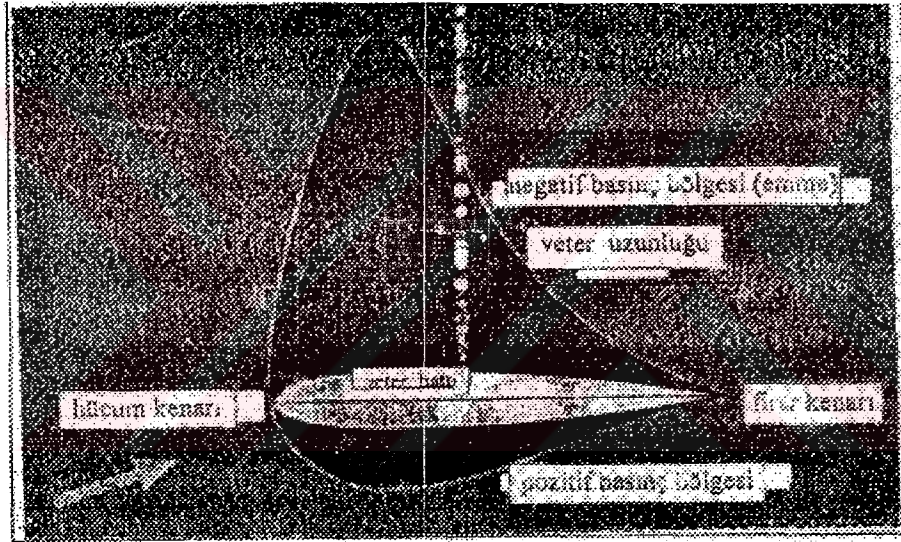
Şekil 3.1 Kanat profilleri

Şekil 3.1 de simetrik ve asimetrik kanat profilleri gösterilmiştir. a, b, c asimetrik kanat profillerine, d ise simetrik kanat profillerine örnek teşkil etmektedir.”^[1]

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press, New York.

Şekil 3.1 dikkatle incelendiğinde, bazı ortak noktalar göze çarpmaktadır. Bunlar, dışbükey olmaları, hücum kenarlarının (leading edge) dairesel, firar kenarlarının da (trailing edge) keskin ve sivri olduğu görülmektedir.

Aralarındaki temel farklılık ise, alt yüzeylerin şeklidir. Asimetrik kanat profillerinde, profilin alt yüzeyi hava akış yönüne en yakın noktadan maksimum kaldırmayı yaparken; simetrik kanat profillerinde her iki yüzeyde de aşağı yukarı eşit bir kaldırma görülür. Aşağıdaki Şekil 3.2’de ise kanat profili üzerindeki kuvvetler gösterilmiştir.



“Şekil 3.2 : Kanat profilleri üzerindeki kuvvetler”^[1]

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.

^[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press, New York.

3.2.1 Sürüklenme Katsayısı (Cd)

Herhangi bir kanat profili için sürüklenme katsayısı aşağıdaki ifade ile verilir.

$$C_d = D / 0.5 \rho V^2 A_b \quad (\text{Denklem 3.1})$$

Denklem 3.1'deki büyüklükler aşağıdaki anlamlara sahiptirler:

D=Sürüklenme Kuvveti (N)

ρ =Hava Yoğunluğu (kg/m^3)

V=Hava hızı (m/s)

A_b =Kanat Alanı (m^2)

3.2.2 Kaldırma Katsayısı (Cl)

“Kanat profilleri için kaldırma katsayısı ise

$$C_l = L / 0.5 \rho V^2 A_b \quad (\text{Denklem 3.2})$$

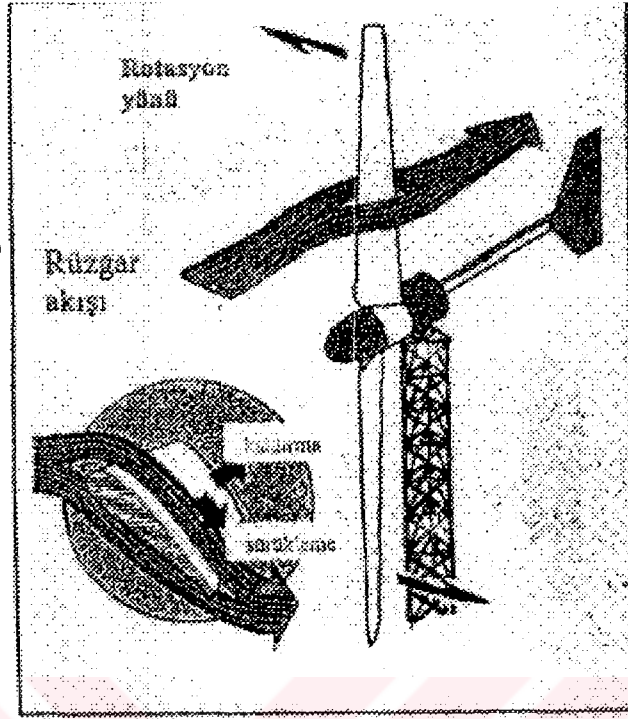
Eşitliği ile verilir. Denklem 3.2 de kullanılan L indisi, kaldırma kuvvetini ifade etmektedir.

Her iki katsayı da rüzgar tünellerinde farklı hücum açıları ve rüzgar hızlarında hesaplanmaktadır. Her bir hücum açısı için hesaplanan C_d ve C_l değerlerinin oranları C_d/C_l alınır, bu oranların en büyük olduğu hücum açısı değeri, RT den en iyi verim alınabilecek değeri.

Tüm bu anlatılanların ışığında rüzgar türbinlerinin dönmesinde temel mantık sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin etkisidir. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin rüzgar türbininin kanatları üzerine etkisi ise, Şekil 3.3’ de verilmiştir.”^[1]

Şekil 3.3 de görüldüğü üzere, rüzgar akışı, pervane kanada çarptığında, kanat profilinin üst kısmından daha hızlı, alt kısmından ise daha yavaş geçecektir.

^[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.



Şekil 3.3 : Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin rüzgar türbininin kanatları üzerine etkisi

3.3 Sistem Dizayn Özellikleri

3.3.1 Kanat Sayısının Etkisi

“Bir dizayn mühendisinin göz önüne alması gereken ilk parametre kanat sayısıdır. Rüzgar makinaları sayıları 2 ile 40 arasında değişebilecek şekilde kanat içerecek şekilde dizayn edilebilirler.

Pervane sayısının çok olduğu durumlar düşük uç hız oranlı rotorlar için kullanılırlar. Bu durum yüksek kalkma momentinin gerektiği su pompalanması gibi uygulamalar için geçerlidir.”^[1]

^[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

Modern ve yüksek uç hız oranlı rotorlar elektrik enerjisi üretmek maksatlı olup 2 veya 3 kanata sahiptirler.

“Kanat sayısını kararlaştırırken dikkat edilecek ana faktörler aşağıda sıralanmıştır.”

[1]

- Güç Katsayısı Üzerine Etkisi
- Uç hız oranı: Bu oran pervane dönüş hızının rüzgar hızına oranı olarak tanımlanır. Eğer 1 ise, bu değer pervanenin dönüş hızının rüzgar hızına eşit olduğu anlamına gelir.
- Maliyet

3.3.2 Pervane Kanat Sayısına Göre Türbin Çeşitleri

Daha önceleri, tek kanatlı ve 2 kanatlı rüzgar türbinleri kullanılmaya karşın, günümüzde yaygın kullanım 3 kanatlı rüzgar türbinleridir.

3.3.2.1 3-Kanatlı Rüzgar Türbinleri

2 kanatlı yapıya göre, bu tip rüzgar türbinlerinin daha düzgün bir çıkış gücüne sahiptirler.

3 kanatlı rüzgar türbinleri Avrupa’da daha yaygın olmakla birlikte, yaklaşık 1MW lık büyük makinelerin geliştirilmesinde 3 kanatlı türbinler 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.

3.3.2.2 2-Kanatlı Rüzgar Türbinleri

“2 kanatlı rüzgar türbinlerinin bir kanat eksik olmasından dolayı maliyet ve ağırlık gibi avantajları olmasına karşın, bu tip dizaynların markette karşılaştıkları

bazı zorluklar vardır. Çünkü bunların aynı çıkış gücünü verebilmeleri için daha büyük döndürme hızına ihtiyaçları vardır. Bu durumda gürültü kirliliği açısından büyük bir dezavantajdır. Son zamanlarda büyük 2 kanatlı dizayn üreticileri de 3 kanatlı üretimine geçiş yapmışlardır.”^[1]

“2 kanatlı rüzgar türbinlerinde dönmeden meydana gelen ve kulenin yatay eksenine göre olan bir atalet momentine sahiptirler. Bu durum rüzgar türbinleri üzerinde ek bir yüklenme meydana getirir ve sadece sallanan göbek ile giderilebilir (teeterin hub). Sallanan göbek kullanılmasının nedeni, dönen pervane üzerinde büyük atalet moment değişimlerinin etkilerini önlemektir.

Sallanan göbek gereksiniminden ötürü 2 kanatlı türbinler daha kompleks bir dizayna ihtiyaç duyarlar. Bu dizayn öyle olmalıdır ki, sallanan göbek ihtiva etmelidir. Bu sayede, rotor, rotor kanatları kuleyi geçtiği zaman şiddetli şoklardan korunabilmek için eğilebilme özelliğine sahiptir.”^[1]

3.3.2.3 Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri

“Tek kanatlı rüzgar türbinlerinin avantajı bu türbinlerin bir tane daha fazla kanattan tasarruf etmeleridir. Bu tip türbinler pek fazla kullanılmamaktadırlar çünkü 2 kanatlı türbinler için bahsedilen problemler bunlar için de daha şiddetli olarak etkili olmaktadır.”^[1]

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

“Yüksek hız gereksiniminden ötürü doğan gürültü problemlerine ek olarak, rotoru dengelemek için ters yönde ağırlık takviyesine gereksinim duyulur. Bu durumda açıkça maliyet avantajını yok edici bir etkidir.”^[1]

3.3.3 Kanat Yapımında Kullanılan Malzeme Çeşitleri

Rotor kanatlarının pek çoğunda malzeme olarak cam lifli güçlendirilmiş plastik (GRP) kullanılır.

Karbon liflerini malzeme olarak kullanmak başka bir olasılık olmasına karşın, bu tip malzemeden yapılmış kanatlar pek ekonomik değildir.

Ahşap veya ahşap içeren malzemelerden yapılmış rotor kanatları henüz markete girmemiş olmasına karşın bunlar üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Çelik veya alüminyum bileşimleri ise ağırlık ve metal yorgunluğu gibi problemlere sahip oldukları için sadece küçük güçlü türbinlerde kullanılırlar.

3.3.4 Rotor Yerleşimi

Rotorun diğerin tepesine yerleştirilmesi durumunda (rüzgarı karşılayacak şekilde “upside wind) direğin gölgesi kanatlar üzerinde etkili olmayacağı için daha yüksek güç elde edilebilir. Bu durum aynı zaman da daha düşük gürültü, daha az kanat yorgunluğu ve daha düzgün güç üretilmesi gibi avantajlar sağlar.

Bu durumun dezavantajı ise rotorun daha fazla esnek olmayan olarak yapılmış olması ve kuleden belli bir mesafede monte edilmek zorunda olmasıdır. Buna ilave olarak rüzgarı karşılayabilecek makine rotoru rüzgarı karşılayacak konumda tutabilmek için yaw (yönerge) mekanizmasına ihtiyaç duyar.

Rotorun kulenin rüzgar almayan yerine yerleştirilmesi ise bedava yaw (yönerge) sisteminin kullanılmasını sağlar. Yaw (yönerge) sistemi rotoru rüzgar yönünde döndüren bir sistemdir.

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press, New York.

Daha önemli bir avantajı ise rotorun daha esnek bir yapıda yapılabilmesidir. Bu makinanın ağırlığı ve yapısal dinamikleri açısından önemli bir avantajdır. Kanatlar daha yüksek hızlarda eğilebilip yükün bir kısmını kuleden alacaklardır. Bu sebepten bu tip makinalar rüzgarı karşılayan makinalara göre daha hafif bir yapıya sahip olabilecek şekilde üretilebilirler.

Bu tip makinaların en önemli dezavantajı ise rotor kulenin rüzgar gölgesi boyunca döndüğü zaman rüzgar gücünde daha fazla sallanımlar olmasıdır. Bu da türbin üzerinde daha fazla yorulma yüklerine sebep olacaktır.

3.3.5 Yatay Aks Ve Dikey Aks

“Rüzgar türbinlerinin büyük bir çoğunluğu yatay eksenlidirler. Bu tip makinaların rotorları, maksimum enerjiyi tutabilmek için rüzgar akışına dik olarak durmalıdırlar. Rüzgarı önden alan sistemlerde klavuz kuyruk vasıtasıyla, rotor rüzgara karşı yönlendirilir. Kanatlardaki kaldırma kuvvetleri rotorun dönmesini sağlarlar. Yatay eksenli rotorların kanatlarındaki L/D oranı, verim açısından büyük bir önem taşır. Bu oranın yüksek olması istenir ve bu da kaldırma kuvvetinin büyük, sürüklenme kuvvetinin ise küçük olmasıyla mümkündür.

Buna karşın, dikey eksen Darriesus makinaları bazı avantajlara sahiptirler. İlk olarak dikey eksenli makinalar yaw mekanizmasına ihtiyaç duymazlar. İkinci olarak, dikey şaft makine aksamının toprak seviyesine montajına olanak sağlar.”^[1]

En büyük dezavantaj olarak da şunu söylemek mümkündür: Bu tip makinalar yaygın olarak kullanılmazlar çünkü çıkış gücünün kanatlarla oynayarak değiştirilmesi mümkün değildir. Buna karşın, modern, düşük maliyetli, değişken hızlı

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press, New York.

güç elektroniği cihazlarının yaygınlaşmasıyla birlikte, Darrieus konfigürasyonu özellikle büyük kapasiteli uygulamalar için yaygın olarak kullanılacaktır.

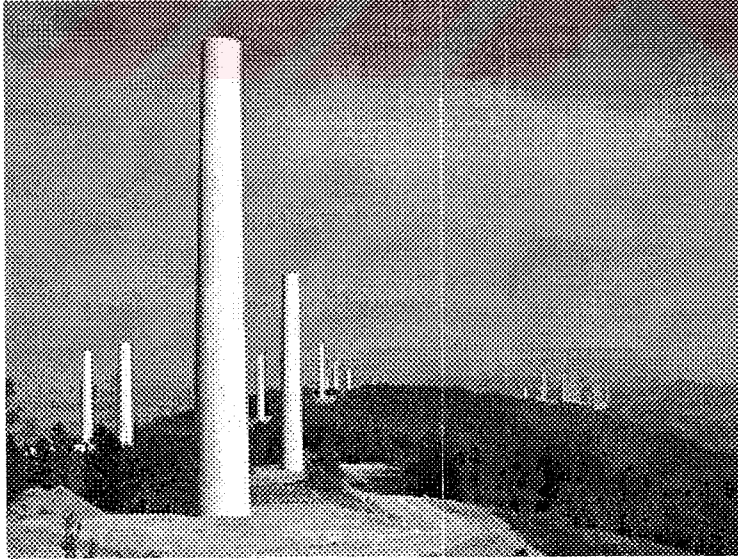
3.3.6 Rüzgar Türbini Kuleleri

Rüzgar kuleleri türbini destekleyip, generatör, yaw (yönerge) mekanizması ve kontrol aygıtlarını içerirler.

Kuleler eskiden 20 ile 50 m arasında değişmekteydi. Orta ve büyük ebatlı türbinler için, kule rotor çağından biraz daha uzundur. Küçük türbinler genellikle birkaç rotor çapı yüksekliğinde kulelere monte edilirler. Aksi takdirde, yüzey seviyesindeki az rüzgar hızı bunları kötü yönde etkiler.

Hem çelik hem beton kuleler kullanılmaktadır.

Buradaki esas problem yapısal dinamiklerdir. Kule vibrasyonu ve meydana gelen yorulma devirleri dizayn ile önlenabilir. Bu kulenin rezonans frekansına girmesini engellemek için önem teşkil eder.



Şekil 3.4 : Rüzgar türbini kuleleri

“Bir kulenin yaklaşık fiyatı türbinin toplam fiyatının yaklaşık %20 si kadardır. Yaklaşık 50 m lik bir kule için 10 m lik ilave fiyat 15,000\$ civarındadır.

Kafes yapılı kuleler maliyet açısından en ucuzudur çünkü bunlar tüp yapıllara göre yaklaşık %50 daha az malzeme kullanımını gerektirirler.

Rüzgar hızının yükseldikçe arttığı arazilerde yüksek kuleler önemli bir avantaj teşkil ederler.

Kule seçilirken göz önüne alınması gereken bazı faktörler vardır bunlar;

- Her metre için kule maliyeti (10 m ekstra kule yaklaşık 15,000\$ mal olur).
- Yüzey seviyesinden yükseldikçe rüzgar ne kadar değişir.
- Turbin sahibinin ilave elektrik için alacağı fiyat

Bu faktörler kule seçiminde göz önüne alınmalıdır.

Yaygın olarak kullanılan 2 tip kule vardır.

- Tüp Yapılı
- Kafes Yapılı^[1]

3.3.6.1 Tüp Yapılı Kuleler

Pek çok türbin tüp şeklindeki kulelerle teslim edilirler. Tüpler genellikle 20 ve 30 m lik olarak üretilirler. Kulelerin çapı temele doğru artmaktadır. Bunun amacı dayanırlığı arttırırken maliyetli azaltmaktır.

3.3.6.2 Kafes Yapılı Kuleler

Bu tip kuleler çelik profillerin montajıyla elde edilirler. Bunların en önemli avantajı maliyetin azalmış olmasıdır. Çünkü bu kuleler tüp yapılı bir kuleye göre yaklaşık %50 daha az malzeme içerirler.

Bu kulelerin en önemli dezavantajı ise estetik görünüşleridir. Estetik açıdan diğerlerine göre bozuk oldukları için hemen hemen kullanımdan kalkmışlardır.

[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press, New York.

3.3.7 Kulelerin Yerleştirilmesi

“Bir araziye makinaları monte ederken optimum gücü elde edebilmek için rüzgar kuleleri arasında uygun mesafeyi bırakmak gerekir.

Kulelerin yerleşimi, araziye, rüzgar yönüne, rüzgar hızına, ve türbin ebadına bağlı olarak değişiklik gösterir. Optimum yerleştirme yatay eksen boyunda rüzgar yönünde 8 ve 12 rotor çapı , rüzgara karşı yönde ise 1.5 ile 3 rotor çapı arasındadır. 20 kule içeren ve her biri 500 kW lık bir rüzgar santrali yaklaşık 1 ve 2 km² bir araziye ihtiyaç duyar.

Bir arazi seçilirken, türbin sayısına ve büyüklüklerine, gerekli gücü elde edebilmek için gerekli alanı kararlaştırabilmek için optimizasyon çalışması daha başlangıç aşamasında yapılmalıdır. Bu tip bir çalışma yapılırken aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır:

- Büyük türbinler her MW için daha az maliyetli olup, daha küçük arazi işgal ederler.
- Az sayıda makinalar yıllık elde edilebilecek enerji miktarını (MWh) azaltır. Çünkü herhangi bir makine arıza yaptığı zaman bunun sistem üzerindeki etkisi daha büyük olur
- Az sayıda makine kullanıldığı zaman rüzgar gücü sallanışları elektriksel geçici olaylar, gücün filtrelenmesi ve voltaj sallanışlarının önlenmesi, gücün kalitesini arttırabilmek için alınan önlemler açısından maliyeti arttırırlar.”^[1]

3.4 Rüzgar Türbinlerinin Güç Kontrolü

“Rüzgar türbinleri elektrik enerjisini en ucuza mal edebilecek şekilde dizayn edilmişlerdir. Bu sebepten dolayı rüzgar türbinleri yaklaşık 15 m/s rüzgar hızında maksimum çıkış verilebilecek şekilde tasarlanırlar. Daha yüksek hızlarda maksimum

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

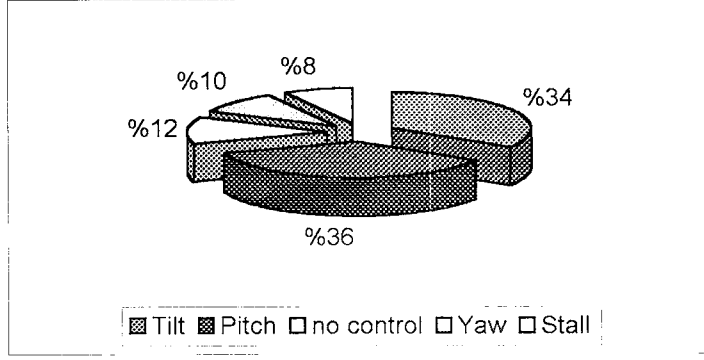
çıkış üretebilecek şekilde rüzgar türbinlerini dizayn etmek mantıklı değildir çünkü daha yüksek hızlardaki rüzgarlar pek sık meydana gelmezler. Eğer daha kuvvetli rüzgarlar meydana gelirse rüzgar türbinlerine zarar vermesini önlemek maksadıyla aşırı rüzgarın bir kısmından mahrum olmak gerekmektedir. Bu sebepten dolayı hemen hemen tüm rüzgar türbinleri güç kontrolü içerirler.

Son 25 yılı içinde rüzgar türbinlerinin teknolojisi oldukça değişmiştir. Bugün kullanılan büyük rüzgar türbinleri pitch (değiştirme) veya güç elektronik sistemlerini kullanarak değişken hızla çalışabilecek şekilde dizayn edilirler. Buna karşın, küçük türbinler ise basit ve düşük maliyetli güç ve hız kontrol sistemlerini kullanırlar. Hız kontrolü aşağıdaki şekilde olabilir:

- Hız kontrolü yapılmaz. Bu metodla, türbin, genaratör ve tüm sistem aşırı hıza dayanabilecek şekilde dizayn edilir.
- Yaw (yönerge) kontrol: Bu metotla, rüzgar hızı dizayn sınırlarını aştığı zaman, rotor aksi rüzgar yönünden ayrılır.
- Pitch (değiştirme) kontrol: Rotor hızını düzenlemek için değişen rüzgar hızıyla birlikte pervanelerin yönü değiştirilir.
- Stall (durdurma) Kontrol: Bu çeşit hız kontrolünde, rüzgar hızı sistemdeki güvenlik limitini aştığı zaman, kanatlar durdurulur. Ani rüzgar sona erdikten sonra türbin yeniden faaliyete geçirilir.

Şekil 3.5 kullanılan kontrol metotlarını göstermektedir. Büyük makinalar genellikle hız kontrolü için güç elektroniğini kullanırlar.”^[1]

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.



Şekil 3.5: Küçük ve orta ölçekli türbinlerde kullanılan hız kontrol metodları.

Aşağıda bu kontrol metotları detaylı olarak anlatılmıştır.

3.4.1 Yaw (Yönerge) Control

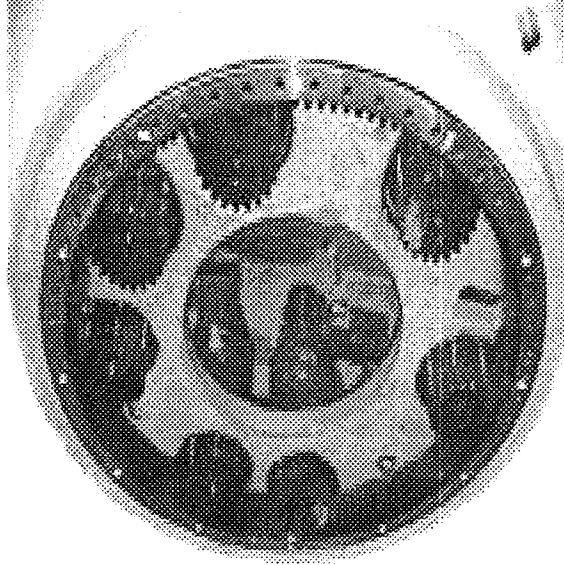
Yaw (yönerge) mekanizması rüzgar türbini rotorunu rüzgarın karşısına çevirmek için kullanılır.

Eğer rotor rüzgara dik değilse, rüzgar türbini için yaw (yönerge) hatasına sahip olduğu söylenebilir. Yaw (yönerge) hatasının anlamı şudur: Rüzgar enerjisinin düşük bir kısmı rotor boyunca kullanılmaktadır.

Eğer bu olabilecek tek şey ise yaw (yönerge) kontrolünün mükemmel bir kontrol şekli olduğu söylenebilir. Rüzgar kaynağına en yakın olan rotor kısmı rotorun diğer kısımlarına göre daha büyük bir kuvvete maruz kalacaktır.

Bu sebepten ötürü rotor türbin çeşidine bağlı olmaksızın sağa sola sapma eğilimine girecektir. Bunun anlamı kanatların rotorun her dönüşü için ileri ve geri eğilmesidir. Bu sebepten ötürü yaw(yönerge) hatasıyla çalışan rotorlar rüzgara dik konumda çalışan rotorlara göre daha fazla yorulma yüklerine maruz kalırlar.

3.4.1.1 Yaw (Yönerge) Mekanizması



Şekil 3.6 : Yaw (yönerge) mekanizması

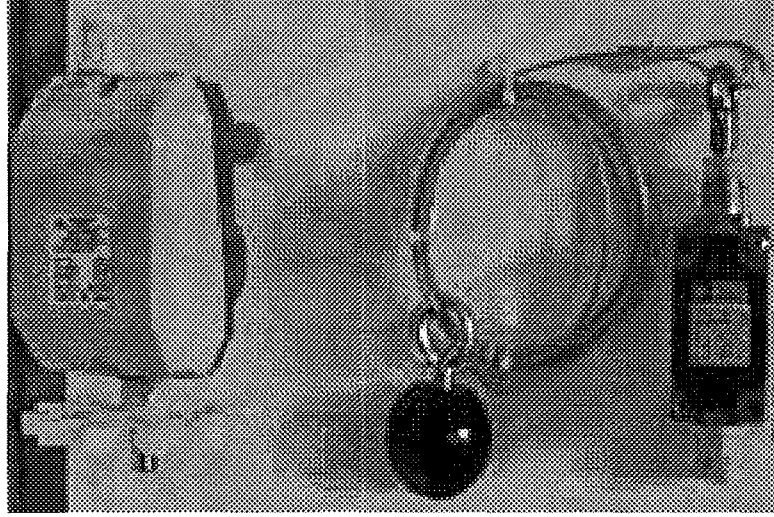
Yukarıdaki Şekil 3.6 750 kW lık bir makine için yaw (yönerge) mekanizmasının alttan görünüşünü göstermektedir. Bu resimde yaw (yönerge) motorlarının tekerleklerini ve frenlerini görmekteyiz. Hemen hemen tüm rüzgar yönündeki makinaların üreticileri gerektiği zaman yaw(yönerge) mekanizmasını devre dışı bırakabilmek için yaw (yönerge) frenleri üretirler.

3.4.1.2 Kablo Dönme Sayıcısı

“Kablolar rüzgar türbini generatöründen akımı kule boyunca taşırlar. Eğer türbin uzun bir zaman için sağa sola dönerse bu durumda kablolar birbirlerine karışırlar. Bu sebepten görevliye kabloların birbirine karıştığını ve düzeltilmesi gerektiğini söyleyen sayıcı bulunur.

Diğer güvenlik ekipmanları gibi bu durum için de yedek kurtarma sistemi bulunmaktadır. Bu sistem, acil durumlarda “kabloların birbirlerine çok karıştığı durumlarda” türbinin pull (çekme) anahtarı yardımıyla devreden çıkarılması sistemidir.”^[1]

^[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC



Şekil 3.7: Kablo sayıcısı

3.4.2 Stall (Durdurma) Kontrol

“Stall (durdurma) kontrol (pasif kontrol) rüzgar hızı üzerinde kuvvet gösteren pasif bir kontrol sistemidir. Pervane kanatları pitch (değiştirme) açısında sabitleşmiştir ve yatay ekseninde dönme yapamazlar.

Rüzgar türbinleri pitch (değiştirme) açısında sabit rotasyon hızında döndüğünü varsayalım. Rüzgar hızı arttıkça, uç hız oranı azalacaktır ve hücum açısı da artacaktır. Hücum açısı artıp stall (durdurma) açısına geldiğinde stall (durdurma) olayı meydana gelecektir. Bu durum kaldırma kuvvetini düşürürken, sürüklenme kuvvetinde bir artış meydana getirecektir. Stall (durdurma) olayı kanatlarda bütün radyal pozisyonlarda aynı zamanda meydana gelir ve pervane gücünü azaltır. Kanatlar, yatay bir dönüş hareketi yaparak yumuşak bir stall (durdurma) gelişimi meydana getirirler.

Stall kontrollü rüzgar türbinleri, pitch kontrollü türbinlere göre daha basit yapıdadır. Bu mekanizmanın faydaları şu şekildedir:

- Basit bir pervane ve kanat yapısına sahip olması
- Daha az bakım gerektirmesi
- Güç kontrolünde yüksek verimlilik sağlaması

Son yıllarda stall (durdurma) ile pitch (değiştirme) kontrol sistemlerinin karışımı olan aktif stall (durdurma) sistemi geliştirilmiştir. 1 MW ve üstündeki türbinlerde bu sistem tercih edilmektedir. Teknik olarak bu sistem pitch (değiştirme) kontrollü sistemlere benzerlik göstermektedir. Çünkü bu sistemde de döndürülebilir kanatlar bulunur. Düşük hızlarda yüksek moment (döndürme kuvveti) elde edebilmek için makine kanatları düşük hızlarda döndürebilecek şekilde programlanmıştır.”^[1]

Makine anma gücüne eriştiği zaman ise burada pitch (değiştirme) kontrole göre farklı bir sistem devreye girer. Eğer generatör aşırı yüklenmek üzereyse, pitch (değiştirme) kontrollünün aksine kanatlar rüzgara göre ters yönde döndürülecektir. Başla bir anlatımla, rotor kanatlarının hücum açısı artacak ve kanatlar daha derin bir stall (durdurma) açısı oluşturacaklardır. Böylece aşırı enerji rüzgarda tüketilecektir.

“Aktif stall (durdurma) sisteminin avantajları şunlardır:

- Pasif stall (durdurma) sistemine göre çıkış gücü daha yüksek bir doğrulukla kontrol edilebilir.
- Hemen hemen tüm rüzgar hızları için sistem anma gücünde çalışır.
- Rotor kanatları daha derin stall açıları oluşturduğu zaman, yüksek rüzgar hızlarında pasif stall kontrollü sistemlerde çıkış gücünde azalma meydana gelecektir.”^[1]

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

3.4.3 Pitch (Değiştirme) Kontrol

“Pitch (değiştirme) kontrol (aktif kontrol), generatörden girdi işareti bekleyen aktif bir sistemdir. Pitch (değiştirme) kontrolü rüzgar türbinlerinde bulunan elektronik aksama bağlı hız kontrol sistemi sayesinde çıkış gücünü saniyede birkaç kez kontrol eder. Güç çıkışı normalden çok yüksekse, hız kontrol sistem, sayesinde pervane pitch (değiştirme) mekanizmasına sinyal gönderilerek durum bildirilir. Gelen bu sinyalden sonra, pervane kanatları da yönünü rüzgarın estiği yönden hafifçe çevirerek güç kontrolü yapar. Ters durumda da yani, rüzgar hızı azaldığı zaman aynı hız kontrol ve sinyal gönderme işlemi meydana gelir ve pervane bu kez rüzgarın estiği yöne doğru eğilir. Bu sistemin avantajları şunlardır:

- Bütün rüzgarlı durumlarda aktif güç kontrol olanağı sağlanır
- Daha yüksek enerji üretimi
- Aşırı rüzgarlarda pervane kanatlarına düşen yükleme için pozisyon değişimine olanak sağlanması
- Kanatların hafif olmasından dolayı daha hafif bir yapıya sahip olması.

Tüm bu avantajlarına karşın bu sistemlerde pervanenin acil durumlarda durabilmesi için güçlü fren sistemi gerekmektedir.”^[1]

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press, New York.

4. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ELEKTRİK SİSTEMİ

“Elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan rüzgar türbinleri, daha önceden de açıklandığı gibi, bir, iki veya üç kanadı olan ve yüksek hızda çalışan makinalardır.

Yüksek hızda çalışmalarının nedenleri şu şekilde açıklanabilir:

- Eşit çaptaki yüksek hızlı bir rüzgar türbini düşük hızlı bir rüzgar türbininden daha hafif dolayısı ile de daha ekonomiktir.
- Dönme hızları yüksek olduğu için gerekli çevrim oranı daha düşüktür. Bu nedenle dişli kutusu daha hafiftir.
- Elektrik generatörlerinin çalışmaya geçmesi için gerekli başlangıç torku küçüktür.

Hızlı bir rüzgar pervanesinin başlatma torku çok küçük de olsa, generatörü kolaylıkla harekete geçirir. Dolayısı ile yüksek hızlı rüzgar türbinleri bu kullanım için son derece uygundur.

Türbin kanatları sabit veya değişken açılı olurlar. Bazı tasarımlarda pervane frenlendiğinde açığı arttıran özel bir regülatör kullanılır.

Sabit açılı kanat yüksek hızlı rüzgar makinalarında, generatör başlama esnasında motor gibi davranır ve dönme hızı nominal hıza ulaştığında generatöre dönüşür. “[1]

“Regülatör sistemleri olmayan rüzgar pervaneleri de vardır. Bu tip rüzgar pervanelerinin çalışmaya başlaması özellikle makinanın uç hız oranı (tip speed ratio) yüksek ise daha da zordur. Bu gibi makinalarda burulmuş kanatlar tercih edilmelidir.

Genellikle rüzgar, pervaneyi bir dişli kutusu üzerinden hareket ettirerek elektrik genarötörünü sürer. Dişli teknolojisinde ortaya çıkan gelişmeler ve düşük hızlı

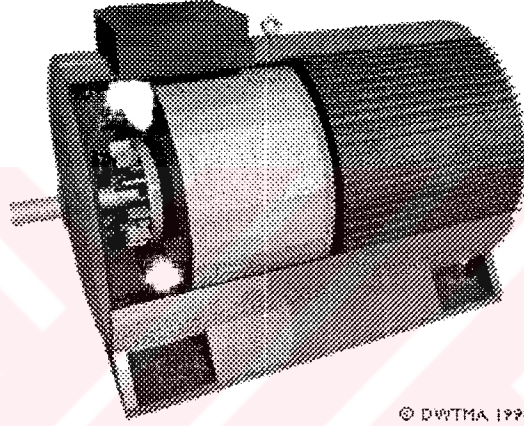
[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

elektrik genarötörlerinin maliyetinin yüksek olması. küçük sistemler dışında pervanenin genaratör tarafından doğrudan sürülmemesi eğilimine yol açmaktadır.

Rüzgar türbinin pervanesi kuleye rüzgarı önden (upwind) veya arkadan (downwind) alan yönde yerleştirilebildiğini daha önce açıklamıştık.

Birinci durumda kalkış etkisinden kaçınılır, ikinci durumun avantajı ise başlangıç torku düşük olduğu için yön bulma motorunun gücünün azalmasıdır.”^[1]

4.1 Elektrik Genaratörleri



Şekil 4.1: Elektrik Genaratörleri

Rüzgar türbini genaratörleri mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirirler.

Rüzgar türbini genaratörleri diğer tip genaratörlere göre biraz farklıdır. Bunun ilk sebebi, genaratörün salınımlı güç üreten rüzgar türbini rotoruyla birlikte çalışmasıdır.

100 veya 150 kW üstündeki büyük rüzgar türbinlerinde üretilen gerilim üç fazlı alternatif olup, genellikle 690 V değerindedir. Daha sonra akım rüzgar türbininin yanına ve kulenin içine monte edilmiş transformatöre yollanır. Ve mahalli şebekeye bağlı olarak bu transformatör yardımıyla voltaj 10,000 V veya 30,000 V arasında bir değere yükseltilir. Büyük üreticiler hem 50 Hz hem de 60 Hz şebekeler (Amerika için) türbinler üretebilmektedirler.

Rüzgar türbinleri ya senkron veya asenkron generatörle çalışabilecek şekilde dizayn edilirler. Bu yapılırken genaratör şebekeye direk veya endirek olarak bağlanabilir. Direk bağlanması demek; Genaratör elektrik şebekesine arada hiçbir aracı olmadan bağlanır. Endirek bağlanması demek ise; Türbinden akan akımın akımı şebekeyle uyarlayacak olan elektrik cihazları boyunca akıp şebekeye ulaşmasıdır.

Aşağıda belirtilen üç tip generatör rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar:

- Doğru Akım Generatörleri
- Senkron Generatörler
- Asenkron Generatörler

Küçük güç sistemlerinde eskiden daha fazla kullanılan doğru akım generatörleri şimdi senkron veya asenkron generatörlerle değiştirilmektedirler. Bu generatörler, çok pahalı olmayan doğrultmaçlar yardımıyla kolayca doğru akıma dönüştürülebilen alternatif akım üretirler.

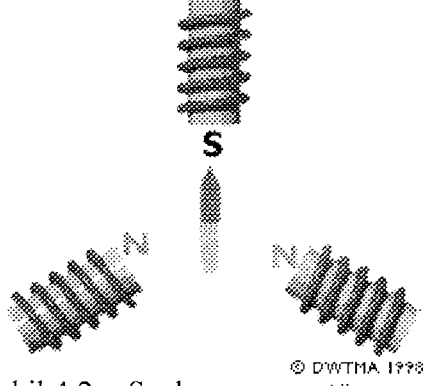
“Günümüzde kullanılan doğru akım makinaları ise kalıcı magnetler içerirler. Rotor kalıcı magnetik kutuplar içerir ve statör de alternatif akım üretir. Alternatif akım daha sonra doğrultucular yardımıyla doğrultulur. Bu tip makinalar komutatör ve fırçalar kullanmazlar böylece makinaların güvenilirliği arttırılmış olur.

Kalıcı magnetli DC makinalar küçük türbinlerle kullanılırlar. Bunun sebebi magnet kapasitesindeki sınırlamalardır. Fırçasız DC makinalarının 100 kW altında anma gücünde üretilebildiği bilinmelidir.”^[1]

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

4.1.1 Senkron Generatörler

Dünya üzerinde tüketilen elektrik enerjisinin büyük çoğunluğu senkron generatörler yardımıyla üretilir.



Şekil 4.2. : Senkron generatör

Bunlara senkron generatör denmesinin sebebi ortadaki magnetin (Şekil 4.2.1) magnetik alanın dönüşü ile senkronize olup sabit hızla dönmesidir.

Bu tip makinalar sabit frekansa bağlı olarak sabit hızda çalışırlar. Bu sebepten ötürü rüzgar santrallerinde değişken hızlı işletimler için pek uygun değildirler. Buna ilaveten, senkron makine rotor alanını uyarabilmek için doğru akıma gereksinim duyar. Bu da karbon fırçalarına ihtiyaç duyulması demektir. Doğru akım ve fırça gereksinimi reluktans motorunun kullanımı ile elimine edilebilir ve böylece güvenilirlik de arttırılırken maliyet de azaltılır. Fakat bu tip makinalar sadece onlu kW lı güçlere sahiptirler.

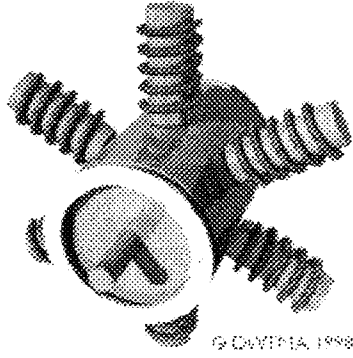
Senkron makinaların sabit hızlı örnek olarak solar güç santrallerinde kullanılması daha doğrudur.

İndüksiyon makinalarının aksine, senkron makinalar elektrik şebekelerinde kullanıldığı zaman bazı avantajlara sahiptirler.

- Şebekeden reaktif güç ihtiyacı duymazlar. Bu daha kaliteli güç sağlanmasını sağlar. Bu avantajın önemi, rüzgar santrali küçük kapasiteli bir şebekeye uzun ve düşük gerilimli hatlarla bağlandığı zaman daha da ön plana çıkar.

4.1.2 Asenkron (Endüksiyon) Generatörleri

Yeryüzündeki rüzgar türbinlerinin çoğunluğu alternatif akım üretebilmek için 3 fazlı asenkron ya da bilinen adıyla indüksiyon generatörleri kullanırlar.



Şekil 4.3: İndüksiyon Generatörleri

Bu tip generatörler, rüzgar teknolojisi dışında pek kullanılmazlar. Bu tip generatörlerle ilgili ilginç olan nokta bunların elektrik motoru olarak dizayn edilmeleridir. Dünya elektrik enerjisi tüketiminin yaklaşık 1/3'ü fabrikalarda, pompa istasyonlarında, asansörlerde ve kompresörlerde elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirmek maksadıyla indüksiyon makinalarının işletiminde kullanılır.

Bu tip generatörleri seçmenin sebebi bunların oldukça güvenli ve maliyet bakımından uygun olmalarıdır.

4.1.2.1 Kafes Yapılı Rotorlar

“Asenkron generatörleri senkron generatörlerden farklı kılan rotordur. Rotor elektriksel olarak birbirine bağlanmış alüminyum veya bakır barlar içerir. Şekil 4.2.2 de de görüldüğü üzere rotor statorun orta kısmına yerleştirilmiştir. Ve statorda 3 fazlı olarak elektrik şebekesine bağlanır.

Bu tip makinaların çalışma prensibi dönen magnetik alan üretilmesidir. Bu dönen magnetik alanın hızına senkron hız adı verilir.

$$N_s = 60 \cdot f / p$$

(Denklem 4.1)

f = stator uyarma frekansı

P = magnetik kutup çiftlerinin sayısı

Senkron hızla dönen stator magnetik alanı 4.1 numaralı eşitlikle belirlenir.

Endüklenen gerilim Faraday elektromagnetik indüksiyon kanununa göre:

$$e = -d\Phi/dt$$

Bu gerilim rotordaki sirkülasyon akımını üretir. Rotor akımının ve stator akısının elektromagnetik kesişimi momenti üretir. Bu momentin genliği aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$T = K\Phi I_2 \cos\Phi_2 \quad (\text{Denklem 4.2})$$

Denklem 4.2 de

K = sabit

Φ = stator akısı

I_2 = rotor barlarında indüklenen akım

Φ_2 = rotor akımı ile gerilimi arasındaki faz açısı

Rotor bu momentin etkisi altında ivmeleneyecektir.

Eğer rotor sürtünmesiz bir ortamda ve hiçbir mekanik yüke bağlı değilse, rotor sıfır dirençle döner. Bu koşullar altında, rotor, statörle aynı hıza, senkron hıza ulaşacaktır. Bu hızda, rotor hızında indüklenen akım sıfır değerine sahiptir ve hiçbir moment değerine sahip değildir.

Eğer rotor bir mekanik yüke bağlanırsa, rotor yavaşlayacaktır. Sabit ve senkron hızla dönen stator akısı rotor hızına uygun hıza sahip olacaktır. Sonuç olarak, elektromagnetik olarak endüklenmiş gerilim, akım ve moment rotorda oluşturulur. Oluşturulan moment yükü aynı hızda sürmek için gerekli momente eşit olmalıdır. Eğer rotoru bir rüzgar türbinine bağlarsak ve senkron hızdan daha hızlı sürersek, endüklenen akım ve moment yön değiştirirler. Bu durumda makine, stator çıkışlarına bağlanmış yük için türbinin mekanik enerjisini elektrik enerjisine çeviren

bir generatör gibi çalışır. Eğer makine şebekeye bağlı ise, gerekli gücü şebekeye sağlayacaktır.”^[1]

Bu sebepten ötürü, indüksiyon makinaları sadece senkron hızın üstündeki hızlarda generatör gibi çalışırlar.

İndüksiyon makinaları stator ve rotor arasında hiçbir elektriksel bağlantıya ihtiyaç duymazlar. Bunların işletimi tamamen elektromagnetik indüksiyona dayanır. Elektriksel kontakların olmaması, ve bunların yapımındaki kolaylık bunları dayanıklı, güvenilir ve düşük maliyetli makinalar yapar.

Bu tip makinaların çalışma prensibi bir trafonun çalışma prensibiyle benzerlikler gösterir.

4.1.2.2 Endüksiyon Makinalarının Verimi Ve Soğutması

“Endüksiyon makinalarının iç dirençleri R_1 (Stator direnci) , R_2 (Rotor Direnci) stator ve rotordaki kayıpları temsil ederler.

Bu sebepten, R_1 ve R_2 birim olarak temsil edilerek, makinanın verimi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\eta = 1 - 2 \cdot (R_1 + R_2) \quad (\text{Denklem 4.3})$$

4.3 de direnç değerleri Per unite değerlerdir.

Örnek olarak, R_1 ve R_2 %2 değeri için, R_1 ve $R_2 = 0,02$ birim.

$$\text{Verim} = 1 - 2 \cdot (0,02 + 0,02) = 0,92 \text{ , veya } \%92.$$

Makinadaki kayıplar yeterli soğutma sağlanarak dışarı atılabilir. Küçük makinalar genellikle hava soğutmalıdır. Nakel içine yerleştirilmiş generatörleri hava ile soğutmak oldukça zordur. Su soğutması, hava ile soğutmadan daha etkili olarak, üç şekilde avantajlı olabilir:

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

- Aynı güçteki makinalar için su soğutmalı olan hava soğutmalıya göre daha hafiftir.
- Su soğutma ses ve vibrasyonları azaltır.
- Bakım gereksinimini de azaltır bu özellikle uzun kulelerin üzerine yerleştirilmiş makinalar da avantajlıdır.”^[1]

4.1.2.3 Uyarma Kapasitesi

Generatör olarak endüksiyon makinalarının bir dezavantajı uyarılma için reaktif güce ihtiyaç duymalarıdır. Uyarma gücü generatör terminallerine bağlanmış harici bir kapasite ile sağlanabilir. Generatörün şebekeye bağlanması durumunda, reaktif güç, şebekenin diğer ucuna bağlanmış senkron generatörler yardımıyla sağlanır.

Şebekenin reaktif güç kapasitesi yeterli olmadığı zaman, gerekli reaktif gücün bir kısmını sağlamak için lokal kapasiteler kullanılabilir.

4.2 Elektronik Kontrol Cihazı

Rüzgar türbini kontrol cihazı, rüzgar türbininin durumunu sürekli olarak kontrol edip, bilgiler toplayan, bilgisayarlar içerir. Adından anlaşılacağı üzere bu cihaz aynı zamanda anahtarlar, valfler ve motorlarda içerir.

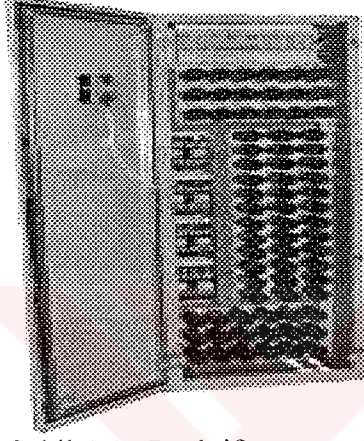
Modern rüzgar türbinlerinde 100 ile 500 arasındaki parametre ayarlanıp kontrol edilebilir. Kontrol cihazı rotor ve generatörün dönüş hızını, gerilim ve akım değerlerini kontrol eder. Buna ilave olarak, generatör sargılarının sıcaklığı, rotor kanatlarının pitch (değiştirme) açısı, hidrolik basınç, yaw (yönerge) açısı, güç kablolarının birbirine dolaşp dolaşmadığı, rüzgar hızı, nakeldeki salınışların frekansı ve büyüklüğü vb de kontrol edilip ayarlanabilir.

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

4.2.1 Güç Kalitesinin Kontrolü

Pek çok kişi kontrol aygını, türbini çalıştıran onu rüzgar yönüne sokan, alarm durumunda devreden çıkaran bir sistem olarak düşünmesine karşın, kontrol cihazının ilave fonksiyonları da vardır. Bunlardan en önemlisi de rüzgar türbini tarafından üretilen akımı da kontrol etmesidir.

4.2.1.1 Reaktif Güç Kontrolü



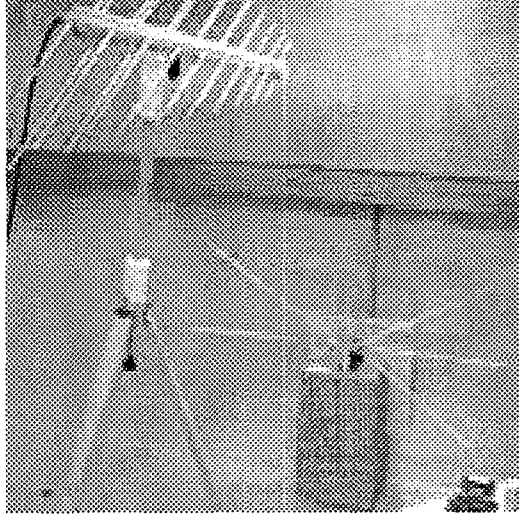
Şekil 4.4 : Reaktif gücü ayarlayan kapasite bankası

Gerilim ve akım her alternatif çevrim için 128 defa ölçülür (50x128 her s için veya 60x128 her s için). Bu amaçla DSP prosesör şebeke frekansı ve türbinin aktif ve reaktif gücünün kararlılığını hesap eder. (Reaktif güç kısmı gerilim ve akımın aynı fazda olup olmadığının sorusudur).

Uygun güç kalitesini sağlamak için, kontrol cihazı reaktif gücü ayarlayan bir dizi kapasiteyi devreye sokar veya devreden çıkarır.

Yukarıdaki şekil 4.4 de bu kapasite bankası görülmektedir.

4.3 Elektromagnetik Uyumluluk



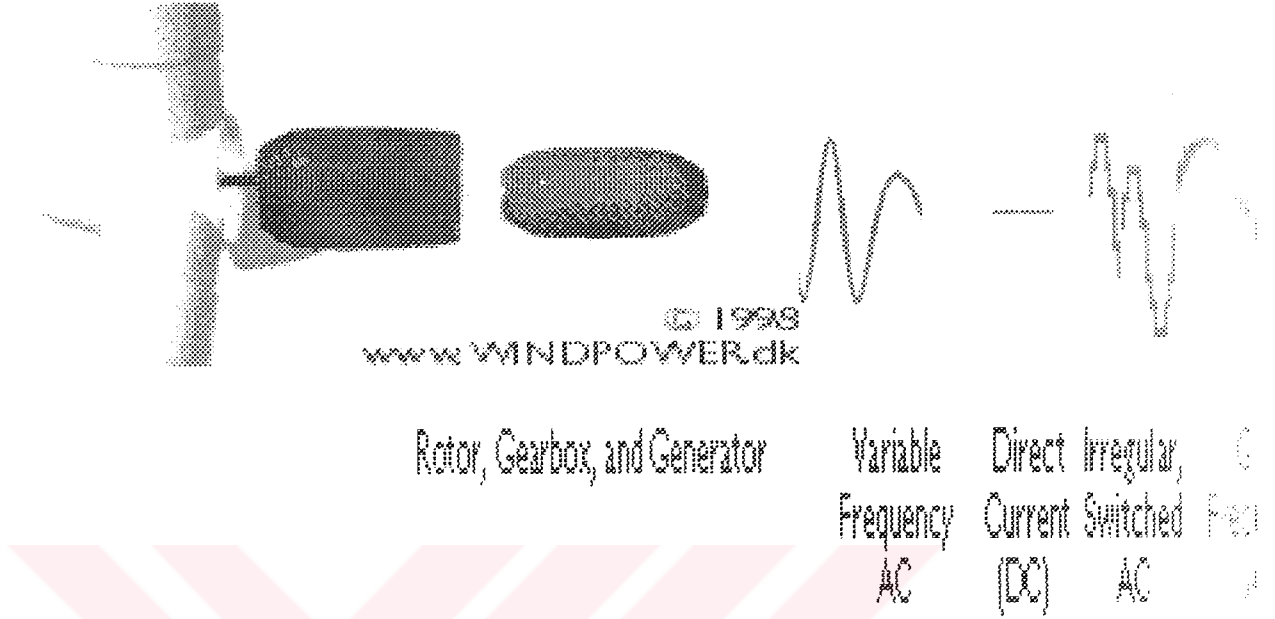
Şekil 4.5 : Metal duvarlı radyasyonsuz oda

Rüzgar türbinlerinde güç kabloları ve generatörlerin çevresinde çok kuvvetli elektromagnetik alanlar vardır. Bunun anlamı kontrol sistemindeki elektronik cihazların elektromagnetik alanlardan etkilenmemesinin gerekliliğidir.

Aynı şekilde elektronik cihazlar, diğer elektronik cihazları etkileyebileceğinden elektromagnetik radyasyonu da emmemelidirler.

Şekil 4.5 deki resim dünyanın en büyük rüzgar türbin kontrol cihazı üreticilerinden birindeki metal duvarlı radyasyonsuz odayı göstermektedir. Bu odadaki cihazlarda kontrol cihazının elektronik kısımlarındaki elektromagnetik emisyonu ölçmektedir.

4.4 Rüzgar Türbinlerinin Endirek Olarak Şebekeye Bağlanması



Şekil 4.6 : Rüzgar türbinlerinin endirek olarak şebekeye bağlanması

4.4.1 Değişken Frekansta Alternatif Akımın Üretilmesi

“Rüzgar türbinlerinin çoğunluğu şebekeye direk bağlanarak hemen hemen sabit hızda faaliyet gösterir. Oysaki , en direk bağlantıyla sistem Şekil 4.5 deki mini şebekeyi kullanır. Bu şebeke inverter kullanılarak, generatörün statöründeki akımın frekansı değiştirilir. Bu şekilde rüzgar türbinini değişken hızda işletmem mümkün olur. Bu şekilde statöre uygulanan değişken frekansla, aynı frekansta alternatif akım türbin tarafından üretilir.”^[1]

^[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

4.4.2 Doğru Akıma Çevrilmesi

Değişken frekanslı alternatif akım direk şebekeye bağlanamaz. Bu sebepten ötürü, bu alternatif akım doğru akıma dönüştürülür. Alternatif akımın doğru akıma çevrilmesi tiristörler veya güç transistörleri ile yapılabilir.

4.4.3 Sabit Frekanslı Alternatif Akıma Çevrilmesi

“Daha sonra şebeke ile aynı frekansta alternatif akım elde etmek için, evirici kullanılarak, doğru akım alternatif akıma çevrilir. Alternatif akıma bu çevrim de tiristörler veya transistörler kullanılarak yapılır.

Tristörler veya güç frekansları mekanik kısımları olmadan anahtarlama yapan yarıiletkenlerdir. Evirici çıkışındaki akım şekil 4.6 da görüldüğü gibi tam sinüsoidal bir akım değildir. Şekil 4.6 dan da görüldüğü üzere akım ve gerilimde ani sıçramalar vardır.”^[1]

4.4.4 Şebekeye En direk Bağlanmanın Avantajları

En direk bağlantının avantajı, rüzgar türbinini değişik hızlarda işletebilmektir. Ana avantaj, ani rüzgara izin verilebilir ve böylece rotor daha hızlı dönebilir ve rüzgar bitene kadar da aşırı enerjinin bir kısmı depolanabilir. Açıkçası, bu bir kontrol sistemi gerektirir çünkü sistem ani rüzgar ve yüksek hızlı rüzgarları birbirinden ayırabilmelidir. Böylece maksimum moment azaltılabilir ve yorulma yüklerine kule ve kanatlarda müsaade edilebilir.

İkinci avantaj ise güç elektroniği cihazlarının reaktif gücü kontrol edebilmesi ve şebekedeki güç kalitesini yükseltmektir. Bu özellikle türbin zayıf bir şebekeye bağlı ise oldukça faydalı bir durumdur.

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

Teorik olarak, değişken hız yıllık üretim açısından, makinayı optimum hızda işletmek mümkün olacağı için avantajlı bir durumdur.

4.4.5 Şebekeye En direkt Bağlanmanın Dezavantajları

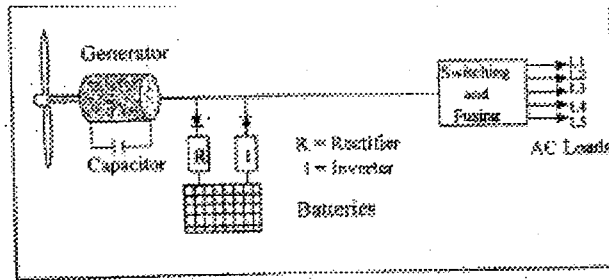
“En direkt bağlantının temel dezavantajı maliyettir. Daha önce de bahsettiğimiz gibi en direkt bağlantı şeklinde türbin doğrultucu ve eviriciye gereksinim duymaktadır. Günümüzde, güç elektroniği cihazlarının maliyeti daha hafif türbinler üretmek elde edilen kazancı aşmaktadır. Fakat bu durum güç elektroniği cihazlarının maliyetinin azalması ile birlikte değişebilecektir.

İşletimsel istatistiklere bakarsak, güç elektroniği cihazları kullanan rüzgar türbinlerinin arıza risklerinin daha fazla olduğunu görürüz. Bunun sebebi güç elektroniği cihazlarının arıza yapma risklerinin fazla olmasıdır.

Diğer bir dezavantajda AC-DC-AC çevirimi sırasında enerji kaybıdır. Diğer yandan da, güç elektroniği cihazları harmoniklere sebep olarak güç kalitesini bozarlar. Harmonik problemi filtrelemenin kusursuz olamaması sebebi ile meydana gelir ve çıkış akımında yüksek frekanslı akımlara yol açar.”^[1]

4.5 Stand-Alone (Tekli) Sistem

Sabit hızlı generatör kullanan basit bir stand-alone (tekli) rüzgar sistemi şekilde gösterilmiştir(Şekil 4.7).



Şekil 4.7 : Sabit hızlı generatör kullanan bir stand-alone rüzgar sistemi

^[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

Mahalli yükleri besleyen rüzgar sistemi için, kalıcı magnetli doğru akım generatörü rüzgar sisteminin işletilmesini basitleştirir. Diğer taraftan endüksiyon generatörü de alternatif akım sağlar. Çıkış terminallerine bağlanmış şönt kapasitesinin yardımıyla generatör kendi kendine uyarmalıdır. Türbin hızının kontrol edilmesi ile frekans kontrol edilir . AC-DC doğrultucusu ile akü şarj edilir ve DC-AC eviricisi ile de deşarj edilir.

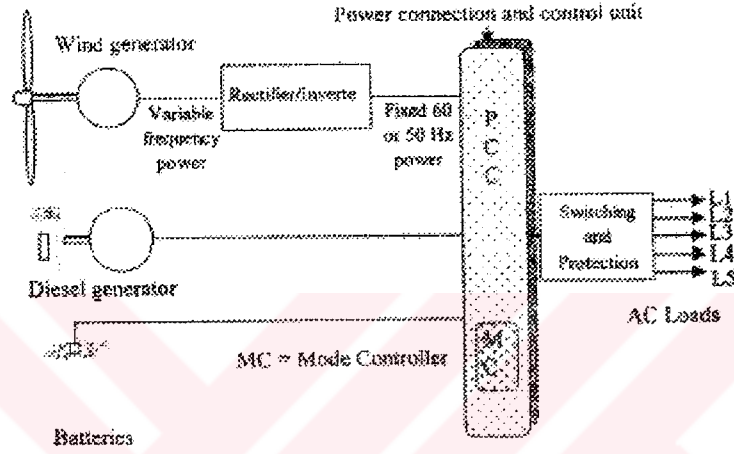
“Tekli sistem genellikle tarım alanlarını enerjilendirmek için kullanılır. Yükün cinsi endüksiyon generatörünün hem kalıcı halinin hem de geçici halinin arzulanan gerilim ve frekans için saptanmasında önem teşkil eder. Güç faktörü yükün direnç, endüktans veya kapasitif olmasına bağlı olarak, 1, önde giden (leading) veya geride kalan (lagging) olabilir. Yüklerin pek çoğu güç faktörünün yaklaşık 0.9 civarında olması ile endüktiftir. Senkron generatörlerinin aksine, endüksiyon generatörlerinin çıkış akımı ve güç faktörü herhangi bir yük için, generatör parametreleri ile saptanır. Bu sebepten ötürü, endüksiyon generatörü bir yükü beslediği zaman, hem faz akımı hem de karesel akım meydana gelir. Karesel akımı çıkış terminallerine bağlanmış kapasitör tarafından oluşturulur. Bu sebepten, endüksiyon generatörü düşük güç faktörlü yükleri beslemek için uygun değildir.”^[1]

4.6 Rüzgar Türbinleri Ve Diesel le Hibrid Sistem

“Tüm zamanlarda yükü beslemenin zorunluluğu birden fazla güç sisteminin kullanılması ile desteklenebilir. Rüzgar türbinlerinde hibrid sistemlerinin pek çoğu dizel generatör ve rüzgar türbininin birlikte kullanır. Bazı durumlarda, dizel generatörlere ek olarak baterilerde kullanılabilir. Günlük yük değişimleri için bateriler kullanılır. Dizel generatör de uzun süreli değişimlerde devreye girer. Örnek

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press, New York.

olarak, dizel generatör hava durumlarının en kötü olduğu durumlarda devreye girer mesela, uzun süreli rüzgarsız zamanlarda dizel işleme geçer. (Şekil 4.8)^[1]



Şekil 4.8 : Dizelle Hibrid Sistem

4.7 Mode Control

“Tüm sistem dizel generatörün, rüzgar generatörünün ve baterinin özelliklerini birbirine uydurabilecek şekilde dizayn edilmelidir. Gereksinim duyulduğunda, üretimin istenilen moduna geçmek mode kontrol ile sağlanır. Bu sebepten, mode kontrol hibrid sisteminin ana izleyicisi ve kontrolörüdür. Kaynak seçimi için, bu sistem bir mikrobilgisayar, software, bateri yönetimini barındırır. Mode kontrol cihazı aşağıdaki fonksiyonları gerçekleştirir:

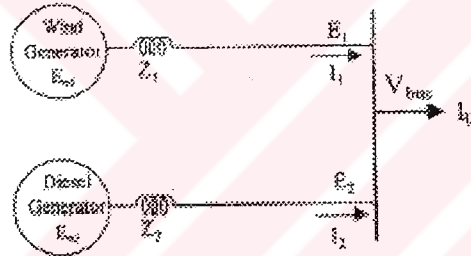
- Sistemin durumunu ve çalışma performansını izleyip, kontrol eder.
- Baterinin durumunu izler ve kontrol eder.
- Dizel generatörü gerektiğinde devreye alıp gerektiğinde devreden çıkarır.

Otomatik transfer anahtarı ile bateri yaklaşık 5 ms de devreye girer. Diğer taraftan, dizel manuel veya otomatik olarak devreye girer. Otomatik transfer anahtarı ile bile, dizel generatörün devreye girmesi daha uzun zaman alır.”^[5]

4.8 Yük Paylaşımı

“Rüzgar türbini ve dizel paralel olarak çalışmaları için, hibrid sistem dizaynında en önemli noktalardan biri yük paylaşımıdır. Örnek olarak, iki sisteminde elektriksel özellikleri uyumlu olmalıdır ki, birbirlerinin kapasitelerine göre yük paylaşımı gerçekleşebilsin.

Yük paylaşımını saptayabilmek için, her iki sistemde Thevenin devrelerine indirgenir. Bu durum aşağıdaki şekil 4.9 da gösterilmektedir



Şekil 4.9: Thevenin Eşdeğer Devresi

İki generatörün karakteristikleri aşağıdaki eşitliklerle verilebilir:

$$E_1 = E_{01} - I_1 Z_1$$

$$E_2 = E_{02} - I_2 Z_2$$

E_0 =Dahili üretilmiş gerilim

Z =Dahili seri empedans

E =Terminal gerilimi

^[5] EWEA, 2000. The economics of wind energy

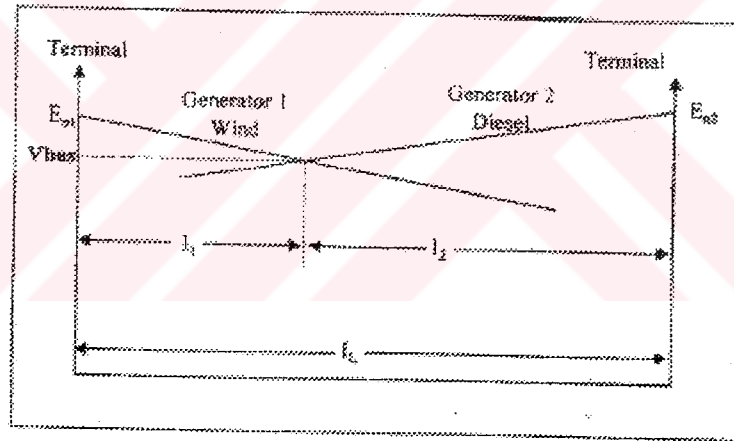
İki generatör eğer paralel bağlandıysa, çıkış gerilimleri E_1 ve E_2 bara gerilimi V_{bus} 'a eşit olmalıdır. Ek olarak, I_1 ve I_2 nin toplamı da yük akımına eşit olmalıdır. Sonuç olarak, gerekli şartlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

$$E_1 = E_2 = V_{bus}$$

$$I_1 + I_2 = I_L$$

Bu belirtilen koşullar makinanın iç karakteristiklerine bağlı olarak, E_0 ve Z , I_1 ve I_2 akımlarının değerlerine karar verecektir.

Alternatif olarak, aşağıdaki şekil 4.10 da gösterildiği gibi grafiksel olarak da çözüm elde edilebilir. Bu metotla, ilk olarak, E ve I eksenleri işaretlenir. İki gerilim aksı arasındaki mesafe yük akımına eşitlenir. Generatörler yükü, terminal gerilimleri eşit olacak şekilde paylaşırlar. İki yük çizgisinin kesiştiği noktada gerekli koşullar



Şekil 4.10 Yük Paylaşımı

sağlanmış olunur. I_1 ve I_2 akım değerleri de grafikten okunur.”^[1]

Yük paylaşımının kontrolü makinanın E ve I değerlerinin kontrolünü gerektirir. Dizel makinalarla birlikte sistemden ayrı uyarmalı doğru akımlı senkron generatörler durumunda bu durum daha kolaydır. Buna karşın endüksiyon generatörlerinde bu durum daha zorlaşır. Genel olarak, makine yapıldığında dahili empedans sabitlenir.

^[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press, New York.

Yük paylaşımı yüklerin öncelik durumuna bağlı ve alternatif kaynaklardan elde edilen enerjinin maliyetine bağlı olarak değişir. Rüzgar- dizel sistem de, dizel enerjinin maliyeti rüzgar enerjisinden daha pahalıdır. Dizel enerjinin maliyeti 25C/kWh olmasına karşın rüzgar enerjisinin maliyeti 5C/kWh dir. Bu sebepten ötürü ilk öncelikli yükler mümkün olduğu kadar çok rüzgar enerjisiyle beslenir. Eğer rüzgar enerjisinin elde edilebilirliği ilk öncelikli yüklerden daha fazla ise, dizel generatör çalıştırılmadan, ikincil öncelikli yüklerde rüzgar enerjisi tarafında beslenir. Pompa ve ısıtıcılar ikincil öncelikli yüklere girmektedir.

4.9 GÜÇ KALİTESİ

“Şebeke girişimindeki güç kalitesinin gereksinimi şebeke ve santralin işletmecisi arasındaki sözleşmenin bir parçasıdır. Doğrultucu ve evirici güç kalitesi ile ilgili ana cihazlardır. Şebekeye bağlanmış sistem bu sebepten ötürü, işletmeci şirketin kabul edebileceği standartlarda yüksek kalitede ve düşük distorsiyonda alternatif akımı elde edebilecek dönüştürücülere ihtiyaç duyar. Güç kalitesiyle ilgili konu, yeniden elde edilebilir kaynak alçak gerilim hatlarıyla düşük kapasiteli şebekeye bağlandığı zaman daha fazla telâffuz edilmeye başlanmıştır.

Geniş olarak, güç kalitesi ölçüm açısından üç ana kısma ayrılabilir:

- Doğrultucu veya evirici gibi güç elektroniği cihazlarının sebep olduğu toplam harmonik distorsiyon.
- Bozulmalar veya hataların sebebiyet verdiği geçici gerilim “sag” (çökme) leri.
- Periyodik gerilim “flicker” (gidip gelme) leri.”^[6]

4.9.1 Harmonik Distorsiyonu

$$THD=(V_2^2+ V_3^2+V_4^2)^{1/2}/V_1 \quad (\text{Denklem 4.4})$$

^[6] EWEA, 2000. Wind energy and the environment

THD, alternatif akımın aynı güç sisteminin farklı bölgelerinde kıyaslanması için faydalı bir kriterdir. Saf sinüzoidal dalga için, $THD=0$ değerini alır. THD değeri büyüdükçe, sinüs dalgasının şekli o derece bozulur ve bu da sağlanan aynı güç miktarı için, daha fazla I^2R kayıplarına yol açar.

İn harmonik akımı tarafından oluşturulan baradaki harmonik distorsiyonu $V_n=I_n.Z_n$ dir. Eğer rüzgar santrali küçükse, lineer olmayan yükler ana barada önemli distorsiyonlara sebep verecektir. Şebekeyi beslemeden önce, harmoniklerin filtre edilmesi gerekir. Şebeke girişiminde genel olarak %3 den az THD değeri genel olarak kabul edilebilen değerdir. IEEE standartları, 519, şebeke için THD değerinin %5 den az olmasını gerektirmektedir.

“Görüldüğü gibi harmonikler nakil edilen güce etki etmemektedir. Fakat harmonikler I^2R kayıplarına yol açar. Açık sistemlere göre, generatörlerde, motorlarda ve transformatörlerde ısınmayı yok etmek bunların kapalı dizaynları sebebiyle oldukça zordur. 1996 uluslararası elektrik koduna göre tüm transformatörlerin k oranları plakalarında belirtilmelidir. Büyük THD sistemlerde transformatörlerin ölçülendirilmesi bu sebepten ötürü önemlidir. k oranı sadece transformatörün distorsiyonunu tolere etme yeteneğini gösterir. 1 değerine sahip k oranı transformatörün anma gücünü saf sinüs dalgasıyla iletebileceğini gösterir. Sadece elektronik yükleri besleyen transformatörler 15 ve 20 arasında yüksek k değerlerine gereksinim duyarlar.”^[1]

Güç kalitesinin yaklaşık bir ölçüsü de tepe değerinin efektif değere oranıdır. Saf sinüzoidal dalgalar için, bu oran $\sqrt{2}=1,414$ dir. Kabul edilebilir pek çok bara

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

gerilimlerinde bu oran 1,3 ve 1,5 arasındadır. Ve bu değ r sistemdeki güç kalitesinin hızlı bir kontrolü için kullanılabilir.

4.9.2 Geçici Gerilimler Ve “Sag” (  kme)ler

Bara gerilimi nominal gerilim değerinden pek çok sebep nedeniyle sagma gösterebilir. Bu sapmanın tolere edilebilmesi bunun genliğine ve süresine bağlıdır. K  k sapsmalar, b  k sapsmalara göre daha uzun süreli olarak tolere edilebilir. Tolerans bandı genel olarak V-t ekseninde gösterilir. Mikroelektronik devreler kullanan cihazlar geçici gerilimlere karşı, transformatör ve motor gibi g   cihazlarına nazaran daha dayanıksızlardır.

ANSI  ebeke geriliminin %5 sınır içinde olmasını ve kısa süreli frekans sapsmalarının da 0.1 Hz den az olmasını belirtmektedir.

4.9.3 Gerilim “Flicklerları” (Gidip Gelmeleri)

Şebekedeki kısa süreli gerilim de i imlerinin mühendislik açıklaması “flicker” olarak adlandırılır. Eğer rüzgar türbini zayıf bir şebekeye bağlıysa, bu konu daha da önem kazanır. Çünkü bu tür şebekelerde kısa süreli rüzgar değişimleri çıkış gücünde de i imlere sebebiyet verecektir.

4.10 Türbinlerinin  alı tırılması Ve Durdurulması

“Elektronik rüzgar türbini kontrol cihazlarının pek çoğu d  k hızlarda şebekeye ba lanmamasını sağlamak için, türbinin  alı mamasını sağlayacak şekilde programlanmışlardır. Rüzgar rotoru ve generatörü anma değerlerinde  alı tırabilecek konuma geldiği zaman, generatörün şebekeye uygun zamanda ba lanması önemlidir. Uygun  alı tırmanın ger ekle emedi i durumlarda kullanılmak üzere çeşitli güvenlik cihazları vardır. Bunlardan birisi arıza güvenlik frenidir.”^[5]

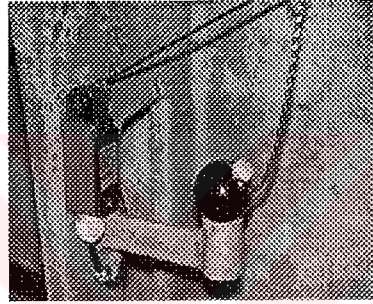
^[5] EWEA, 2000. The economics of wind energy

4.11 Rüzgar Türbinlerinde Güvenlik

Rüzgar türbinlerinin parçaları 20 yıl boyunca dayanabilecek şekilde dizayn edilmişlerdir. Bunun anlamı, bunların 120,000 çalışma saati boyunca dayanabilmesidir.

Eğer normal bir otomobil motoru ile kıyaslarsak, normal bir otomobil motorunun ömrü boyunca 5,000 saat çalıştığını görürüz. Rüzgar türbinleri ömürleri boyunca güvenli çalışmayı sağlamak için güvenlik cihazlarıyla donatılmışlardır.

4.11.1 Sensörler



Şekil 4.11: Vibrasyon Sensörü

Şekil 4.11 de görülen vibrasyon sensörü bir rüzgar türbinindeki klasik fakat en güvenli cihazlardan biridir. Basitçe bir zil üzerinde duran bir top içerir. Bu top bir anahtara bağlanmıştır. Eğer türbin sallanmaya başlarsa, top zilin üzerine düşecek ve türbini devreden çıkaracaktır.

4.11.2 Aşırı Hız Koruması

Kritik parçaların fonksiyonlarını düzgün gerçekleştiremediği durumda, rüzgar türbinlerinin durdurulması çok önemlidir. Eğer generatör aşırı ısınır veya şebekeyle bağlantısı kesilirse, rotorun frenlenmesi durdurulacak ve rotor birkaç saniye içerisinde hızlı bir şekilde ivmelenmeye başlayacaktır. Bu durumda aşırı hız korumasına ihtiyaç vardır.

4.11.3 Aerodinamik Frenleme Sistemi

Modern rüzgar türbinlerinin pek çoğunda ilk frenleme sistemi aerodinamik frenleme sistemidir. Bu sistem boylam eksenini boyunca rotor kanatlarını yaklaşık 90 derece döndürür.

Tehlike durumu bittiği zaman rotor kanatları hidrolik sistem yardımıyla eski pozisyonuna döndürülür.

Tecrübeler aerodinamik frenleme sisteminin aşırı derecede güvenli olduğunu göstermiştir. Bunlar türbini en fazla birkaç dönüşte durdururlar. Buna ilave olarak çok hassas bir frenleme sistemi olup kulede ve makinede stres, yorulma gibi şeylere sebep olmazlar.

Bu gibi sebeplerden ötürü modern türbinleri durdurmak için aerodinamik frenleme sistemi kullanılır.

4.11.4 Mekanik Frenleme Sistemi

Mekanik frenleme aerodinamik frenlemeye yedekleme olarak kullanılır.

4.11.4.1 Tiristörlerle Yumuşak Kalkış

“Büyük bir rüzgar türbinin şebekeye normal bir anahtarla bağlanması durumunda, şebekeyi besleyen yerlerde gerilimin kesilmesi veya gidip gelmesi görülecektir. Bunun sebebi generatörü magnetiklemek için gerekli olan akımdır.

Bu duruma engel olmak için, türbinlerin yumuşak kalkış yapması gerekir. Bu durumda şebekeye tristörlerle bağlanmayla gerçekleştirilir.

Tristörler üzerlerinden geçen enerjinin yaklaşık %1, %2 sini tüketirler. Bu sebepten, modern türbinlerde bypass anahtarları kullanılır. Bypass anahtarı mekanik bir anahtar olup, türbin çalışmaya başladıktan sonra devreye girer. Bu durumda boşa tüketilen enerjinin miktarının minimum olması sağlanır.”^[1]

^[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press, New York.

5. SANTRALİN EKONOMİK OLARAK İŞLETİLMESİ

Bir santralin ekonomik olarak işletilebilmesi, beklenen karlılığa katkıda bulunan çeşitli faktörler tarafından belirlenir.

Ekonomik olarak işletmeye katkıda bulunan ana faktörler bu bölümde tartışılacaktır.

5.1 Enerji Sağlama Faktörü

“Bir santralin ana performans ölçüsü bir yıl boyunca sağladığı enerjidir. Üretilen tüm enerji tüketiciye iletilemez. Bunun bir kısmı kontrol ekipmanlarının beslenmesi, güç ekipmanlarının kayıpları ve çevre aydınlatma için kullanılır. Tipik bir rüzgar santralinde üretilen enerjinin yaklaşık %90’ı kullanıcıya sağlanabilir ve geri kalan %10 lık kısımda santralin işletiminde harcanır.

İletilen enerjinin miktarı, santralin maksimum güç kapasitesine ve kapasitesinin hangi oranda değerlendirildiğine bağlıdır. Güç santralinin normalleştirilmiş ölçüsü, enerji iletim faktörüdür (EDF). Bu ölçü, eğer santral maksimum üretim gücünde, 8760 saat boyunca çalışırsa, iletilen enerjinin yukarıda tanımlanan enerjiye bölünmesiyle hesaplanır.

Ortalama yıllık EDF=Bir yılda iletilen enerji (kWh)/Kapasite. Bir yıldaki süre(saat)

Yük gücü zaman içinde değiştiği için, EDF integral şeklini alır:

$$\text{Yıllık Ortalama EDF} = \int P_o dt / P_m \cdot 8760 \quad (\text{Denklem 5.1})$$

P_m =Santral Kapasitesi

P_o =Herhangi bir t zamanında tüketiciye iletilen enerji

**EC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

EDF genellikle sürekli zaman dilimlerinde iletilen enerji kısımlarının toplanmasıyla hesap edilir, bu aşağıdaki gibidir.”^[1]

$$\text{Ortalama Yıllık Enerji} = \sum P_{\text{avg}} (\Delta t) / P_m.8760 \quad (\text{Denklem 5.2})$$

Denklem 5.1.1 de $P_{\text{avg}} = \Delta t$ zaman aralığında iletilen ortalama güçtür.

“EDF bir santralin maksimum enerjiyi teslim edebilecek şekilde işletilebilmesinin ne kadar zor olduğunu gösteren bir ölçüdür.

EDF bir santralin diğerine göre kullanılabilirliğini kıyaslamak için faydalı bir ölçüdür. Rüzgar santralleri ortalama yıllık %30 EDF değeriyle çalışırlar. Fakat bazı rüzgar santrallerinde %40 lık EDF değerlerine de rastlanır. Buna karşılık diğer enerji santrallerinde bu oran %40 ile %80 arasındadır.

Rüzgar santrallerinde enerji iletim faktörü mevsimlerle değişir. Ve bu durum göz önüne alınmalıdır.”^[1]

5.2 Kapital Maliyeti

Kapital maliyeti büyüklük, saha ve sitenin teknolojisine bağlı olarak değişir. Aşağıda Tablo 5.1 de kapital maliyetleri, kullanılan enerji türüne göre verilmiştir :

“Tablo 5.1 Kapital Maliyetleri”^[1]

<u>Santral Teknolojisi</u>	<u>Kapital Maliyeti (\$/kW)</u>
Rüzgar Santralleri	500-800
Güneş	3000-5000
Buhar	400-600

^[1] Mukund R. Patel, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press, New York.

Tipik bir rüzgar santralini oluşturan malzemelerin yüzde olarak maliyete katkıları da aşağıdaki tablo 5.2 de belirtilmiştir.

“Tablo 5.2 Ekipmanların % Olarak Maliyete Katkıları”^[1]

<u>Maliyet</u>	<u>Yüzde Olarak Katkı</u>
Rotor	27
Nakel ve Yardımcı Ekipman	17
Elektrik Güç Ekipmanları	17
Kule ve Temel	11
Saha Hazırlığı ve Yollar	11
Bakım Ekipmanları ve Yedek Parçalar	6
Elektriksel Bağlantılar	5
Finansal ve Yasal	6

5.3 Santralin Kullanılabilirliği Ve Bakım

Arıza oranları ve etkileri bakım maliyetine ve santralin kullanılabilirliğine etki ederler. İşletimle ilgili geçmiş veriler dersler alıp gelişmeler sağlamak açısından önemlidir. İstatistiklere göre rapor edilmiş arızaların %67 sinde santral işletim dışında olmaktadır. Santrali normal çalışmaya getirecek bakımlar arasında ise, elektrik güç ekipmanları %20 ve elektronik kontrol cihazları ise %19 teşkil ederler. Arızaların ana sebeplerinin ise %28 oranında kontrol sistemlerinden ve %24 oranında ise hatalı parçalardan kaynaklandığı görülmüştür.

5.4 Enerji Maliyeti

“Bir elektrik santralinin prensip karar mekanizması müşteriye iletilen enerjinin kWh başına birim maliyetidir. Bu faktör yukarıda tartışılan tüm faktörleri hesaba katar ve aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$UCE=ICC.(AMR+TIR)+OMC/EDF.kW.8760 \quad (Denklem 5.3)$$

Denklem 5.3 de:

ICC=Arazi ve alıştırma masraflarını da içine alan ilk enerji satıl anana kadar ki kapital maliyetidir.

AMR=ICC nin belli bir oranındaki amortizasyon oranıdır.

TIR=ICC nin belli bir oranındaki vergi ve sigorta oranıdır.

OMC=Yıllık işletim ve bakım maliyeti

EDF=Enerji iletim faktörü

AMR (amortizasyon oranı) paranın maliyetini yansıtır. Ve faiz oranlarına bağlı olarak değişir. Enerji iletim faktörü ise enerjideki değişimleri ve çalışmama zamanlarını dikkate alır. Farklı enerji kaynaklarının maliyetleri Tablo 5.3 de verilmiştir.”^[1]

“Tablo 5.3 Farklı Enerji Kaynaklarının Maliyetleri”^[1]

<u>Teknoloji(cents/kWh)</u>	<u>Üretim Maliyeti(Fuel+Kapital) U.S</u>
Rüzgar	5-7
Güneş	15-25
Buhar	8-10
Kombine Gaz	5-7

5.5 Hassasiyet Analizi

Enerjinin maliyetini doğru olarak saptamak yeterli değildir. Aynı zamanda hassasiyet analizi de yapıp, enerjinin maliyetinin bazı datalarla nasıl değiştiğinin tahmin edilmesi gerekir. Enerjinin hassasiyetinin rüzgar hızına bağlı değişimi burada incelenecektir:

^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press, New York.

5.5.1 Rüzgar Hız Değişimlerinin Etkileri

Rüzgar santrallerinde enerji rüzgar hızının küpüyle değişir. Bu sebepten rüzgar hızındaki çok küçük bir değişiklik santral ekonomisinde önemli bir etkiye sebep olur. Örneğin, eğer rüzgar hızı beklenen değer 8 m/s den 2 m/s lik artı veya eksi sapma gösterirse üretilen enerjinin maliyeti yarına inebilir ya da ikiye katlanabilir.

5.5.2 Kule Yüksekliğinin Etkisi

“Rüzgar hızı kule yüksekliği ile değiştiği için aynı türbinden daha yüksek bir kule üzerine monte ederek, daha düşük maliyetle enerji üretilebilir. H kulenin yüksekliği olarak :

Her m² ve kWh için Türbin maliyeti, $E1 = \text{Sabit} / \sqrt{H}$ ^[1]

Denize yakın arazilerde, kule yüksekliğini yükseltmenin pek bir faydası yoktur. Buna karşın, denizden uzak arazilerde kule yüksekliğini 30 dan 60 m ye çıkarırsak türbin maliyetinin her m² için kWh olarak etkisi %56 oranında azalma gösterir.

5.6 Karlılık Endeksi

“Karlılık endeksi aşağıda denklem 5.4 de verilmiştir:

$PI = \frac{\text{Gelecekteki gelirlerin bugünkü değeri} - \text{Projenin Maliyeti}}{\text{Projenin Maliyeti}}$ (Denklem 5.4)

Karlılık temel olarak, santralin ürettiği enerjiyi satabileceği fiyata bağlıdır.

Karlılık analizi ile ilgili etki eden faktörler aşağıda verilmiştir:

- Üretilen enerji miktarı
- Santralin maliyeti
- Faiz oranı
- Santralin ekonomik ömrü

- İşletim ve onarım maliyeti
- Üretilen enerjinin satış fiyatı”^[1]



^[1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press. New York.

6. ÇANAKKALE RÜZGAR SANTRALİ İHALESİ

6.1 Giriş

“Cannon enerjinin, Garrad Hassan (GH) mühendislik firmasının çizdiği dizaynlar üzerine istediği tekliften bu bölümde bahsedilmiştir. Çanakkale projesi her biri 48.1 m uzunluğunda tüp kulelerin üzerine monte edilmiş 46 adet 660 kW türbin içeren 30-MW lık bir projedir.

6.2 Yerleşim

Kuzeybatıdan güneybatıya tek bir satır şeklinde yerleştirilmiş, toplam gücü 30 MW olan 46 adet türbin bu projenin kapsamındadır. TEAS sistemine uygun bağlantı noktası henüz belirlenememiştir.

6.3 Düzenleme

Rüzgar santrali trafo istasyonuna 34.5 kV lık havai hatlarla bağlanmıştır. Rüzgar santralinin çıkışı her bir faz için 598 amper değerine karşılık gelir. Bu da en az 150 mm² lik bir iletken kesitine denk gelir. Bu sebepten ötürü rüzgar santrali trafo istasyonuna havai hatlar ile bağlanmıştır. Rüzgar sahasını iki yarıya bölüp, her birini kendi havai hatlarıyla trafo istasyonuna bağlamak mümkün olmasına karşın, bu durumda her biri 34.5 kW lık iki adet kontrol binasına ihtiyaç duyulacaktı.

Sahanın düzenlenmesi kontrol binanın yerine bağlı olarak, bazı türbinlerin uzun kablo bağlantıları içermesi demektir. Kablo masrafları, kayıplar ve şalt masrafları göz önüne alındığında optimum çözüm her biri kontrol binasına 95 mm²

lik kablolarla bağılı olacak şekilde türbinleri üç gruba ayırmak şekilde elde edilmiştir.”^[4]

6.4 Miktarlar ve Lump Sum Maliyet Tablosu

“Teklif sahibinin aşağıdaki tabloyu doldurup teslim etmesi beklenmektedir. Teklif veren firma aşağıdaki standartlara uyan, aşağıda belirtilen malzemeleri temin etmekle yükümlüdür.

Standartlar şu şekildedir:

- National Electrical code. (NEC)
- National Electrical Manufacturers Association. (NEMA)
- Institute of Electrical and Electronic Engineers. (IEEE)
- Insulated Cable Engineers Association. (ICEA)”^[4]

6.5 Malzemeler

“Aşağıdaki tabloda ihaleye giren firmaların temin etmesi gereken malzemelerin dökümü verilmiştir.”^[4]

Tablo 6.1: Malzeme Dökümü

Malzemenin Cinsi	Miktar
Trafo İstasyonu:	
Çift devreli 154 kV havai hat.	500m
Saha İşleri ve Topraklama	1
154 kV harici ayırıcı	6
154 kV harici kesici	3
154/ 34.5 kV 30 MVA trafo	1
Yükte Tap Changer	1

^[4] Namık Orhun 2001. Çanakkale Wind Farm Project

Malzemenin Cinsi	Miktar
------------------	--------

34.5 kV harici ayırıcı	2
34.5 kV harici kesici	1
Montaj ve Teslim Alma	1
34.5 kV minumum 508 A lik havai hat	2 km

34.5 kV Rüzgar tarlası sistemi

34.5 kV dahili SF6 lı şalt	1
2x150 mm ² , 3x1 çekirdekli XLPE	50 m
34.5 kV kablo, 95 mm ² , 3x1 XLPE	6 km

Türbin Elektrik Ekipmanları

700 kVA Trafo	46
Kule Topraklama	46
Temel Topraklama	46
Kontrol Kablolarının Montajı	46
Türbin alçak gerilim kablo bağlantıları	46

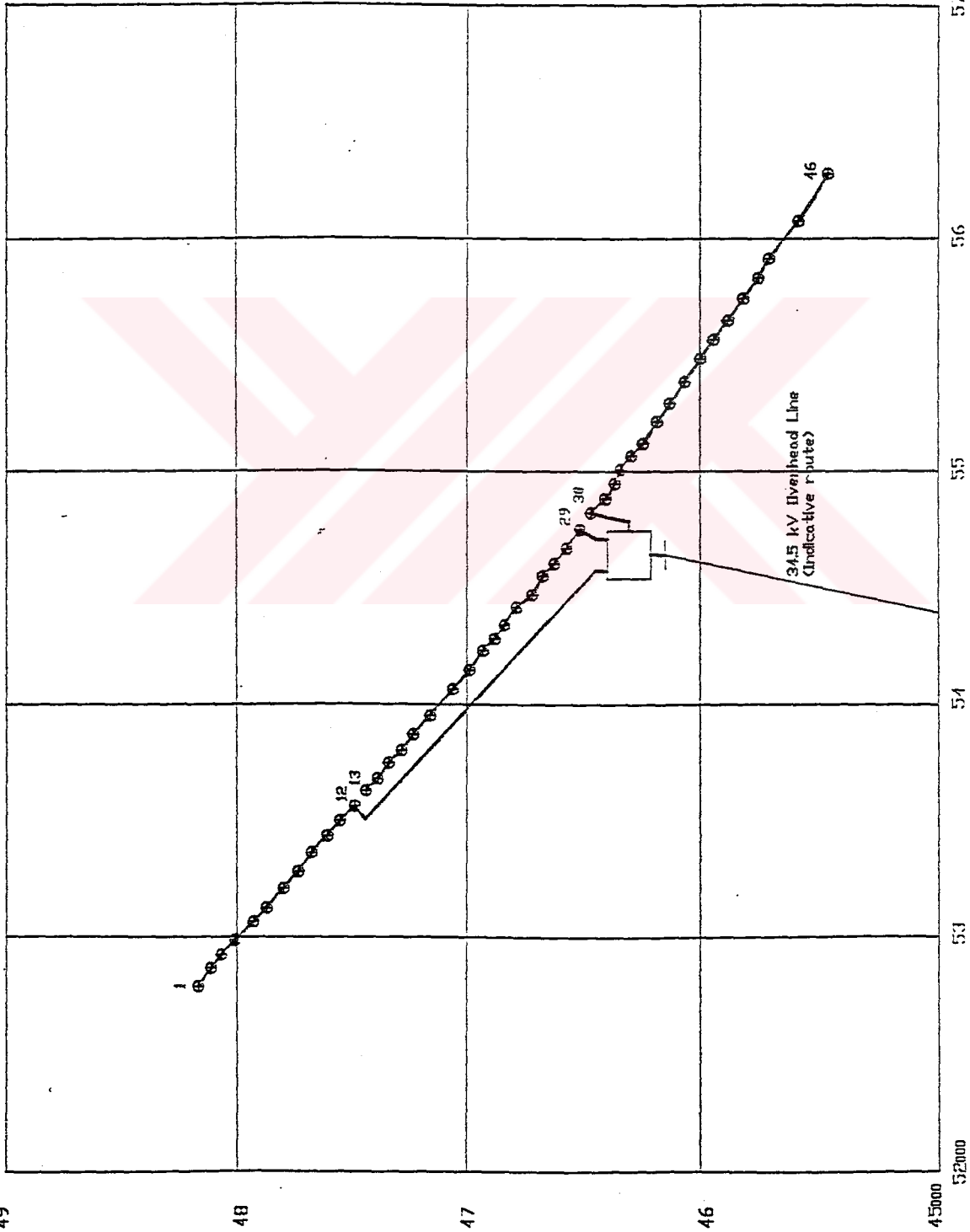


CANAKKALE
SITE PLAN
ATTACHMENT C

Proposed Position of
Control Building with 34.5 kV
Indoor Switchboard



⊕ Turbine Position



DRAWING NUMBER

TITLE Canakkale

ERW

DRAMA BY

CHECKED BY

DATE

7/2/2010

NO SCALE

DO NOT SCALE

ALL DIMENSIONS
IN MILLIMETERS

UNITS: 1:1000

DATE: 7/2/2010

BY: 04

DESCRIPTION

05

06

07

08

09

10

11

12

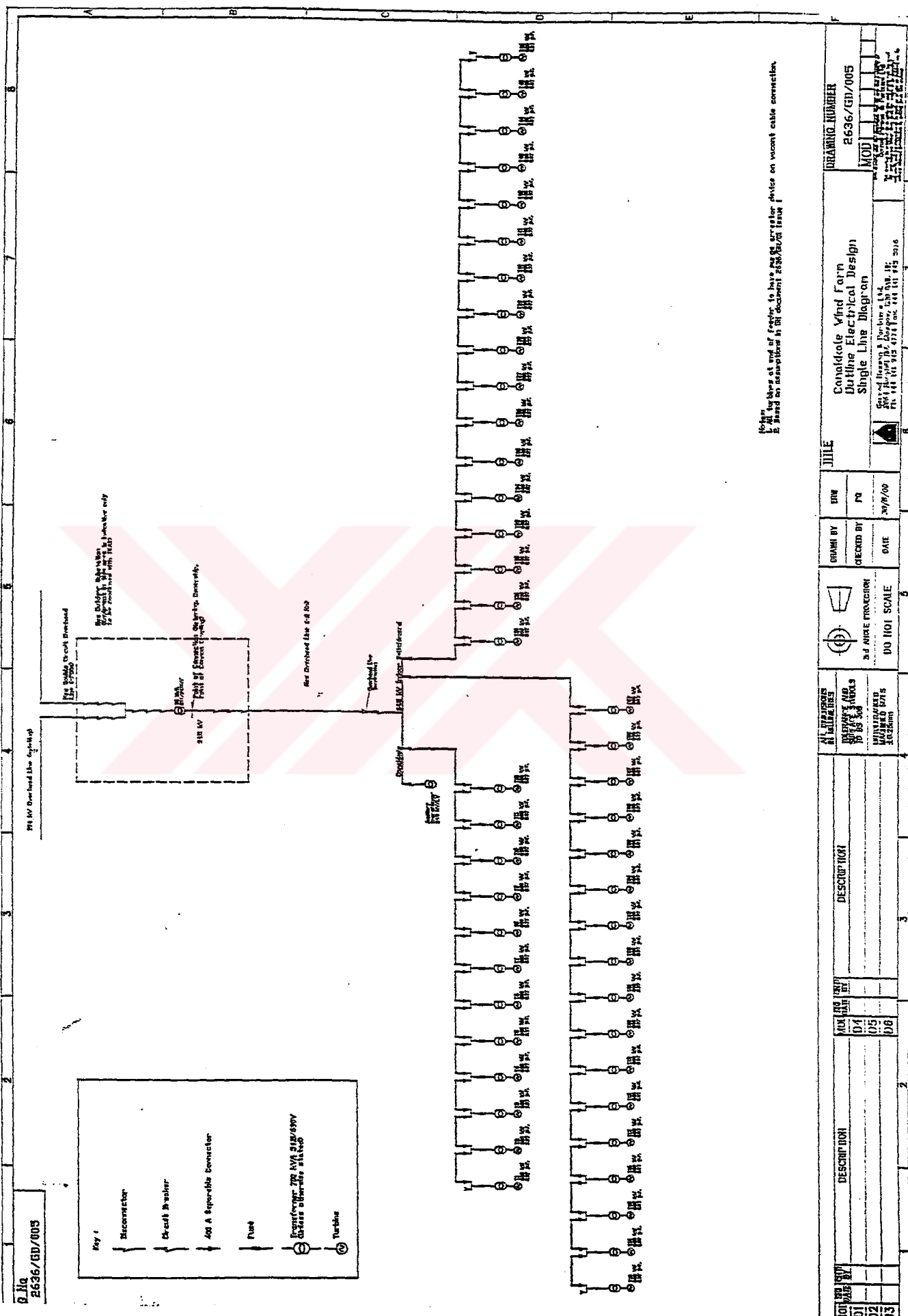
13

14

15

16

17



6.6 İhalede Verilecek Teklifin Saptanması

Alstom Taahhüt Alstom Fransa'nın Türkiye temsilcisi olup, yüksek binaların elektrik elektronik taahhüdünden, fabrikalar ve santrallerin elektrik işleri olmak üzere pek çok alanda faaliyet göstermektedir. Alstom Taahhüt yaklaşık 20 senedir taahhüt işlerinde yer almaktadır. Bir taahhüt işi başlamadan önce ihaleye girilir ve ihaleyi kazanan firma gerekli hazırlıkları yaptıktan sonra işi tamamlamak üzere işe başlar. Ve iş bitirildikten sonra devreye alınması ve müşteriye teslimatı yapıldıktan sonra, Alstom kontrat şartlarına bağlı olmak üzere müşteriye gerekli garanti süresini verir.

İhale prosedürüne daha geniş bir açıdan bakarsak, ilk olarak ön elemeyi geçen firmalar mühürlü zarflar içinde projeyi tamamlamak için talep ettikleri miktarı belirtirler. Zarflar açıldıktan sonra, en düşük istenen ücretin sahibi firma ihaleyi kazanıp, projeyi tamamlama hakkına kavuşur. Bu verilen bilgilerin ışığında, şunu söyleyebiliriz ki, taahhüt işindeki bir firma çeşitli belirsizliklerle baş etmek zorundadır. Bu belirsizlikler projeyi tamamlamak için gerekli maliyet ile başlayıp, rakip firmaların ihaleye ne kadarlık bir teklifle gireceğine dair belirsizlikle devam eder. Öte yandan firma düşük teklif verip ihaleyi kazanma şansını arttırmak ama işi az karla yapmak veya yüksek teklif verip ihaleyi kazanma şansını azaltmak ama ihaleyi kazanırsa da yüksek kar yapmak arasında bir seçim yapmak zorundadır.

Alstom Taahhüt firmasında ben ve bir iş arkadaşım Çanakkale'de ihaleye çıkacak olan rüzgar santrali yapımı için ihalenin hazırlanması üzerinde yaklaşık 10 gün boyunca çalıştık. İhaleye giriş hazırlıkları ve teklifin hazırlanmasının şirkete maliyeti yaklaşık 3000\$ idi. Bunun anlamı şirket ihaleyi kazansa da kaybetse de 3000\$ lık bir yük altına girmiştir. Diğer ilişkili maliyetler ise işin alınması durumunda meydana gelecek maliyetlerdir. Bunlarda malzeme maliyeti ve işçilik maliyetidir. Bu iş için düşünülen malzeme maliyeti yaklaşık 600,000\$ ve işçilik maliyeti de yaklaşık 50,000\$.

Daha önce de açıkladığım gibi, Alstom bir karar vermek zorundadır. Vermesi gereken ilk karar teklif vermek ya da vermemektir. Fakat, ülke hala ekonomik kriz içerisinde olduğundan şirket geleneksel kar marjı olan %25 i bir kenara bırakarak, zarar etmediği sürece bu işi almak zorunda olduğunu hissetmektedir. Bunun ışığında şunu söyleyebilirim ki şirket için tek belirsizlik ihaleyi en yüksek olasılıkla ne kadarlık bir teklif vererek alabilme belirsizliğidir.

Ne kadarlık bir teklif verileceğini belirlemek için, analitik bir araç kullandım. Bu aracın adı karar ağacı olup, analize rehberlik eden bir araçtır. Karar ağacı, karar verecek kişiye problemin tüm sonuçlarını bir anda sunarak, karar vermesini kolaylaştırır. Karar ağacının kullanım avantajıyla kendime bir avantaj sağlamak amacıyla, Palisade isimli programı kullandım. “Bu problem 3 tane ortak element sunar:

1. Karar verecek kişinin mevcut karar seti.
2. Olası sonuçlar ve bunların olasılıkları.
3. Çeşitli kararlar ve sonuçları (genellikle parasal) gösteren değer modeli.

Bu elementler bilindiği zaman, karar verecek kişi optimum karara ulaşabilir.”^[7]

“Karar ağacını analiz ettiğimiz zaman, bazı noktalar(node) ve dallar(branches) görürüz:

1. Noktalar zaman içindeki yerleri temsil ederler.
2. Karar Noktası: Kare ile temsil edilirler ve karar verecek kişinin kararını verdiği noktayı gösterir.
3. Olasılık Noktası: Kesin olmayan bir olayın sonucunun bilinmesidir.
4. Bitiş Noktası: Problemin sona erdiğini gösterir ve üçgen işaretiyle temsil edilir.

Tüm bu adımlardan sonra ve ilişkili noktalar ve dalları belirledikten sonra, gözlemlenen olaylarla ilgili olasılıklar listelenirler. Herhangi bir düğümden çıkan olasılıkların toplamının 1'e eşit olması gerekmektedir. Olasılık değerleri girildikten sonra, toplamsal parasal değerler hesaplanır ve bu değerler bitiş düğümünün sağ tarafına yazılır. Daha sonra ise en yüksek beklenen değere sahip karar noktası çözüm olarak seçilir.”^[7]

Problemimize geri dönersek, Alstom'un ana stratejisi teklifi vermek veya vermemek üzerine olmaktadır. Tabiki şirketi göz önüne alması gereken kar marjı politikası mevcuttur. Fakat mevcut ekonomik koşullar Alstom'un bu durumu bir kenara bırakıp, sadece teklif verip vermemek üzerinde yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Buna karşın, şirket 653,000 \$ bir maliyet altına girmiş olacağından, bu maliyetin altında bir teklif vermenin pek bir mantığı olamayacağı açıktır.

Bütün bunların ışığında, karar vermemiz gereken şirketin ihale için ne kadar bir teklif vermesi gerektiğidir.

^[7] Winston and Albright 2000, Practical Management Science, Prentice Hall, Washington

Bu problemi çözebilmek için rakiplerin vereceği tekliflerin miktarlarını ilgili olasılıkları ile birlikte tahmin etmeye çalıştık. Bu rakamlar aşağıda verilmiştir:

1. Senaryo:

Rakip Firmaların teklif vermeme olasılığı %0

Rakip Firmaların Verdikleri Tekliflerin Dağılımı

<700,000 \$	%20
700,000\$...750.000\$	%40
750,000\$...800.000\$	%35
>800,000\$	%5

Yukarıda belirtilen değerlere göre, Alstom 700,000\$, 750,000\$ veya 800,000\$ lık tekliflerde bulunmalıdır. Tüm bu olasılık ve dolar miktarlarını karar ağacına uyguladığımız zaman görürüz ki, Alstom 700,000\$ veya 750,000\$ lık tekliflerde bulunmalıdır. Bunun sebebi her iki teklif miktarı içinde beklenen değerin 37,000\$ olmasıdır. Oysaki 1. Senaryo için risk profiline baktığımız zaman görürüz ki 750.000\$ lık teklif daha riskli bir miktardır.

Bulduğumuz sonuçlara dayanarak, rakiplerin tekliflerini başka bir format, 2. senaryo ile inceleme gereği duyduk. Bu format aşağıda verilmiştir:

2. Senaryo:

Rakip Firmaların teklif vermeme olasılığı %0

Rakip Firmaların Verdikleri Tekliflerin Dağılımı

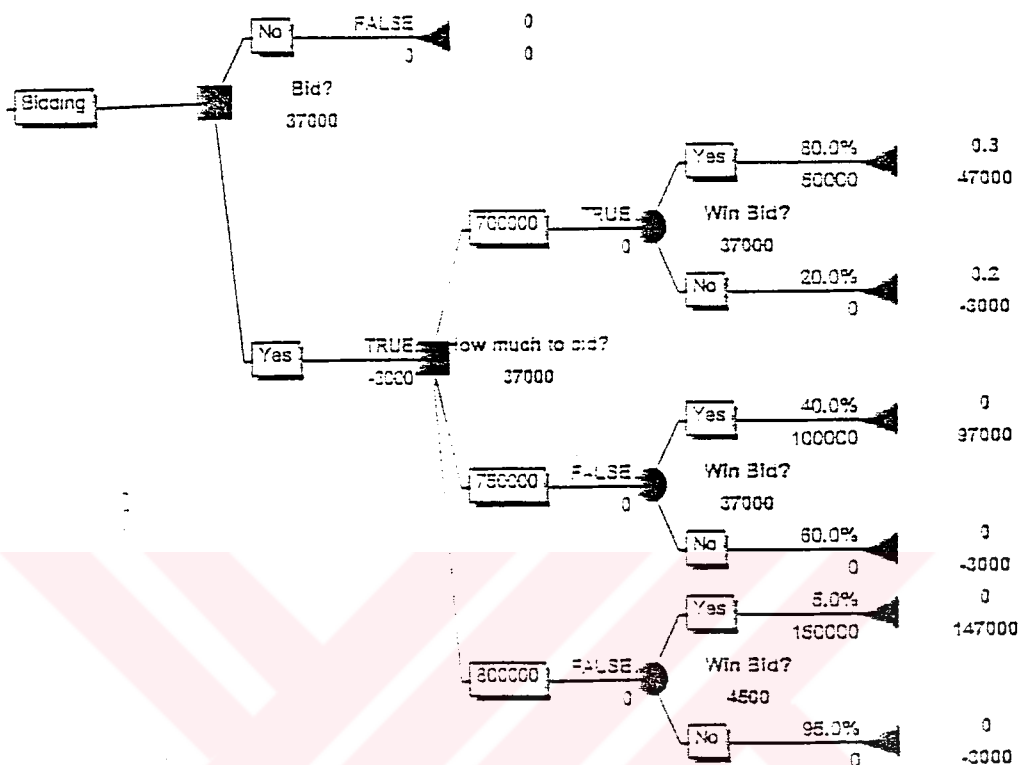
<700,000 \$	%20
700,000\$...725.000\$	%20
725,000\$...750.000\$	%20
750,000\$...800.000\$	%35
>800,000\$	%5

Bu bilgilere dayanarak gördük ki, Alstom 725,000\$(en yüksek beklenen değere sahip) teklifte bulunmalıdır. Bu senaryoya göre, Alstom %60 lık bir olasılıkla 72,000\$ kazanacak veya %40 lık bir olasılıkla da 3,000\$ kaybedecektir. Uygun teklif miktarı üzerinde karar verdikten sonra, iyimser ve kötümser olmak üzere iki senaryo üzerinde daha durduk. Tüm bu senaryoları inceledikten sonra da, Alstom'un bu ihaleyi alabilmesi için 725,000\$ lık bir teklif vermesi gerektiği konusunda fikir birliğine vardık.

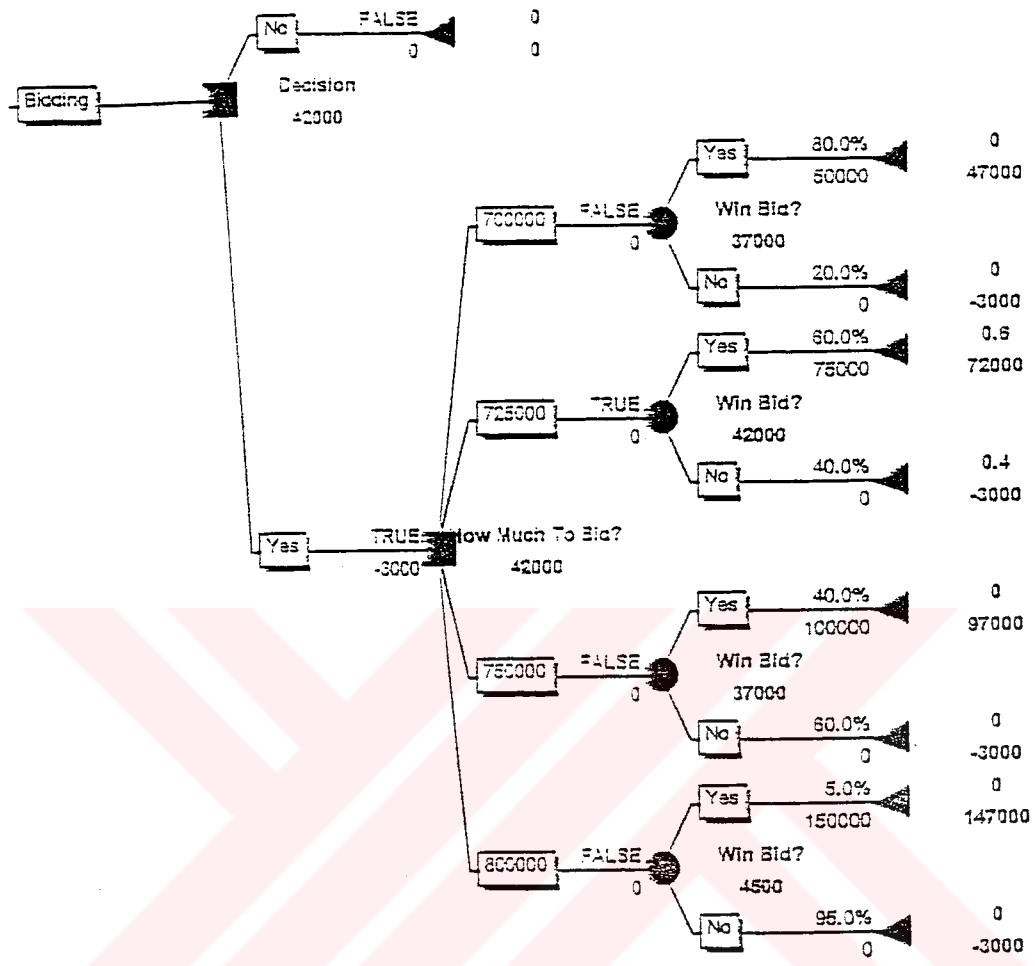
6.7 Karar Ağacı İle Programlama

INPUTS	
COST TO PREPARE A BID	\$3,000
SUPPLY AND LABOR	\$650,000
FIRST SCENARIO	
PROBABILITY OF NO COMPETING BID	0%
COMP BID DISTRIBUTION	
<\$700,000	20%
\$700,000 TO \$750,000	40%
\$750,000 TO \$800,000	35%
>\$800,000	5%
SECOND SCENARIO	
PROBABILITY OF NO COMPETING BID	0%
COMP BID DISTRIBUTION	
<\$700,000	20%
\$700,000 TO \$725,000	20%
\$725,000 TO \$750,000	20%
\$750,000 TO \$800,000	35%
>\$800,000	5%
OPTIMISTIC SCENARIO	
PROBABILITY OF NO COMPETING BID	0%
COMP BID DISTRIBUTION	
<\$700,000	10%
\$700,000 TO \$725,000	15%
\$725,000 TO \$750,000	15%
\$750,000 TO \$800,000	50%
>\$800,000	10%
PESSIMISTIC SCENARIO	
PROBABILITY OF NO COMPETING BID	0%
COMP BID DISTRIBUTION	
<\$700,000	40%
\$700,000 TO \$725,000	35%
\$725,000 TO \$750,000	20%
\$750,000 TO \$800,000	5%
>\$800,000	0%

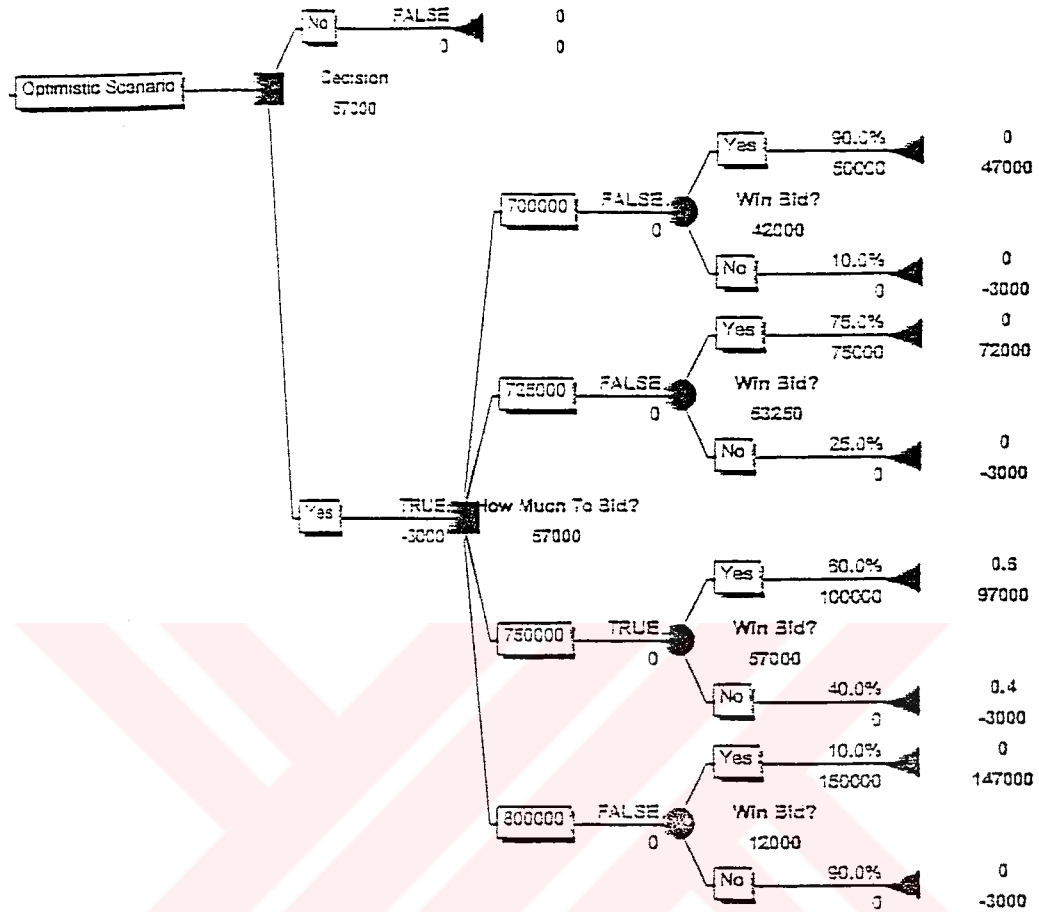
FIRST SCENARIO



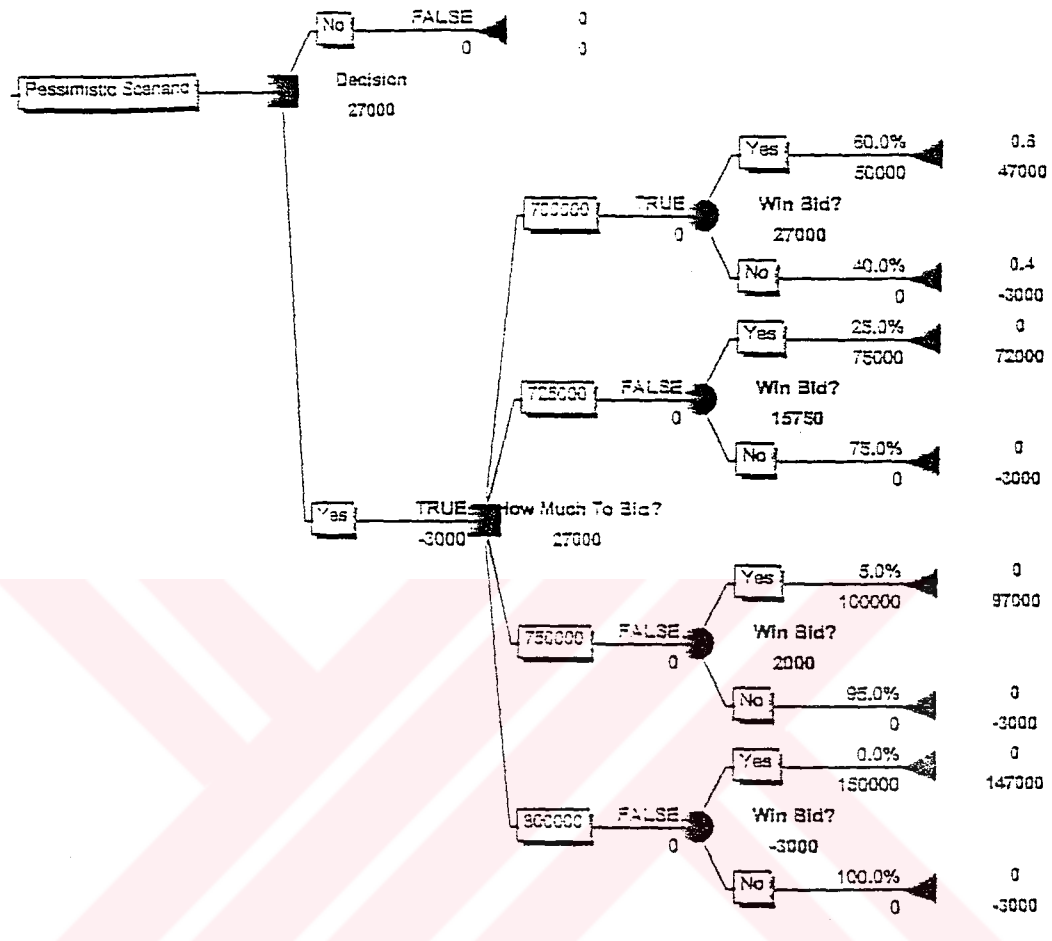
SECOND SCENARIO



OPTIMISTIC SCENARIO

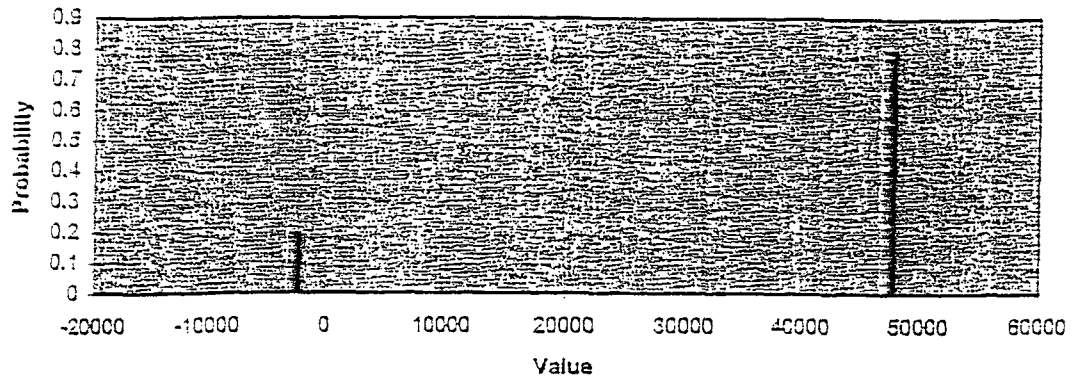


PESSIMISTIC SCENARIO

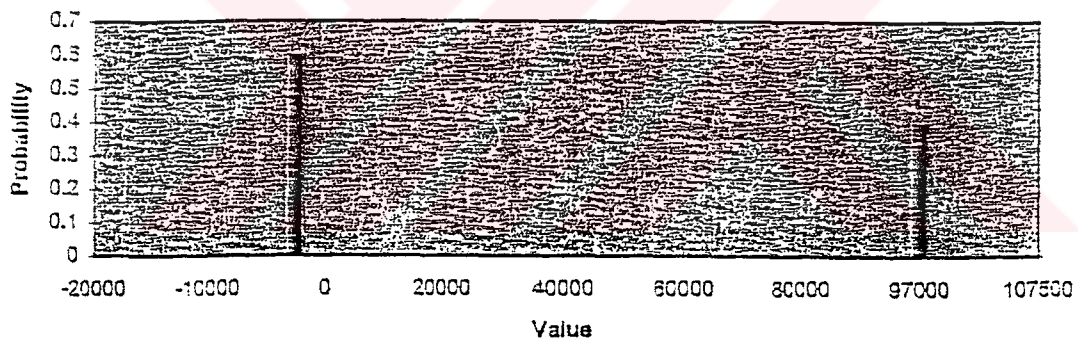


RISK PROFILE

Risk Profile For Bidding of the 1st Scenario
for the Bid Amount of \$700,000

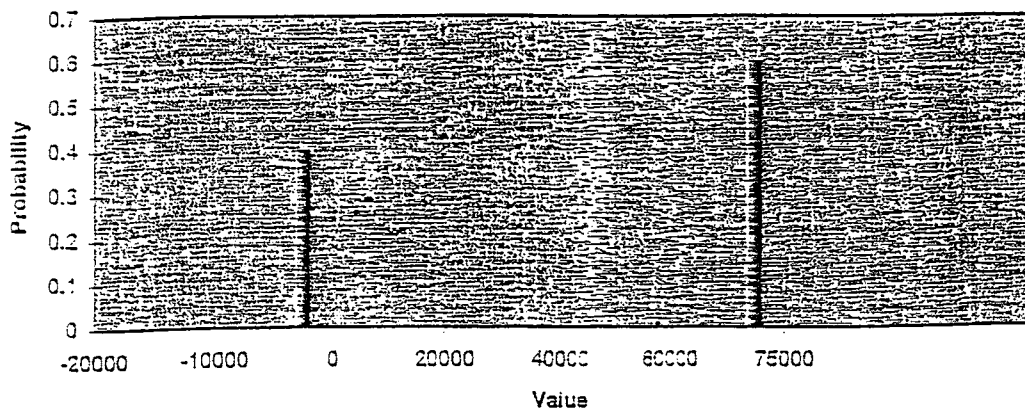


Risk Profile For Bidding of the 1st Scenario
for the Bid Amount of \$750,000

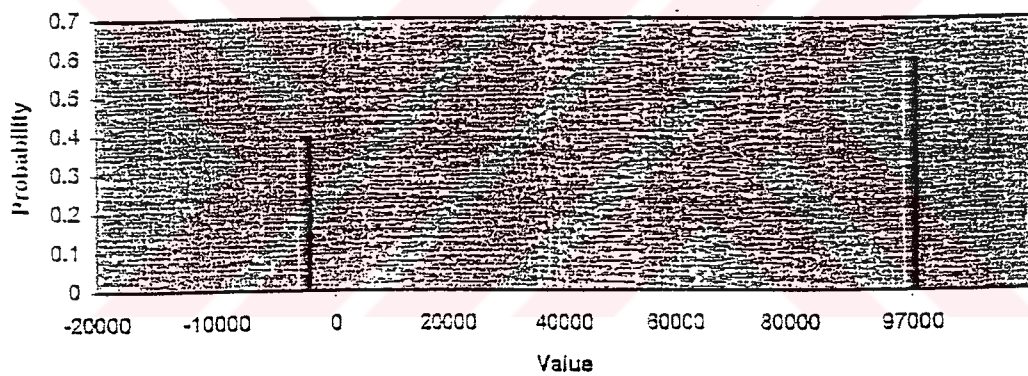


RISK PROFILE

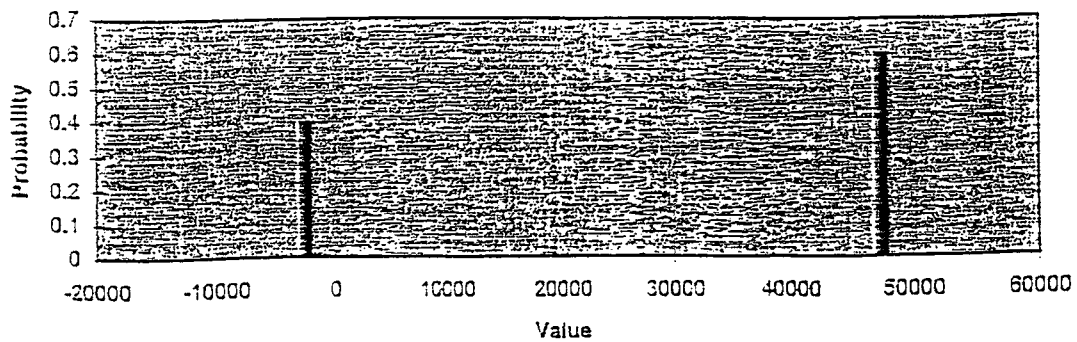
**Risk Profile For Bidding of the 2nd Scenario
for the Bid Amount of \$725,000**



**Risk Profile For Bidding of the Optimistic Scenario
for the Bidding Amount of \$750,000**

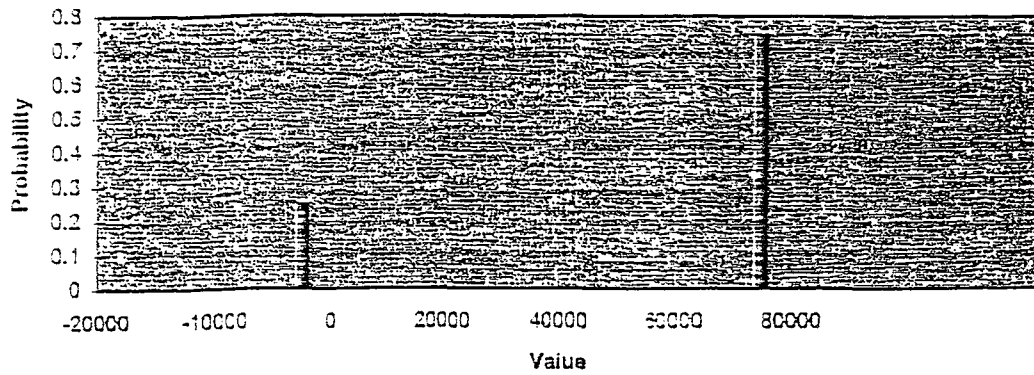


**Risk Profile For Bidding of the Pessimistic Scenario
for the Bid Amount of \$700,000**

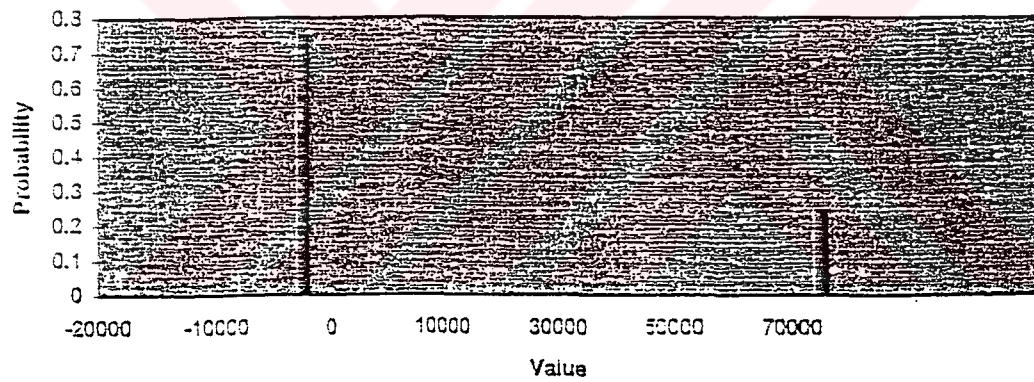


RISK PROFILE

Risk Profile For Bidding of the Optimistic Scenario
for the Bidding Amount of \$725,000



Risk Profile For Bidding of Pessimistic Scenario
for the Bidding Amount of \$725,000



7. RÜZGAR ENERJİSİNİN GELECEĞİ

7.1 2015 Yılında Dünya Elektrik Enerjisi Talebi

Önümüzdeki 20 yıl içinde elektrik enerjisinin en hızlı büyüyen enerji kaynağı olması beklenmektedir. 2015 yılında elektrik enerjisi talebinin 19 trilyon kWh olması beklenmektedir. Bu da yıllık % 2,6 büyüme hızına denk gelmektedir.

Amerika Birleşik devletleri dünyanın en büyük elektrik enerjisi tüketici olmasına karşın, enerji artışı bakımında sadece %1,6 lık bir büyümeye tekabül eder ki, bu da ortalama büyüme hızı olan %2,6 nın oldukça gerisindedir. Diğer yandan, gelişen Asya ülkelerinin en hızlı büyüyen kullanıcılar olması beklenmektedir. Elektrik enerjisi talebi arttıkça, kömür özellikle Çin ve Hindistan'da birinci dereceden enerji kaynağı olarak kalmaya devam edecektir. Nükleer enerji payı ise tepe noktasına ulaşmış olup, nükleer enerji payının düşmesi beklenmektedir. Kömür , doğal gaz, ve yenilebilir kaynakların nükleer enerjinin yerini alması beklenmektedir. Oysa yenilebilir kaynakların bu büyümede en büyük payı alması beklenmektedir. Örneğin, 1977 Şubat ayında, İsveç hükümeti ülkenin elektrik enerjisi ihtiyacının %50 lisini karşılayan nükleer enerji santrallerini kapatacağını açıkladı. Bu açığı telafi etmek için, hükümet fosil olmayan enerji kaynakları kullanımını desteklemeye başladı. Diğer endüstrileşmiş ülkelerde çevre kirliliğini azaltmak için önlemler almaya başlamışlardır. Amerika çevre koruma derneğine göre, elektrik enerjisi endüstrisi en büyük çevre kirleticidir. Ve bu endüstri ülkedeki kirlenmeye yol açan SO₂ nin %66, NO_x ın %29, CO₂ nin %36, ve civanın %21 inden sorumludur. Dünyadaki 160 ülke 1977 yılında Japonya'da toplanarak karbondioksit ve

greenhouse gazlarını azaltmak üzerinde anlaştılar. Örneğin Amerika hükümeti 2008-2012 arasında, 1990 baz alınarak, %7 lik bir azaltmaya gideceğini belirtti. Bu gibi etkenler yenilebilir enerji kaynakları açısından geniş kapsamlı bir siyaset uygulanacağını göstermektedir.

7.2 Rüzgar Enerjisinin Geleceği

Amerika enerji bakanlığı raporuna göre rüzgar enerjisi düşen üretim maliyetleri sebebiyle, enerji kaynakları içinde en hızlı büyüyen enerji kaynağı olmaktadır. Rüzgar enerjisinin maliyeti kWh başına 5 sent e düşmüş olup, tahminlere göre maliyetin 2010 yılında 2 sente düşmesi beklenmektedir. 2005 yılında rüzgar enerjisi bakımında en büyük beş pazarın, Amerika, Hindistan, Çin, Almanya ve İspanya olması beklenmektedir.

Rüzgar enerjisi bol miktarda bulunmakta ve temiz bir enerji kaynağı özelliklerini taşımaktadır. Buna karşın ekonomik olması da gerekmektedir. Ekonomikliği de kWh başına maliyeti ve gereken yatırım miktarı ile belirlenebilir.

1980 li yıllardan beri rüzgar enerjisi yatırım maliyeti %80 oranında düşmüştür. Buna ek olarak bakım maliyeti de %80 oranında azalmıştır. Bu düşüşle birlikte rüzgar enerjisi santralleri için gereken yatırım miktarı kWh başına 800\$ değerine yaklaşmıştır. Buna ek olarak yukarıda da belirtildiği üzere kWh başına üretim maliyeti de 5 sent civarına gelmiş olup bu düşüşün devam etmesi beklenmektedir.

Aşağıdaki tablo 7.1 de rüzgar enerjisinin maliyetlerinin nasıl düştüğü özetlenmiştir:

Tablo 7.1 Rüzgar Enerjisindeki Gelişme

Teknoloji	1980	1997	2000`den sonra
KWh başına maliyet	0,35\$-0,40\$	0.05\$-0.07\$	<0,04\$
KWh başına yatırım maliyeti	2000\$-3000\$	500\$-800\$	<500\$
İşletim süresi	5-7 yıl	20 yıl	30 yıl

7.3 Düşen Üretim Maliyetleri

Ekonomi ölçeği enerji maliyetinin düşmesine katkıda bulunmaktadır. Gelecekteki rüzgar santralleri kesinlikle ölçek olarak günümüzdeki santrallere göre daha büyük olacaktır. Ve buna bağlı olarak kanatların süpürdüğü alanın her metrekare için maliyeti boyutla düşecektir. Kanat alanının DM/m^2 için fiyat aralığı 800-1200 DM/m^2 den , 500-800 DM/m^2 ye düşmüştür.

Teknoloji ve ekonomi ölçeğinin birleşik katkısı ile, üretim maliyeti düşüş göstermektedir. Yeni ürünlerin ortaya çıkışı rekabeti de getirmiştir. Fiyatların bu azalmasında öğrenme eğrisinin etkisi de bulunmaktadır.

8. SONUÇLAR

Bu çalışma, bir rüzgar santralının kurulmasına ilişkin fiyatlandırmaya ve teklif miktarına karar vermeye ilişkin bir yöntemi sunmaktadır. Tezden çıkarılan diğer sonuçlar da aşağıda anlatılmıştır.

Rüzgar enerjisi kullanımı en hızlı yaygınlaşan enerji çeşididir. Tamamen temiz bir enerji kaynağı olup, yeryüzünde, tüm kıtalara yayılmış bir şekilde sınırsız olarak bulunmaktadır. Bu belirtilen artılara ek olarak rüzgar enerjisinin maliyeti hızla düşmektedir. Maliyetin 2013 yılında 3 UScents/kWh civarına düşmesi beklenmektedir. Bunlara ek olarak, son 6 yıl içinde rüzgar türbinleri satışında %40 lık bir artış olmuştur ki bu da bu pazarın büyümeye ne kadar müsait olduğuna dair en güzel işaretlerden biridir.

Tüm bu olumlu yanlara karşın yapılması gereken bazı şeyler vardır. Bunlar;

- Her ülke ve potansiyeli olan yerler için hedefler belirlemek.
- Fosil bazlı yakıtlar için devlet yardımlarının kesilmesi.
- Rüzgar enerjisinin kullanımını arttıran yasal düzenlemelerin faaliyete sokulması.

KAYNAKLAR

- [1] **Mukund R. Patel**, 1999. Wind and solar power systems. CRC Press, New York.
- [2] **Winston and Albright** 2000. Practical Management Science, Prentice Hall, Washington
- [3] **EWEA**, 2000. Wind energy technology, www.windenergy.com
- [4] **EWEA**, 2000. Wind energy and the environment, www.windenergy.com
- [5] **EWEA**, 2000. The economics of wind energy, www.windenergy.com
- [6] **EWEA**, 2000. Wind force report, www.windenergy.com
- [7] **Namık Orhun** 2001. Çanakkale Wind Farm Project, ALSTOM

TC YATIRIM MENKUL DEĞERLER A.Ş.
DOKÜMAN NO: 2009/10