

RÜZGAR TÜRBİNİ KANADI TASARIMI
Devrim Tuna
Yüksek Lisans Tezi
Çorlu Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Havva AKDENİZ

T.C
NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜZGAR TÜRBİNİ KANADI TASARIMI

Devrim TUNA

ÇORLU MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Yrd. Doç. Dr. Havva AKDENİZ

TEKİRDAĞ- 2009

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

RÜZGAR TÜRBİNİ KANADI TASARIMI

Devrim Tuna

Namık Kemal Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çorlu Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Havva AKDENİZ

Günümüzde giderek artan dünya enerji talebini karşılamak için düşünülen alternatif enerji kaynakları arasında yer alan rüzgar enerjisi giderek önem kazanan bir enerji kaynağı haline gelmiş ve önemli bir gündem maddesine dönüşmüştür.

Ayrıca dünya üzerinde kullanılan fosil yakıtların atmosferdeki karbon emisyonunu giderek artırması sonucu yerküre giderek daha sıcak bir gezegene dönüşmekte ve tüm canlılar için çok ciddi bir tehlike oluşturmaktadır. Bu ısınmanın sonucu olarak iklim değişiklikleri ile birlikte kuraklık ve aşırı yağışlar gibi felaketler giderek insan varlığını tehdit eder bir boyuta ulaşmaktadır. Bu çalışmanın amacı rüzgar enerjisinin artan önemini vurgulamak, bir rüzgar türbini tasarımı için gerekli olan temel teorik bilgileri araştırmak ve küçük bir rüzgar türbini tasarımını gerçekleştirmektir.

Anahtar kelimeler: Rüzgar Türbini, Kanat, Polimer, Kalıp, Airfoil, NACA 4412

ABSTRACT

MSc.Thesis

WIND TURBINE WINGS DESIGN

Devrim Tuna

Namık Kemal University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Main Science Division of Mechanical Engineering Department

Supervisor: Assistant Prof. Havva AKDENİZ

We need much more energy today than ever, in order to supply this energy we are using the fossil fuel. Because of the increment the carbon emission in the atmosphere the temperature in the world is rising day by day.

By the excessive temperature, the mankind is face to face with drought, lack of food and severe flooding, so we have to use the renewable energy resources to prevent the world from these impacts .

The most important of these resources is the wind energy. Improving turbine technology today, is bringing down the cost of the wind energy, and making it easier to use wind turbines widespread.

The aim of this project is to research the basic theory about the wind energy and to design a small wind turbine .

Keywords: Wind Turbine, Chord, Polymer, Mold , Airfoil, NACA 4412

ÖNSÖZ

Teknolojik ve endüstriyel gelişmelerin sonucunda enerji ihtiyacı artarak, dünya fosil yakıt (kömür, petrol ve doğal gaz) rezervlerini her geçen gün azaltmaktadır. Fosil yakıt rezervleri bazı ülke toprakları altında bulunmakta, aralarında Türkiye'nin de bulunduğu bazı ülkeler dış alımla temin ettikleri enerji için büyük harcamalarda bulunmaktadır. Böylece, enerji rezervine sahip ülkelere, sahip olmayanlar bağımlı kalarak, enerji rezervleri siyasi baskı ve yatırım unsuru olarak kullanılmaktadır.

Yapılan araştırmalara göre 1-2 asırlık ömrü kalan fosil yakıtlar dinamik süreçte enerji isteminin artması ile, tüm dünyada alışlagelmiş enerji kaynaklarının geliştirilmesinin nedenidir. Bu grupta nükleer olmayan alternatif kaynaklar yer almakta olup bunlar güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, deniz enerjisi ve biomas enerjisidir. 1990'dan sonraki gelişmelerle bu grup içerisinde atılımla öne geçen kaynak rüzgar enerjisi olmuştur. Rüzgar kurulu gücü hızla artmakta, rüzgardan elde edilen elektrik enerjisi öteki kaynaklardan elde edilen de rekabet edebilmektedir. Ayrıca güneş enerjisinin %1-2'lik kısmı rüzgar enerjisine dönüşmekte ve oluşan bu rüzgar enerjisi günlük miktarının %1'inde mevcut dünya enerji tüketimine eşit bulunmaktadır.

Enerjiye olan büyük ihtiyaç ve enerji maliyeti yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekli gündemde olmasının nedenidir. Alternatif kaynaklar diye de adlandırılan bu enerji kaynaklarından birisi de rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisinin kaynağı güneştir. Rüzgar denilen hava akımları, güneşin yer yüzünü ve atmosferi homojen ısıtmamasından kaynaklanan basınç ve sıcaklık farklarından doğmaktadır.

Rüzgar yüzyıllarca teknelerin yelkenlerini şişirmek, tarımsal ürünleri öğütmek ve su pompalamak gibi amaçlarla kullanılmıştır. Ancak bugün insanoğlu rüzgar enerjisinden elektrik üretmektedir. İnsanlık, yel değirmenlerinden, modern rüzgar santrallerine uzanan teknolojik bir süreç yaşamıştır. Yıllar önce kullanılan yel değirmenlerinde, rüzgar estikçe dönen pek çok kanat bulunmaktaydı, bugünün rüzgar türbinlerinde ise yalnızca iki veya üç kanat bulunmaktadır. Bu kanatlar, yel değirmenlerinde görüldüğünden çok daha uzun 25 m.'ye kadar olabilmektedir.

SİMGELER DİZİNİ

g	Yerçekimi ivmesi
F	Kuvvet
P	Basınç
E	Enerji
P	Güç
T	Sıcaklık
A	Alan
V	Hacim
g	İvme
ν	Kinematik vizkozite
ρ	Kütlesel yoğunluk
R	Direnç
C	Veter boyu
R	Türbin yarıçapı
B	Türbinin kanat sayısı
Λ	Uç hız oranı
$\acute{\alpha}$	Hücum açısı
β	Kanat ayar açısı
Φ	Göreceli rüzgar açısı
PD	Türbinden beklenen güç
CPD	Türbin güç katsayısıdır ve değeri 0,4- 0,45 arasında alınır
λ_r	r çapındaki uç hız oranı
λ_D	D çapındaki uç hız oranı
L	Kaldırma kuvveti
D	İteleme kuvveti
VT	Türbin hızı
VR	V ile VT nin bileşeni
PT	Türbin tarafından üretilen güç
A_t	Türbinin taradığı alan
V	Rüzgar hızı
C_p	Güç etkinlik katsayısı

η_g	Jeneratör etkinlik katsayısı
η_d	Dizayn etkinlik katsayısı
P	Numuneye uygulanan yük
D	Bilye çapı
d	İz çapı
ÇD	Çekme dayanımı
BSD	Brinnell sertlik değeri
w	Açısal hız
R	Direnç

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi.....	1
1.1.1.Rüzgar Oluşumu.....	2
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Rüzgar Enerjisi Meteorolojisi.....	3
2.1.1. Rüzgar Verileri.....	3
2.1.2. Rüzgar Belirtileri.....	3
2.1.3.Rüzgar Enerjisi Uygulamaları	3
2.2. Rüzgar Enerjisine Genel Bakış	6
2.2.1. Dünya Rüzgar Enerjisi Potansiyeli.....	6
2.2.2. Rüzgar Gücünün Küresel Durumu.....	8
2.2.3. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli.....	9
2.2.4. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Gelişiminin Mevcut Durumu.....	9
2.2.5. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi İçin Mümkün Hedefler.....	12
2.2.6.Türkiye Rüzgar Hızı ve Potansiyeli Dağılım Haritaları.....	13
2.2.7. Avrupa da Rüzgar Enerjisinin Durumu.....	14
2.2.8. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliğinin Hedefleri.....	15
2.3. Rüzgar Türbinleri ve Jeneratörleri	15
2.3.1. Türbinlerin Tarihsel Gelişimi.....	15

3. MATERYEL VE YÖNTEM	22
3.1. Tasarım Stilleri.....	22
3.1.1. Yatay Eksenli Türbinler.....	22
3.1.2. Dikey Eksenli Türbinler.....	22
3.2. Modern Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Ana Elemanları.....	24
3.2.1. Kule	25
3.2.2. Kule Uzunluğunun Seçimi.....	26
3.2.3. Rotor Kanatları.....	26
3.2.4. Dişli Kutusu	27
3.2.5. Jeneratör.....	28
3.2.6. Rüzgar Türbinlerinde Yaw (yön saptırma) Mekanizması.....	29
3.2.7. Yaw Hatası	30
3.2.8. Kablonun Kıvrılmasını Önleyici Sistem.....	30
3.3. Rüzgar Türbinlerinde Hız Kontrolü	31
3.3.1. Adım veya Yavaşlama Kontrolü.....	31
3.3.2. Küçük Rüzgâr Türbinleri (<30 kW).....	31
3.3.3. Büyük Rüzgâr Türbinleri.....	33
3.3.4. Değişken Hızlı Çalışmayı Teşvik Eden Faktörler.....	35
3.3.5. Değişken Hızlı Sistemlerin Niteliği.....	35
3.3.6. Çok Hafif/Esnek Tasarımların Durumu.....	36
3.4. Enerji Üretim Kapasitelerine Göre Türbin İncelemesi	37
3.4.1. Küçük Rüzgâr Türbinleri (<1 kW – 30 kW).....	37
3.4.2. Orta Boy Rüzgâr Türbinleri (30 – 600 kW).....	41
3.4.3. Megawatt Ölçeğinde Tasarımlar.....	43
3.4.4. Deniz.....	44

3.4.5. Mevcut Teknolojide Ölçek Eğilimlerinin Değerlendirilmesi.....	47
3.5. Rüzgâr Çiftliği Teknoloji Sorunları.....	51
3.5.1. Rüzgâr Çiftliklerinde Rüzgârdan İstifade.....	51
3.5.2. Tesis Dengesi.....	52
3.5.3. Enerji Tahminleri ve Optimizasyon.....	52
3.6. Elektriksel Entegrasyon.....	54
3.6.1. Generatörü Başlatma ve Durdurma.....	54
3.6.2. Rüzgar Türbini + Dizel Sistemleri.....	54
3.6.3. Derece Kontrollü Türbinler.....	55
3.6.4. Bağımsız Çalışan Akü Şarj Eden ² İstemler.....	55
3.6.5. Alternatif Akımın Filtre Edilmesi.....	57
3.7. Rüzgar Türbinlerinin Dağıtım Şebekesine Bağlantısı.....	59
3.8. Rüzgar Türbinleri İletim Şebekesine Bağlantısı.....	59
3.9. Şebeke Üzerindeki Bozucu Etkiler.....	60
3.10. Elektriksel Uygulama.....	60
3.11. Şebekeye Katkıları ve Faydaları.....	61
3.11.1. Kayıpların Azaltılması.....	61
3.11.2. İletim Şebekesine Katkısı.....	61
3.11.3. Dağıtım Şebekesine Katkısı.....	62
3.12. Şebekeye Zararları.....	62
3.12.1. Sabit Durum Voltajı.....	63
3.12.2. Voltaj Aşaması Değişmeleri.....	63
3.12.3. Titreme.....	63
3.12.4. Harmonikler.....	63

3.12.5. Voltaj Dengesizliği.....	64
3.12.6. Güç Kalitesi.....	64
3.13. Çevresel Maliyetler ve Yararları.....	64
3.14. Standartlar ve Belgeleme.....	65
3.14.1.Rüzgâr Türbini Belgelemesi.....	65
3.14.2. Uluslararası Standartlar.....	65
3.15. Rüzgar Enerji Santrali İşletme ve Bakımı.....	66
3.15.1. Rüzgar Enerji Santrali (RES) İşletmeciliği.....	66
3.15.2. Rüzgar Türbinleri Periyodik Bakım.....	67
3.15.2.1. Yağlama.....	67
3.15.2.2. Sistem Testleri.....	67
3.15.2.3. Temizlik.....	68
3.16. Rüzgar Türbinleri İle ilgili Özel Konular.....	68
3.16.1. Kuş Ölümleri.....	68
3.16.2. Gölge Etkisi.....	68
3.16.3. Televizyon Yayınları.....	68
3.16.4. İklima Etki.....	69
3.17. Rüzgar ve Diğer Yakıtların Maliyet Karşılaştırması.....	69
3.18. Rüzgar Çiftliği İçin Gerekli Parametrelerin İncelenmesi.....	70
3.19. Gerçekçi Bir Yatırım İçin Gerekli İncelemeler	70

3.19.1. Teknik Fizibilite ve Mühendislik Tasarımları.....	71
3.19.2. Enerji Üretimi İncelemesi.....	71
3.19.3. Elektriksel Alt Yapı Tasarımı.....	72
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	73
4.1. Airfoil kanat.....	73
4.1.1. Airfoil Üzerindeki Açık ve Büyüklükler.....	74
4.1.2. Türbin Kanadına Etkiyen Kuvvetler.....	76
4.2. Uç Hız Oranlarının Hesaplanması.....	78
4.3. Rüzgar Türbinlerinde Betz Limiti, Güç ve Tork.....	80
4.4. Analiz.....	81
4.5. Türbin Kanadı İmalatı İçin Malzeme Seçimi.....	84
4.5.1. Reçineler.....	85
4.5.1.1. Termoset reçineler.....	85
4.5.1.2. Epoksi reçineler.....	85
4.5.2. Takviye Malzemeleri.....	87
4.6. Polimer Kompozit Malzemelerin Rüzgar Türbin Kanatlarında Kullanım Nedenleri.....	88
4.6.1. Yüksek Mukavemet ve Boyutsal Stabilite.....	88
4.6.2. Hafiflik.....	88
4.6.3. Korozyon Dayanımı	88
4.6.4. Tek Parça Üretim İmkânı	89
4.7. Rüzgar Türbin Kanatlarının Üretiminde Kullanılan Kalıplama Yöntemleri.....	89
4.7.1. El Yatırması Yöntemi.....	89
4.7.1.1. El Yatırması Yönteminin Avantajları	90
4.7.1.2. El Yatırması Yönteminin Dezavantajları.....	90

4.7.2.Vakum Torba (İnfüzyon) Yöntemi.....	90
4.7.2.1. Vakum Torba (İnfüzyon) Yönteminin Avantajlar.....	91
4.8. Kanat Üretim Prosesi.....	91
4.9. Üretilen Kanadın Mukavemet Testi.....	94
4.10.Sertlik ile Çekme Dayanımı Arasındaki İlişki	97
5. SONUÇ.....	98
6. KAYNAKLAR.....	99
TEŞEKKÜR.....	100
ÖZGEÇMİŞ.....	101

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. Türkiyenin Rüzgar Hızı Dağılımı.....	13
Şekil 2.2. Türkiyede Rüzgar Potansiyeli.....	13
Şekil 3.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini.....	23
Şekil 3.2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbini.....	23
Şekil 3.3 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Ana Elemanları.....	24
Şekil 3.4. Çeşitli Kule Tipleri.....	25
Şekil 3.5. Kule Uzunluğu Seçimi.....	26
Şekil 3.6. Rotor Kanatları.....	26
Şekil 3.7. Dişli Kutusu.....	27
Şekil 3.8. Yaw (yön saptırma) Mekanizması.....	29
Şekil 3.9. Kablonun Kıvrılmasını Önleyici Sistem.....	30
Şekil 3.10 Küçük Rüzgar Türbini Sayıları.....	40
Şekil 3.11 Orta Boy Rüzgar Türbini Sayıları.....	41
Şekil 3.12. Rüzgar Türbinlerin Nominal Güç Aralığı.....	42
Şekil 3.13. Kule Yüksekliğinin Ölçeklendirilmesi.....	47
Şekil 3.14. Büyük Rüzgar Türbinlerinin Nominal Güçleri.....	48
Şekil 3.15. Motor Yeri Kütlesinin Ölçeklendirilmesi.....	48
Şekil 3.16. Normalleştirilmiş Motor Yeri Kütlesinin Ölçeklendirilmesi.....	49
Şekil 3.17. Rüzgar Türbinlerinde Fiyat/kW Oranı.....	50
Şekil 3.18. Rüzgar Türbinlerinin Faaliyet Alanı.....	50
Şekil 3.19. Rüzgar Türbinlerinin Normalleştirilmiş Alanı.....	51
Şekil 4.1. Airfoil Kesiti.....	73
Şekil 4.2. Türbin Kanadı.....	74
Şekil 4.3. Airfoil Üzerindeki Açılı ve Büyüklükler.....	74
Şekil 4.4. Türbin Kanadına Etkiyen Kuvvetler.....	75
Şekil 4.5. Sürüklenme Katsayısının Hücüm Açısı ile Değişimi.....	76
Şekil 4.6. Kaldırma Katsayısının Hücüm Açısıyla Değişimi.....	76
Şekil 4.7. Airfoil Üzerinde Açılar.....	79
Şekil 4.8. Betz Limiti.....	81
Şekil 4.9. Ekzotermik Kimyasal Reaksiyonun Sıcaklık Değişimi.....	86

Şekil 4.10. Üretilen Kalıp.....	91
Şekil 4.11. Malzemenin Kalıba Dökülmesi.....	92
Şekil 4.12. Üretilen Kanat.....	92
Şekil 4.13. Üretilen Kanat.....	93
Şekil 4.14. Üretilen Kanat.....	93
Şekil 4.15. Deney Numunesi Alınmış Kanat.....	94
Şekil 4.16. Numune.....	95
Şekil 4.17. Numune.....	95
Şekil 4.18. Sertlik Ölçme Cihazı.....	96
Şekil 4.19. Sertlik Ölçme Cihazı.....	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1. Rüzgar Enerjisi Üretim Seçenekleri.....	4
Çizelge 2.2. Üretilen Enerjinin Kullanım Şekilleri	5
Çizelge 2.3. Enerji iletim Yöntemleri	5
Çizelge 2.4. 1990-2020 Yılları Arasında Dünya Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Güç Üretim Hedefleri.....	7
Çizelge 2.5. :Türkiye'de kurulma hazırlıkları sürdürülen rüzgar güç santralleri.....	10
Çizelge 2.6. Türkiye'de Rüzgar Enerjisi İçin Mümkün Hedefler.....	12
Çizelge 2.7 .Avrupada Rüzgar Enerjisinin Durumu.....	14
Çizelge 2.8 Avrupa birliğinin 2020 hedefleri.....	15
Çizelge 3.1.Jenaratörlerde kutup sayısı ile devir sayısı arasındaki ilişki.....	29
Çizelge 3.2. Küçük rüzgâr türbinlerinin güç ve hız ayarı.....	32
Çizelge 3.3. Adım veya yavaşlama arasında seçimde ana sorunlar.....	33
Çizelge 3.4. Adım veya yavaşlama karşılaştırması.....	34
Çizelge 3.5. Çalışma hızı bakımından tasarım seçenekleri.....	36
Çizelge 3.6. Küçük rüzgâr türbinleri dünya piyasası.....	38
Çizelge 3.7. Küçük rüzgâr türbinleri güç kapasiteleri.....	39
Çizelge 3.8. Mevcut Megawatt ölçeğinde rüzgâr türbinleri.....	43
Çizelge 3.9. Avrupa'nın denizdeki tesisleri.....	45
Çizelge 3.10. Rüzgar ve Diğer Yakıtların Maliyet Karşılaştırılması.....	69
Çizelge 4.1.Uç Hız Oranının Yarıçap ile değişimi.....	78
Çizelge 4.2. Yarıçap ile Airfoil Açılarının değişimi.....	80
Çizelge 4.3. Güzgar Hızına Bağlı Güç Üretimi.....	84
Çizelge 4.4. Bazı takviye Malzemeleri.....	87
Çizelge 4.5: Çeşitli Malzemelerin Çekme Gerilmeleri.....	98

1.GİRİŞ

Yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları olarak isimlendirilen alternatif kaynaklardan yararlanılması hidrolik enerji dışında, teknolojik gelişmelerinin yeniliği ve geleneksel kaynaklarla ekonomik açıdan rekabet edebilme güçlükleri nedeniyle, bugüne kadar arzulanan düzeye ulaşamamıştır. Bununla birlikte, jeotermal, güneş, rüzgar ve modern biyokütle enerjisi teknolojileri, bugün dünya enerji pazarlarında yer almaya başlamışlardır. Enerji bitkiler, fotovoltaik ve rüzgar enerjisi teknolojilerindeki Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir. Yeraltında ısı enerjisi depolanması özellikle gelişmiş ülkelerde hızlı bir yaygınlaşma sürecine girerken, hidrojen enerjisi teknolojisinde yoğun araştırmaların sürdüğü görülmektedir. Rüzgardan elektrik üretimi 100 yıl önce başlamıştır. 1950 yılı öncesinde daha çok 20-100kW'lık makineler üzerinde durulmuş olmakla birlikte, 1250kW'lık türbinler de yapılmıştır. 1980'li yıllarda yeni teknoloji ve malzemelerle yeniden gelişerek dizayn edilen ve maliyetleri düşürülen rüzgar türbinleri rüzgar elektriği için çağ açmıştır.

1.1. Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi

Rüzgar enerjisi kullanımı M.Ö. 2800 yıllarında Orta Doğuda başlamıştır. M.Ö. 17. Yüzyılda Babil kralı Harrîmurabi döneminde Mezopotamya'da sulama amacıyla kullanılan rüzgar enerjisinin, aynı dönemde Çin'de de kullanıldığı belirtilmektedir. Yel değirmenleri, ilk olarak İskenderiye yakınlarında kurulmuştur. Fransa ve İngiltere'de yel değirmenlerin kullanılmaya başlanması 12.yüzyılda olmuştur.18.Yüzyılın sonunda yalnızca Hollanda'da 10.000 yel değirmeni bulunuyordu. Buhar makinesinin yapılması ve odun, kömür gibi yakıtlardan kesintisiz enerji üretimine başlanması ile rüzgar enerjisi önemini yitiriyordu. Bununla beraber, rüzgar türbini denilen ve elektrik üretiminde kullanılan ilk makineler 1890'ların başlarında Danimarka'da yapılmıştır. Aynı dönemde, bu makinelerin geliştirilmesi için Almanya'da da önemli çalışmalar yapıldığı bilinmektedir. Rüzgar kuvvet makineleri yerlerini yakıtlı kuvvet makinelerine bırakırken, rüzgar enerjisi kullanımının sürmesi için yeni bir teknoloji de başlıyordu. Ancak 19.yüzyılda geliştirilen ilk rüzgar türbinlerinin verimleri düşüktü.

1961 yılında Roma'da birleşmiş milletler tarafından düzenlenen "Enerjinin Yeni Kaynakları Konferansında ele alınan üç kaynaktan biri rüzgar enerjisi idi. Böylece çok eskiden bu yana

tanınan rüzgar enerjisi, teknolojik gelişmelerle ele alınıyor, yeni ve yenilenebilir kaynaklar arasına sokuluyordu. 1961-1966 yılları arasında Almanya' da rotor çapı 35m olan 100kW'lık bir modelin geliştirilmesi üzerinde duruluyordu. 1970'lerde Danimarka'daki Gedser türbini, gücü 650 kW olan büyük türbinlerle değiştiriliyordu. Bu dönemde rüzgar jeneratörleri üzerinde İsviçre, Avusturya ve İtalya'da da teknolojik çalışmalar yapılmıştır. Amerika'da 1970'lerde büyük tip yatay eksenli makineler üzerinde yeniden çalışılırken, dikey eksenli Darrieus tipi makineler üzerinde de çalışmalar başlatılmıştır. Ucuz petrol döneminde güncellik kazanamayan rüzgar enerjisi, 1974-1978 yılları arasındaki yapay petrol bunalımlarının ardından daha da önem kazanmıştır.

Rüzgar enerjisinin gelişimine, 1980'li yıllarda Uluslararası Enerji Ajansı eşgüdümünde yürütülen araştırma geliştirme çalışmalarının büyük etkisi olmuştur. Artık, eski tip rüzgar jeneratörleri yerine modern ve çağdaş rüzgar enerjisi çevrim sistemleri (WECS) kurulmaktadır. Ayrıca, rüzgar türbini ile beraber, dizel motor ve güneş fotovoltaik jeneratörü içeren rüzgar-dizel-PV hibrid sistemlerde geliştirilmiştir.

Bir tüketiciyi besleyecek tek makine yerine, birden çok türbin içeren rüzgar çiftlikleri ile elektrik şebekeleri için üretim yapılır olmuştur. ABD, Danimarka, Hollanda, İngiltere ve İsveç 'in katkıları sonucunda, deniz üstünde, kıydan uzakta rüzgar santralleri kurulmuştur. Günümüzde şamandıra üzerine yerleştirilen rüzgar türbinleri' de vardır. (Şen 2000)

1.2. Rüzgar Oluşumu

Dünyadaki tüm enerji kaynakları (gelgit ve jeotermal enerji) hariç hepsi güneş kaynaklıdır. Güneşten dünyaya gelen enerji miktarı yaklaşık olarak 145.000.000.000.000 kWh tir. Bu büyük enerjinin yüzde 1-2 si rüzgar enerjisine çevrilir, bu enerji dünyadaki toplam fosil yakıt enerjisinin 50-100 katı büyüklüğünde bir enerjidir.

Dünyanın 0 enlemi yani ekvator yeryüzünün diğer bölgelerine oranla güneş tarafından daha fazla ısıtılır bu ısınmanın sonucu sıcaklığı artan hava atmosferde 10 km yüksekliğe kadar çıkar buradan güney ve kuzey kutuplarına doğru hareket eder. Eğer dünya kendi eksenini etrafında dönmeseydi bu sıcak hava kütleleri kuzey ve güney kutuplarına doğru hareket eder ve tekrar ekvatora dönerdi fakat dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesiyle bu hava hareketi dünyanın tümüne doğru yayılır ve yerel rüzgarları oluşturur.

Rüzgarda bulunan mevcut enerjinin etkin olarak kullanılabilmesi için rüzgar türbinlerinden yararlanılmaktadır. Bu enerji transferi rüzgarda bulunan kinetik enerjinin türbin kanatlarına aktarılmasıyla elde edilir.(Wiley 1997)

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Rüzgar Enerjisi Meteorolojisi

2.1.1. Rüzgar Verileri

Rüzgar, hız ve yön olmak üzere başlıca iki parametre ile belirlenir. Hızdaki ani dalgalanma ve değişikliklere “Hamle” adı verilir. Rüzgar hamlesi ve diğer parametreler özel cihazlarla ölçülür.

2.1.2. Rüzgar Belirtileri

Rüzgar oluşumuna yeryüzündeki farklı sıcaklık dağılımı neden olur. Enlem,kara,deniz,yükseklik ve mevsimler sıcaklık dağılımını etkiler. Okyanus ve deniz kıyısına sahip kara parçalarında sıcaklık farkı yüksek olduğu için rüzgar potansiyeli de yüksektir.

Meteorolojik ve Topografik açıdan rüzgarın olabileceği yerler aşağıda sıralanmıştır.

1. Basınç Gradyanının yüksek olduğu yöreler.
2. Yağışların sürekli esen rüzgara paralel olduğu vadiler.
3. Yüksek, engebesiz tepe ve platolar.
4. Yüksek basınç gradyanlı düzlükler ve sürekli rüzgar olan az eğimli vadiler.
5. Güçlü jeostrofik rüzgar alanlarının etkisinde kalan tepe ve zirveler.
6. Jeostrofik rüzgar ve termal gradyan alanına sahip kıyı şeritleri.

2.1.3. Rüzgar Enerjisi Uygulamaları

Rüzgar makineleri, rüzgarı kinetik enerjisini toparlayıp elektrik,mekanik veya ısı enerjiye çeviren sistemlerdir. Rüzgar enerjisi uygulamalarını etkileyen en önemli faktörler şunlardır.

- a. Uygulama Ortamının Özellikleri
- b. Rüzgar Enerjisinden yararlanması öngörülen birimin büyüklüğü (Konut, Çiftlik, Köy, Enterkonekte şebeke)
- c. Mevcut enerji kaynaklarının ulaşılabilirliği (Enterkonekte şebekenin uzaklığı, konvansiyonel yakıtların temin olanakları ve maliyeti)

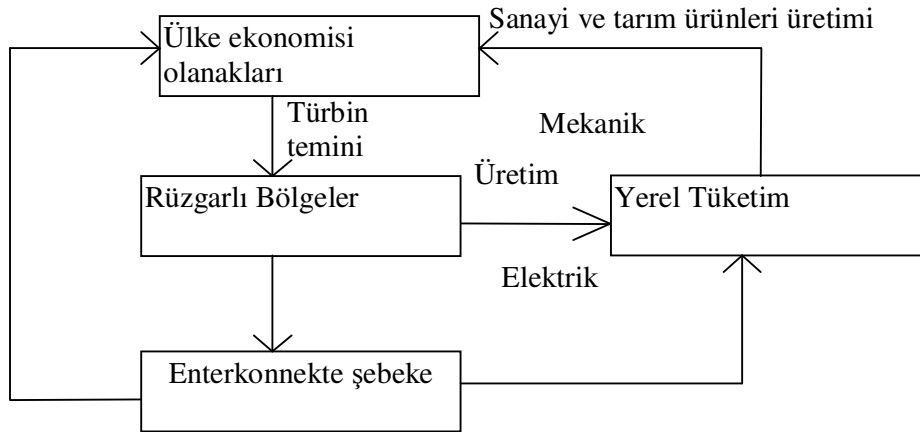
- d. Uygulamanın yapılacağı yörenin rüzgar özellikleri.
- e. Uygulamada yararlanılması öngörülen tüketicilerin şimdiki ve geleceğe ilişkin enerji gereksinimlerinin tür ve miktarı.
- f. Rüzgarı ikame edebilecek veya rüzgarla birlikte kullanımı mümkün diğer yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının durumu.

B. Uygulamada rüzgar enerjisi çevrim sistemini kullanımına ilişkin kısıtlar.

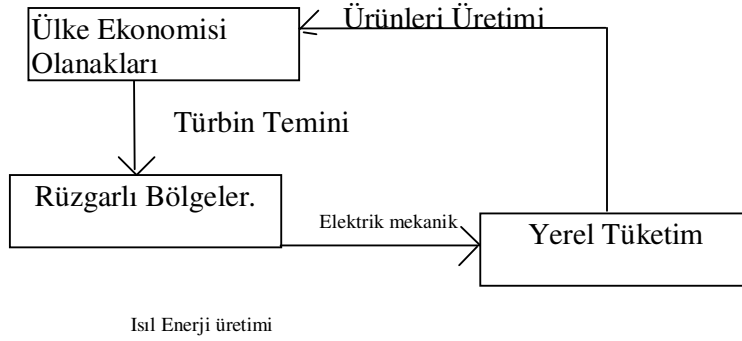
- a. Ulusal enerji politikalarının yenilenebilir enerji kaynakları kullanımına ve ilgi araştırma geliştirme çalışmalarına verdiği önem.
- b. Rüzgar enerjisi çevrim sistemlerinin teknolojik gelişkinlik düzeyi.
- c. İlgili uygulamanın gerektirdiği teknik bilgi birikimi ve personel mevcudiyeti.
- d. Uygulamanın maliyeti ve kaynak temini.

Rüzgardan elde edilen enerji üretildiği yerde tüketilmek veya enterkonnekte şebekeye verilmek zorundadır. Rüzgar enerjisi çevrim sistemlerinin enerji üretimleri rüzgar özelliklerine doğrudan bağlıdır. Bu nedenle rüzgar türbinleri sadece rüzgarlı yerlere yerleştirilebilir. Çizelge 2.1’de rüzgarlı bölgelerde rüzgar enerjisi üretim seçenekleri özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Rüzgar Enerjisi Üretim Seçenekleri

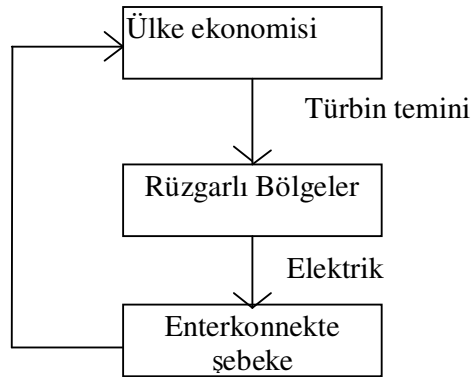


Çizelge 2.2. Üretilen Enerjinin Kullanım Şekilleri



- a .) Küçük veya orta büyüklükte rüzgar türbinleri tarafından üretilen enerjinin yerel talep fazlası enterkonnekte şebekeye verilir. ,
- b .) Ufak rüzgar türbinleri veya rüzgar dizel jeneratör sistemleri tarafından üretilen enerji yerel olarak tüketilir.
- c .) Rüzgar çiftlikleri veya büyük rüzgar türbinleri tarafından üretilen enerji enterkonnekte şebekeye verilir.

Çizelge 2.3. Enerji iletim Yöntemleri



Tüketicilerin gereksindiği enerji tür (elektrik, mekanik, ısı) ve miktarı ile yörenin rüzgar özellikleri kullanılacak rüzgar enerjisi tipi (tasarım hız ve gücü) ve sayısını belirleyecektir. Bu kapsamda enerjinin mümkün olan en yüksek verim ile eldesi bu enerjinin kullanılabilceği alanların en yaygın bir biçimde tespiti önem kazanmaktadır.(Uyar 1985)

2.2. Rüzgar Enerjisine Genel Bakış

2.2.1. Dünya Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Dünyanın rüzgar enerjisi potansiyelini tahmin etmek ve belirlemek zordur. Fakat bilimsel çalışmalar, rüzgar enerjisi potansiyelinin % 10'unun kullanılmasıyla dünyanın elektrik enerjisi ihtiyacının tamamının karşılanabileceğini göstermiştir. Dünyanın bir yıllık ortalama rüzgar enerjisi potansiyeli 42 Q olarak tahmin edilmektedir. Bu rakam güneş enerjisinin rüzgara dönüşen bölümünün yaklaşık bir günlük miktarını atmosferde kinetik enerji olarak depolandığını göstermektedir. Ancak bu potansiyelin en çok % 5 'inden yararlanılabilecek 25 Q 'a eşdeğer enerji kullanılmış olacaktır. Rüzgar enerjisi bakımından denizler, karasal alanlara göre daha büyük zenginlik göstermektedir. 1990-1995 Yılları arasında Avrupa Birliği kapsamında, kıyıda uzaklığa ve su derinliğine bağlı olarak deniz üstü rüzgar türbini kurulma olasılığına göre potansiyel belirleme çalışması yapılmıştır. Kıyıda 10 km açıklıkta ve 10 m derinlikteki alanların potansiyeli 700 Twh/yıl iken, kıyıda uzaklığı 30 km ve su derinliği 40 m olan yerde 3500 Twh/yıl düzeyine çıkmaktadır. Oysa Avrupa Birliğinin elektrik tüketimi 1727 TWh/yıl kadardır. (EWEA)

Çizelge 2.4. 1990-2020 Yılları Arasında Dünya Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Güç Üretim Hedefleri.

(Yerebakan, 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

ÜLKE	ÖNGÖRÜLEN POTANSİYEL	HEDEF (Kurul Kapasitesi)
ÇİN	1600 GW	2000 Yılı 200 MW
DANİMARKA		1993 Yılı 200 MW 2000 Yılı 1000 MW 2010 Yılı 2000 MW
FİNLANDİYA	11-16 TWh/Yıl	2000 Yılı 20-35 MW 2010 Yılı 800 MW
ALMANYA	2.7 GW (Ekonomik Potansiyel)	1995 Yılı 250 MW
YUNANİSTAN	6.4 TWh	2000 Yılı 150 MW
HİNDİSTAN	20 GW	2000 Yılı 5000 MW
İTALYA		2000 Yılı 3000 MW
ÜRDÜN		2010 Yılı 50 MW
HOLLANDA		1991 Yılı 150 MW 2000 Yılı 1000 MW 2010 Yılı 2000 MW
NORVEÇ	14 TWh/Yıl	
İSPANYA		1993 Yılı 100 MW
İSVEÇ	30 TWh / Yıl	1996 Yılı 100 MW
İNGİLTERE	45 TWh / Yıl Karada 230 TWh / Yıl Deniz üstünde	
ABD	2500 GW	1993 Yılı 1500 MW 2000 Yılı 4000-8000 MW
B.D.T	2000 TWh /Yıl	

2.2.2. Rüzgar Gücünün Küresel Durumu

Rüzgar gücü yenilenebilir enerji teknolojilerinin en ileri ve ticari olarak mevcut olanıdır. Tamamen doğal bir kaynak olarak kirliliğe neden olmayan ve tükenme olasılığı olmayan bir güç sağlamaktadır. Son yıllarda dünyanın en hızlı büyüyen enerji kaynağı olmuştur.

1998 sonuna gelindiğinde dünya çapındaki hemen hemen 50 ülkede 10 000 MW 'dan fazla elektrik üreten rüzgar türbinleri çalışmaktadır. Son altı yılda rüzgar türbinlerinin satışlarındaki ortalama yıllık büyüme % 40 civarında gerçekleşmiştir. Rüzgar enerjisi endüstrisi 600 kW büyüklüğünde orta boy makinelerin seri üretimini sürdürmekte ve megawatt büyüklüğündeki 10 adet tasarımın prototiplerini üretmiş bulunmaktadır. Mevcut kurulu kapasitedeki artış (500-600 kW tan 1,5 MW a 3 kat) çarpıcıdır ve 1990'dan bu yana çok hızlı bir gelişme gerçekleşmiştir. Büyük ünitelerin ortaya çıkışı, endüstrinin büyük deniz üstü uygulamalara hazırlandığından dolayı, zamanında gerçekleşmiştir.

Son yıllarda rüzgar enerjisinin en başarılı pazarları, özellikle Danimarka, Almanya ve İspanya olmak üzere Avrupa ülkeleridir. Arasında Hindistan, Çin ve Güney Amerika'nın da bulunduğu bazı gelişmekte ülkelerin yanı sıra Amerika Birleşik Devletlerinde de bu teknolojinin kullanımında bir sıçrama görülmektedir. Rüzgar enerjisi bir dizi farklı ekonomi ve coğrafi yapıda başarılı olmaktadır.

Rüzgar enerjisi aynı zamanda en ucuz yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Rüzgarlı yörelerde yeni geleneksel fosil yakıt ve nükleer üretimi ile daha şimdiden tümüyle rekabet edebilmektedir. Teknoloji iyileştikçe ve arazilerin kullanımı iyileştikçe maliyetleri de azalmaya başlamaktadır.

Çevresel üstünlükleri tanındıkça, bir çok ülke hükümet destekli girişimler ile rüzgar enerjisinin gelişimini desteklemeye başlamışlardır. Bu desteklerin hedefi pazarın hareketlendirilmesi, maliyetlerin düşürülmesi, konvansiyonel yakıtların örneğin devlet sübvansiyonları yoluyla sağladıkları hakça olmayan üstünlüklerinin etkisinin azaltılmasıdır. Farklı ülkelerde bir dizi Pazar hareketlendirme mekanizmaları kullanılmıştır. Araştırma ve geliştirme girişimlerinin desteklenmesi ve elektrik şebekesine rüzgar güç üreticileri için hakça erişim sağlanması teknolojinin sürekli başarısı için önemli unsurlardır.

2.2.3. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Türkiye'deki rüzgar enerjisi kaynakları teorik olarak Türkiye'nin elektriğinin tamamını karşılayabilecek yeterliliktedir. Fakat rüzgar enerjisinin sisteme girişinin tutarlı bir biçimde gerçekleşmesini kolaylaştırmak üzere gerekli altyapı tasarlanmalıdır. EİKT Avrupa Ülkelerinde Rüzgar Enerji Potansiyelinin bir özeti aşağıdaki Tabloda verilmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi Türkiye Avrupa'da rüzgar enerjisi potansiyeli en ümit verici olan ülkedir. Türkiye'nin teknik potansiyeli 83.000 MW dır. Bu, Türkiye'nin biran önce kullanması gereken önemli bir rüzgar enerjisi potansiyeli olduğunu göstermektedir. Türkiye'nin Anadolu ve Rumeli kısımlarına dengeli bir dağılımla seçilen 20 meteorolojik istasyon çevresinde Türkiye Rüzgar Atlası çalışmaları Dr. Tanay Sıdkı Uyar ve çalışma arkadaşları tarafından 1989 yılında tamamlanmıştır. Bu çalışma meteoroloji istasyonlarında toplanan verilerin rüzgar enerjisinden yararlanmak amacıyla yapılacak çalışmalarda kullanılabilir düzeyde temsili olmadığını kanıtlamıştır. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği TÜREB' in kuruluşundan sonra yatırımcılar, akademisyenler, imalatçılar ve diğerleri Türkiye'de rüzgar enerjisi gelişimini desteklemek üzere bir araya geldiler. 1996 yılında da ETKB' nin Türkiye'de rüzgar enerjisi kullanımına ilişkin politikası pek iyimser değildi. Resmi açıklamalar Türkiye'de rüzgar enerjisi gelişimine çok şans tanımıyorlardı. Son üç yıldır, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği'nin çabaları ve ETKB ile Elektrik İşleri Etüt İdaresinin (EİEİ) TÜREB çalışmalarına katılımı sonrası Türkiye'deki rüzgar enerjisi potansiyeli kabul görmeye başlamıştır.(Yerebakan 2001)

2.2.4. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Gelişiminin Mevcut Durumu

Bugüne kadar ETKB tarafından değerlendirilen 39 adet Rüzgar Çiftliği projesi bulunmaktadır. Bu projelerin toplam kapasitesi 1370 ila 1440 MW ' dır. Bu 39 projenin, 215 MW 'lık kapasiteye sahip 8 tanesinin yatırımcılarla yapılan görüşmeleri sonuçlandırılmıştır. (Çizelge 2.5)

Çizelge 2.5. Türkiye'de Kurulma Hazırlıkları Sürdürülen Rüzgar Güç Santralleri

(KIZILTUĞ,2002, Wind Energy , The graduation Thesis at the Technical University of İstanbul)

Projenin Adı	Başvuran Firma	Yeri	Gücü (MW)
Çeşme Alaçatı Rüzgar Santrali	ARES A.Ş.	İzmir-Çeşme Alaçatı	7.2
Kocadağ Rüzgar Santrali	AS MAKİNSAN	İzmir-Çeşme Kocadağ	50.4
Çanakkale Rüzgar Santrali	AS MAKİNSAN	Çanakkale	30 MW
Bozcaada Rüzgar Santrali	DEMİRER HOLDİNG A.Ş.	Çanakkale Bozcaada	10.2
Mazıdağı Rüzgar Santrali	DEMİRER HOLDİNG A.Ş.	İzmir-Çeşme Alaçatı	39
İntepe Rüzgar Santrali	INTERWIND	Çanakkale-İntepe	30
Datça Rüzgar Santrali	DEMİRER HOLDİNG A.Ş.	Datça-Muğla	28.8
Datça Rüzgar Santrali	ATLANTİS TİCARET	Muğla-Datça	12.54
Yalıkavak Rüzgar Santrali	ATLANTİS TİCARET	Muğla-Bodrum Yalıkavak	7.92
Bandırma Rüzgar Santrali	ATLANTİS TİCARET	Balıkesir-Bandırma	15
Çeşme Rüzgar Santrali	PROKON	İzmir-Çeşme	12
Akhisar Rüzgar Santral	AK-EN (SASAŞ İNŞAAT)	Manisa-Akhisar	12
Akhisar Rüzgar Santrali	DEMİRER HOLDİNG A.Ş.	Manisa-Akhisar	30
Beyoba Rüzgar Santrali	ATLANTİS TİCARET	Manisa-Akhisar (Beyoba)	7.92
Karaburun Rüzgar Santrali	ATLANTİS TİCARET	İzmir-Karaburun	22.5
Hacıömerli Rüzgar Santrali	DEMİRER HOLDİNG A.Ş.	İzmir-Hacıömerli	45
Kocadağ Rüzgar Santrali	MAGE A.Ş.	İzmir-Çeşme	26.25

		(KOCADAĞ)	
Gökçeada Rüzgar Santrali	SİMELKO	Çanakkale-Gökçeada	5
Yaylaköy Rüzgar Santrali	MAGE A.Ş.	İzmir-Karaburun	15
Lapseki Rüzgar Santrali	ATLANTİS TİCARET	Çanakkale-Lapseki	15
Şenköy Rüzgar Santrali	AKFIRAT A.Ş.	Hatay-Şenköy	12
Belen Rüzgar Santrali	TEKNİK TİCARET	Belen-Hatay	20-30
Kumkale Rüzgar Santrali	DEMİRER HOLDİNG A.Ş.	Çanakkale-Kumkale	12.6
Mazıdağı-2 Rüzgar Santrali	DEMİRER HOLDİNG A.Ş.	İzmir-Çeşme	90
Mazıdağı-3 Rüzgar Santrali	YAPISAN LTD.	İzmir-Çeşme	39.6
Kapıdağ Rüzgar Santrali	AS MAKİNSAN	Erdek-Balıkesir	20-35
Karabiga Rüzgar Santrali	AS MAKİNSAN	Karabiga-Çanakkale	15-50
Yellice Belen Rüzgar Santrali	AS MAKİNSAN	Yellice-Belen Karaburun	70-100
Zeytinbağ Rüzgar Santrali	Deryalar LTD.	Bursa-Zeytinbağ	30-60
ÇERES (Çeşme) Rüzgar Santrali	INTERWIND LTD.	Çeşme	18-25.5
Taştepe Rüzgar Santrali	FORA A.Ş.	Taştepe-Bandırma	37.8
Kocaali Rüzgar Santrali	DERİN LTD.	Tekirdağ-Şarköy	31.2
Topdağ Rüzgar Santrali	DERİN LTD.	Sinop	33
Paşalimanı Rüzgar Santrali	AS MAKİNSAN	Kapıdağ-Marmara	9
Seyitali Rüzgar Santrali	DERİN LTD.	Aliağa	51
Güzelyer Rüzgar Santrali	ENDA Enerji Üretim A.Ş.	Çeşme	50.4
Yenişakran Rüzgar Santrali	YAPISAN İNŞAAT LTD.	Aliağa-Bahçedere	54
Ekinli Rüzgar Santrali	DERİYALAR LTD.	Karacabey-Bandırma	39.6

ETKB' nin 9 Eylül 1999 da açtığı YİD Modeli ile Rüzgar Güç Santralleri Yapıtılması konusundaki resmi ihale gündemdeki toplam proje sayısını 55e çıkartmıştır. Böylece Türkiye'de gerçekleşme aşamasına girmiş rüzgar güç santrallerinin toplam kurulu gücü 1700 MW 'a ulaşmıştır. İhale sistemi eğer Türkiye'de hali hazırdaki rüzgar enerji gelişim potansiyelini sınırlamak için getirilmemiş ise Türkiye'deki rüzgar enerjisinin sağlıklı gelişimine katkıda bulunabilecektir. Rüzgardan üretilen elektriğe, kirletici emisyonlar olmadan üretilcek elektriğin çevresel yararlarını yansıtan, hakça bir bedel ödenmesi ve iyi organize olmuş bir kurumsal alt yapı ve rüzgar enerjisinin planlama yönetmeliklerinin hazırlanması durumunda, Türkiye'de rüzgar enerjisi kurulu gücünün gelişiminde kolayca aşağıdaki hedeflere ulaşılabilir.(Kızıltuğ 2002)

2.2.5. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi İçin Mümkün Hedefler

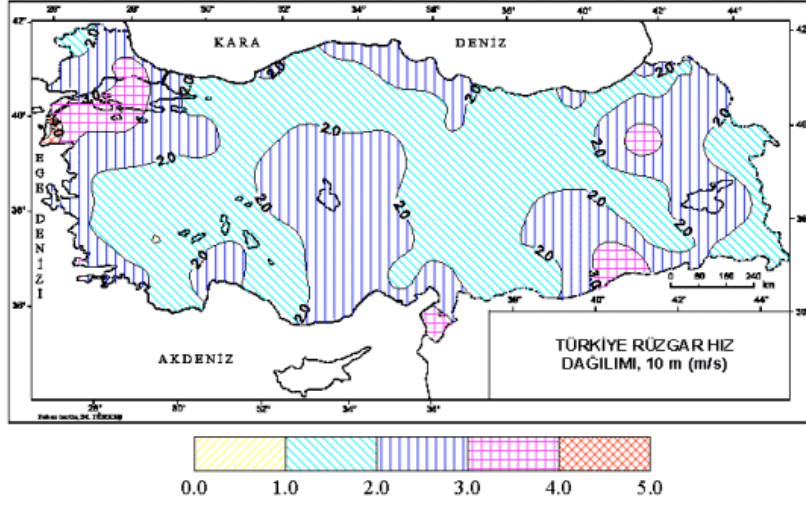
Çizelge 2.6. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi İçin Mümkün Hedefler

(Kızıltuğ,2002, Wind Energy , The graduation Thesis at the Technical University of İstanbul)

Yıl	Kurulu Kapasite (MW)
2000	400
2003	1400
2005	5000
2010	10.000
2020	20.000

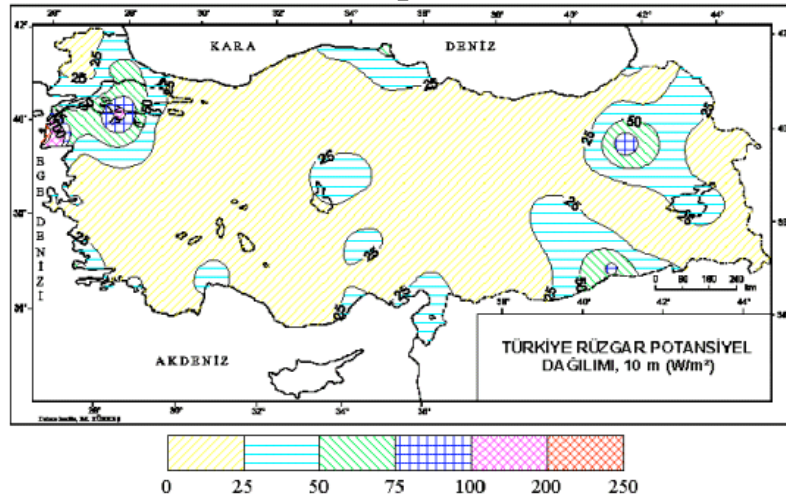
Rüzgar enerjisinin geliştirilmesine gereken önem verilerek pazar yaratıldığında Türk Endüstrisi rüzgar gücü santrallerinin imalatına kolayca adapte olabilecektir. Yeni kurulan rüzgar çiftliklerinin kuleleri yerel olarak imal edilmeye başlanmıştır (Çizelge 2.6)

2.2.6. Türkiye Rüzgar Hızı ve Potansiyeli Dağılım Haritaları



Şekil 2.1. Türkiyenin Rüzgar Hızı Dağılımı

www.ruzgarenerjisibirliigi.org.tr



Şekil 2.2. Türkiyede Rüzgar Potansiyeli

www.ruzgarenerjisibirliigi.org.tr

2.2.7. Avrupa'da Rüzgar Enerjisinin Durumu

Geçtiğimiz altı yıl boyunca Avrupa'da kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi yılda %40 oranında artmıştır artmıştır. Bugün Avrupa'daki rüzgar enerjisi projeleri 5 milyon civarında insanın yerel gereksinimlerini karşılayacak yeterlilikte elektrik üretmektedir.

Çizelge 2.7 .Avrupada Rüzgar Enerjisinin Durumu

(Yerebakan 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

ÜLKE	Eylül 1999 sonu kurulu kapasite	2010 için öngörülen kapasite (MW)
Danimarka	1606	2645
Finlandiya	32	218
Fransa	22	621
Almanya	3817	6774
Yunanistan	79	265
İrlanda	73	334
İtalya	227	872
Hollanda	405	1179
Portekiz	60	221
İspanya	1180	5580
İsveç	197	896
İngiltere	350	1313
Diğer Ülkeler	91	905
Toplam	8139	21833

Rüzgar enerjisi endüstrisi Avrupa için 2010 yılına kadar 40,000 MW rüzgar enerji kapasitesi kurmak üzere bir hedef koymuştur. Bu hedefe ulaşılmasıyla yaklaşık 50 milyon insana elektrik sağlanacaktır. "2010 da 40,000 MW" kampanyası, Avrupa Komisyonu'nun "AB 'deki

Yenilenebilir Enerji Kaynakları için Beyaz Rapor" 'u tarafından da desteklenmektedir. Bu raporda yapılan değerlendirme bu hedeflere erişilebileceğini göstermektedir.(Yerebakan 2001)

2.2.8. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliğinin Hedefleri

Çizelge 2.8 Avrupa birliğinin 2020 hedefleri

(Yerebakan, 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

YIL	Kurulu kapasite
2000	8000 MW
2010	40000 MW
2020	100000 MW

20 türbinden oluşan tipik bir rüzgar çiftliği yaklaşık 1 km² (100 hektar) lik alana kurulabilmektedir. Diğer güç istasyonlarına nazaran rüzgar çiftliği, bulunduğu alanın sadece % 1'ini kullanır. Tarım alanlarında çiftçilik faaliyetleri türbinlerin hemen altında yapılabilmektedir. Türbinler çalışma hayatlarının sonuna geldiklerinde kolayca sökülebilmekte ve buldukları alan eskiden kullanıldığı hale dönüştürülebilmektedir. Türbinlerin sökülmesinin maliyeti genelde türbinlerin arta kalan parçaların parasal değeri ile karşılanabilmektedir(Yerebakan 2001)

2.3. Rüzgar Türbinleri ve Jeneratörleri

2.3.1. Türbinlerin Tarihsel Gelişimi

Rüzgara karşı konan engelin hareket yeteneği rüzgar enerjisini mekanik enerjiye çevirir. Bu mantıktan hareketle, bir mil etrafında dönebilecek olan tanburun veya pervanenin rüzgar etkisi ile dönmesi mümkün olabilecektir. Bu düşünce ilk defa yel değirmenleri ile anlaşılmıştır. Yelkenli gemiler de rüzgar enerjisini mekanik enerjiye çeviren sistemlerdir. Günümüzde bu mantık,

rüzgarın dönel bir türbin ile frenlenerek, mekanik enerjiye dönüştürülmesi teknolojisi ortaya çıkmıştır. Bu teknolojiye rüzgar türbini adı verilmektedir.

Rüzgar türbinleri, bir rotor, bir güç şaftı ve rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine çevirecek bir jeneratör kullanırlar. Rüzgar rotordan geçerken, aerodinamik bir kaldırma gücü oluşturur ve rotoru döndürür. Bu dönel hareket jeneratörü hareket ettirir ve elektrik üretir. Türbinlerde ayrıca, dönme oranını ayarlayacak ve kanatların hareketini durduracak bir rotor kontrolü bulunur. Rüzgar şiddeti yükseklikle arttığı için rüzgar türbinleri kule tepelerine yerleştirilir

Günümüzde kullanılan fosil yakıtların bulunmadığı veya bilinmediği zamanlarda insanlar su ve rüzgar kuvvetlerinden yararlanarak mekanik iş yapmaya başlamışlardır. Tarih süreci içinde rüzgar gücünden istifade etmek önceleri düşey milli yel değirmenleri daha sonra da kuzey Avrupa'da ilk uygulamalarına rastlanılan yatay milli yel değirmenlerinin kullanılması ile başlamıştır. Yel değirmenlerinin bu gelişme serüveni, yüzlerce yıl sadece tarımsal sulama ve hububat öğütme aşamalarını aşmamıştır. Ancak insanoğlunun, akışkanın kinetik enerjisini, tork enerjisine dönüştürme bilgisi, yel değirmenleri ile keşfedilmiştir

Türkiye'de son yıllarda gittikçe artan enerji darboğazı, üretimin sabit kalması ya da çok az artması tüketimin ise çok büyük bir hızla artması karşısında, gelecekte de büyüyecek bir sorun olarak karşımızda duruyor. Bu durum karşısında ülkemizin doğal kaynaklarından yararlanarak alternatif enerji sistemlerinin uygulanması, soruna genel ve kesin olmayan, ancak gelecek için umut verici bir çözüm olması nedeniyle gün geçtikçe artan bir önem kazanıyor. Bu enerji kaynaklarından rüzgar, ülkemizde de çok iyi değerlere sahip olması, sınırsız, temiz, çevreyi kirliletmeyen bir enerji kaynağı olması dolayısıyla öne çıkıyor.

Rüzgar enerjisi kullanımının dünyadaki örneklerine baktığımızda iki kısımda incelenmesi gerektiğini görüyoruz. Küçük türbinler olarak adlandırılabiliriz, kişisel kullanıma yönelik sistemler, ve büyük türbinler adını alan endüstriyel kullanıma yönelik sistemler.

Büyük türbinler, rüzgar çiftliği olarak adlandırılan diziler halinde kurulur. Bir rüzgar çiftliğinin toplam gücü 1-150 MW arasındadır. Tek bir türbinin gücü 50kW'tan 2MW'a kadar olabilir. Ancak günümüzde ekonomik şartlar açısından 500kW'tan küçük türbinler pek fazla kullanılmamaktadır.

Büyük türbinler yatırım amaçlı olarak kurulurlar. Üretilen enerji şebekeye verilir. Bu yüzden yatırımdan önce yapılması gerekli olan bazı çalışmalar vardır. Öncelikle bölgenin rüzgar açısından

durumunun belirlenmesi gerekir. Yapılan ayrıntılı ve en az bir yıl sürecek teknik rüzgar ölçümleriyle, rüzgar hızı ortalamaları, günlük, mevsimlik ve yıllık dağılımlar ile yaklaşık rüzgar enerjisi değerleri belirlenir. Bunun ardından yapılacak olan fizibilite çalışmaları sonucunda, kurulacak olan santralın büyüklüğü, türbinlerin yerleri ve güçleri, üretilecek enerjinin maliyeti gibi sonuçlara ulaşılır. Bu çalışmalarda, bölgesel elektrik kurumlarıyla ve devletle yapılacak olan anlaşmalar, alınacak özel izinler, çevre halkının yaklaşımı, bölgedeki konvansiyonel elektriğin maliyeti, yıllık harcama miktarı, arazinin fiziksel yapısı, finansman ve kredi politikası gibi parametreler önemli rol oynar.

Büyük türbinlerden elde edilen elektriğin maliyeti yukarıda da sayılan birçok parametreye bağlıdır. İyi rüzgar sahalarında ortalama şartlarda, rüzgardan elde edilen elektrik enerjisinin maliyeti 5cent/kWsaat değerine kadar düşmektedir. Termik, hidroelektrik vs. konvansiyonel kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisinin maliyetinin bu değerden yüksek olması ve yıllık harcamanın 100 000kWsaat'i aşması durumunda rüzgar enerjisi üretimi ekonomik bir çözüm olarak düşünülebilir. Ancak bunun için bölgedeki rüzgar potansiyelinin uygun olması gerekir. Büyük türbinlerin üretime başlaması için gereken rüzgar hızlarını bir yaklaşım olarak değerlendirirsek, bölgedeki ortalama rüzgar hızının 5-7m/s (18-25km/saat) civarında olması gerektiğini söyleyebiliriz. Tabi ki bu kesin bir sonuç değildir. Yatırımın ekonomik olup olmadığının belirlenmesi için tüm yıla yayılan bir dağılımın çıkarılması şarttır.

Büyük türbinlerden oluşan rüzgar çiftliklerinin yatırım maliyeti kabaca bir yaklaşımla 1000 \$/kW'dir. Yıllık bakım masrafı ise yatırımın %1-1,5'i olarak gerçekleşir. Bu şartlar altında kurulacak türbinlerden elde edilen elektrik enerjisi, şebekeye; maliyeti düşük, çevreyi kirletmeyen, güvenli ve yenilenebilir bir kaynaktan üretilmiş olarak verilir.

Küçük Türbinler, genellikle şebekenin olmadığı ya da ulaştırmanın ekonomik olmadığı , ya da sorunlu olduğu yerlerde uygulanır. şehir dışı yerleşimler, çiftlik evleri, telekomünikasyon aktarıcıları, radyo ve orman kuleleri, askeri tesisler, demiryolu sinyalizasyonu, balık çiftlikleri, seralar, maden ocakları, deniz vasıtaları ve bazı fabrikalarda küçük türbinler oldukça uygun kullanım alanları bulmaktadır. Üretilen enerjinin depolanmasıyla güvenilir enerji sağlanır. Küçük türbinlerin güç değerleri, 0,05-20kW arasındadır. En fazla 4 adet hareketli parçadan oluşan bu tip türbinler bakımsız, ya da çok az bakımlı olarak dizayn edilmişlerdir. İşletme giderleri neredeyse yoktur. Her türlü çevre şartlarına dayanabilecek şekilde dizayn edilirler. Otomatik kontrol mekanizmaları, sistemi aşırı şarjdan koruyan kontrol sistemleri vardır ve ayrıca çok yüksek rüzgar hızlarında otomatik korunmalı dizayn edilmişlerdir.

şebekeye elektrik enerjisinin verildiği büyük türbinlerin aksine, küçük türbinlerde bu sistem uygulanamaz. Akü şarjı esasına göre çalışan küçük türbinlerle, üretilen enerji, ihtiyaca göre seçilen akü bankasına şarj edilerek kullanılır. Güçleri 50W ile 20kW arasındadır. Bu güç değerleri, türbinin maksimum hızda dönmesi durumundaki gücü gösterir. Daha düşük hızlarda ise türbin elektrik üretmeyi daha düşük bir güçte sürdürür. Akü bankasının yeterli seviyede seçilmesi durumunda depolanmış enerji ihtiyaç duyulan güçte aküden çekilebilir.

Rüzgar türbini jeneratörünün çıkışına bağlanan elektronik şarj kontrol ünitesi ile AC çıkışı, DC'ye çevrilerek aküler şarj edilir. 500W'dan küçük türbinlerde bu ünite türbinin içine monte edilmiş olarak bulunur. Elektronik şarj kontrol ünitesi aküleri aşırı şarjdan korur. Bunun için akülerin tam dolu olması durumunda rüzgar hala esmeye ve türbini döndürmeye devam ediyorsa, türbinden gelen fazla enerji yük direncine aktarılır. Bu direnç hava ısıtan bir dirençtir. İsteğe bağlı olarak aynı değerlerde su ısıtan dirençler de kullanılabilir.

Gerekli olan akü bankası sistemin kurulduğu yerin şartlarına bağlıdır. Akülerin uzun ömürlü olmaları için şarj akımı, akü kapasitesinin %10'undan fazla olmamalıdır. Örneğin 600Ah bir akü bankası 60A'in üzerinde bir akımla şarj edilmemelidir. Ayrıca, kapasitenin %40'inin altına inecek kadar da aküler boşaltılmamalıdır (1.75V/hücre). Akü bankasının büyüklüğü, rüzgarsız geçecek 3-5 güne yetecek kadar olmalıdır. Bunun için günlük harcama miktarının iyi belirlenmesi ve seçimin buna göre yapılması gerekir. Daha az enerji harcayan cihazlar, örneğin elektronik dengeli ampuller kullanılarak güç ihtiyacının azaltılıp azaltılamayacağı değerlendirilmelidir.

Alternatif akım (AC) yükler için uygun kapasitede bir invertere gerek vardır. Piyasada mevcut olan inverterler genel olarak, 12, 24, 48, 96 ya da 120 VDC girişlidir. İnverterin gücü devamlı ihtiyaç duyulacak maksimum güç kadar olmalıdır. İnverter kendi maksimum gücünün 2-3 katı kadar anlık güçleri karşılayabilmelidir. En ucuz inverterler trapez dalga ile çalışırlar. Aşağı yukarı bütün ev aletleri bu dalga biçiminde elektrikle çalışır. Fakat bazı özel durumlarda, örneğin ölçme aletlerinde ve hassas ev aletlerinde tam sinüs akıma ihtiyaç duyulmaktadır.

Doğru akımla çalışan cihazlar kullanmak daha verimlidir. Genel olarak, 12 veya 24VDC ile çalışan ev aletleri bulunmaktadır. Fakat hem 220VDC ile çalışanlara göre daha pahalıdır, hem de seçenek azdır.

Küçük rüzgar türbinleri, çeşitli nedenlerle dizel sistemlerle birlikte kullanılabilirler. Mevcut bir dizel jeneratör varsa, yakıt sarfiyatını azaltmak için böyle bir çözüme gidilebilir. Ya da rüzgar

türbini ana ihtiyacı karşılamak için kullanılabilir; dizel jeneratör de arada bir devreye sokularak daha yüksek güç ihtiyaçlarında ya da düşük rüzgar zamanlarında sisteme destek olmak amacıyla kullanılabilir.

Amerika Birleşik Devletleri'nde rüzgar çiftliklerinin toplam kurulu gücü 1700MW dolaylarındadır. Yıllık üretim miktarı ise 3 milyar kW saat kadardır. İyi rüzgar sahalarının bulunduğu Hollanda, Danimarka, Almanya gibi ülkelerde de rüzgar enerjisi konusunda önemli atılımlar yapılmış, üretim ve kurulu güç açısından bu ülkeler dünya çapında öncü konumuna gelmişlerdir. Ülkemizin rüzgar potansiyelleri göz önüne alındığında elimizdeki sınırsız ve dünya çapında oldukça iyi durumda olan rezervleri kullanamadığımızı görüyoruz. Özellikle kıyı bölgelerimiz olmak üzere rüzgar ve arazi bakımından oldukça iyi bir durumda olan Türkiye'de ne yazık ki bugüne kadar rüzgar enerjisi üzerinde yapılan çalışmalar çok düşük seviyede kalmış, böylece çok üstün bir teknoloji gerektirmeyen bir enerji kaynağından yıllardır mahrum kalmıştır. Avrupa Topluluğu tarafından öngörülen, gelecekte yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin toplam üretime oranı olan %2'lik değere ulaşılması için hızlı bir şekilde çalışmaların ilerletilmesi gerekmektedir.

Ülkemizde henüz çok yeni ve tanınmamış bir kaynak olan rüzgar enerjisinin tanıtımı ve yaygınlaştırılması için konuyla ilgili tüm kişi, kuruluş ve örgütler ile medyaya ve devlete de büyük is düşüyor. Özellikle yerli kaynak, malzeme, teknik bilgi ve işgücü kullanılarak üretilen türbinler, iç pazarda olduğu kadar dış pazarlarda da rekabet edebilecek düzeyde olacaktır. Yakın gelecekte bu tip çalışmaların artmasıyla, büyük yerleşim birimlerinin elektriğini sağlayan, büyük türbinlerden oluşan rüzgar çiftliklerinin kurulması, Türkiye'nin enerji darboğazından kendi çabalarıyla kurtulup enerji ihraç eden bir ülke konumuna gelmesine yardımcı olacaktır.

53 m. çapında 1,25 MW'lık Smith Putnam rüzgâr türbini 1939 yılında ABD, Vermont, Granpa's Knob'da kuruldu. Bu tasarım zamanın en iyi mühendisleri ve bilim adamlarını bir araya getirdi (Aerodinamik tasarım: Von Karman, dinamik analiz: Den Hartog) ve rüzgâr türbini 1980'li yılların megawattlık bazı makinelerden daha uzun süre başarı ile çalıştı. Teknolojik gelişmede dönüm noktası oldu. Standardın altında yerinde kaynak tamiri nedeniyle (bir kanadını kaybederek) arızalandı.

Kaynaklar üzerinde savaş zamanı ve 1970'li yılların petrol krizine kadar rüzgâr enerjisinin aleyhine seyreden yakıt maliyetleri bakımından ekonomik ortam baskılarından dolayı tamir edilmedi. Bu projeden alınan tasarımın kalitesi, makine dinamiği, yorulma, yer seçimi hassasiyeti

vs. gibi değerli dersler büyük ölçüde unutuldu ve daha sonra özellikle Kaliforniya vergi kredileri ile bağlantılı olarak rüzgâr çiftlikleri kurulması sırasında acılı bir şekilde tekrar hatırlandı.

Rüzgâr türbini geliştirilmesinde bir sonraki dönüm noktası Gedser rüzgâr türbinidir. Marshall planı savaşı sonrası finansman yardımı ile 1956 – 57’de Danimarka’nın güney doğusunda Gedser adasında 200 kW’lık 24 m. çapında bir rüzgâr türbini kuruldu. Bu makine 1958 – 1967 arasında %20 kapasite ile çalıştı.

1960’lı yılların başında Prof. Ulrich Hütter 100 kW’lık 34 m.’lik bir 2 kanatlı, yüksek rüzgâr hızlı kararsız pervanesi olan Hütter Allgaier rüzgâr türbinini geliştirdi. Hütter’in yüksek hızlı esnek tasarım fikirleri Almanya’da ve diğer alanlarda rüzgâr türbini araştırmalarını çok etkiledi.

Bu üç makine rüzgâr türbini geliştirilmesinde 3 farklı yönün başlangıcını temsil eder; ticari sahnede andan şimdi görünen megawattlık makineler, piyasaya son 15 yıldır hâkim olan Danimarka tarzı makineler ve halen büyük ölçüde gerçekleştirilmemiş bulunan daha da hafif makineler. Boru şeklinde bir kule, 3 kanat ve uç frenleri içeren basit, sağlam bir tasarım olan Gedser makinesi daha sonraki genel Danimarka tasarımlarının tüm bileşenlerine sahipti. 1977 yılında yenilendi, modern Danimarka rüzgâr teknolojisinin geliştirilmesi için araştırma esası sağlayan bir test makinesi olarak donatıldı ve çalıştırıldı.

1980’li yılların başında pervane kanat teknolojisinin pek çok sorunu araştırıldı. Çelik pervaneler denendi ancak çok ağır olduklarından, alüminyum pervaneler yorulma direnci açısından çok belirsiz olduklarından reddedildiler ve ABD’de Gugeon Brothers’ın geliştirdiği tahta epoksi sistemi çok sayıda küçük, büyük rüzgâr türbininde kullanıldı. Ancak kanat imalat endüstrisinde tekne imalinden evrimleşmiş ve 1980’li yıllarda Danimarka’da iyice yerleşmiş fiberglas polyester konstrüksiyon hâkimdi.

ABD’de Kamu Hizmetlerini Düzenleyici Politikalar Yasası (PURPA) içeren 1978 Ulusal Enerji Yasası ile bağımsız enerji üretimine Pazar temin edildi. 1980 yılında merkezi devlet ve federal devlet enerji ve yatırım vergi kredileri toplam %50’ye yakın vergi kredisi sağlıyordu ve bu California rüzgâr enerjisi patlamasını başlattı. 1980 – 1995 arasında, çoğu vergi kredilerinin %15 civarına indirildiği 1985’ten sonra olmak üzere 1700 MW rüzgâr kapasitesi kuruldu.

Vergi kredileri en azından başlangıçta çoğu kötü tasarımı ve çalışırsa da kötü çalışan rüzgâr türbinleri kurulduktan sonra California'da çeşitli bölgelerde (San Geronimo, Tehachapi ve Altamont Pass) gelişigüzel aşırı nüfuslanma yaratan bir piyasa uyarı mekanizması olarak çok değerli eleştiriler aldı. Ancak ilk yetersiz gelişime tepki olarak vergi kredileri nispeten düşük maliyetli, denenmiş teçhizata sahip Avrupalı, özellikle Danimarkalı rüzgâr türbini üreticilerine büyük bir ihracat fırsatı yarattı. California'da bunların daha iyi tasarımı rüzgâr türbinlerin teknik açıdan başarı ile çalışması rüzgâr enerjisi itibarının dünya çapında yerleşmesine çok katkıda bulundu.

California pazarı çoğu Avrupalı ve ABD şirketine hem iflas hem de ticari başarı getirdi. Ancak modern Avrupa rüzgâr teknolojisinin geliştirilmesine muazzam katkıda bulundu. Teknolojik etki iki yönde oldu; Danimarkalı üreticiler açısından en önemlisi imalat yöntemlerinin geliştirilmesine fırsat veren büyük bir pazar, parça maliyet azalması ve artan iş görürlüktü. İkincisi, tasarım çeşitliliği, hafif ve esnek parçalar ilgi duyulması gibi müstakbel teknoloji gelişmelerinin habercisi olması açısından değerli olmuştur. California rüzgâr çiftliklerinin çalışma deneyiminde, kanat kök bağlantısında ciddi sorunlar, kanat aerofolyo kesitinin bozulması nedeniyle performans düşüşü, eğimli sistemlerin aşırı ve yetersiz anlaşılması atmosfer çalkantısı nedeniyle hasar görmesi, yüksek hızlı mil fren sistemlerinin erken yorulması vs. karşılaşılan pek çok sorun arasındaydı ve teknoloji ilerledikçe adım adım çözüldü.

California'da rüzgâr enerjisinin büyümesine ABD'de başka bir yer destek vermemiş veya paralel büyüme sergilememiş olup yakın zamanlarda elektrik alanında düzenleme olmaması rüzgâr enerjisinin ABD'de ne yönde ilerleyeceğine dair büyük belirsizlik yaratmıştır ve ABD piyasası ancak şimdi 1997 yılında tekrar doğmaya başlamıştır.

Aksine, 1990'lı yılların başında Almanya'da yılda 200 MW civarında kapasite artışı ile kuzey Avrupa piyasalarında çarpıcı gelişme kaydedilmiştir. Bu katkıda bulunan patlamaya 3 faktör: ARGE desteği, Danimarka'dakine benzer geri alım politikası ve yüksek tarifeler. Teknolojik açıdan önemli sonuç Alman imalatçıların ve bazı yeni kavramların gelişmesiydi; yeni doğrudan tahrikli jeneratör teknolojisinin uygulanması kayda değerdir. Doğrudan tahrikli güç aktarma hatlarında, değişken hızlı elektrik ve kontrol sistemlerinde, alternatif kanat malzemelerinde ve diğer alanlarda adım adım ve önemli teknolojik gelişmeler olmuşsa da son yıllardaki en çarpıcı eğilim günümüzdeki megawattlık kapasitelerde makinelerin ilk ticari kuşağını yaratan daha da büyük rüzgâr türbinleri geliştirilmesi olmuştur. (Şen 2000)

3.MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Tasarım Stilleri

3.1.1. Yatay Eksenli Türbinler

Bu tür türbinler, dönme eksenleri rüzgar yönüne paralel, kanatları ise rüzgar yönüne dik olarak çalışırlar. Bu tür türbinler bu konuma, rotor kule üzerinde döndürülerek getirilir. Yatay eksenli türbinlerin kule üzerinde yatay eksen yönündeki hareketi, motorlar(rüzgar veya elektrik), rüzgara yönelik birimlerde kılavuz bir kuyruk ve rüzgarı arkadan gören birimlerde ise oluşturulan konik açı ile sağlanır.

3.1.2. Dikey Eksenli Türbinler

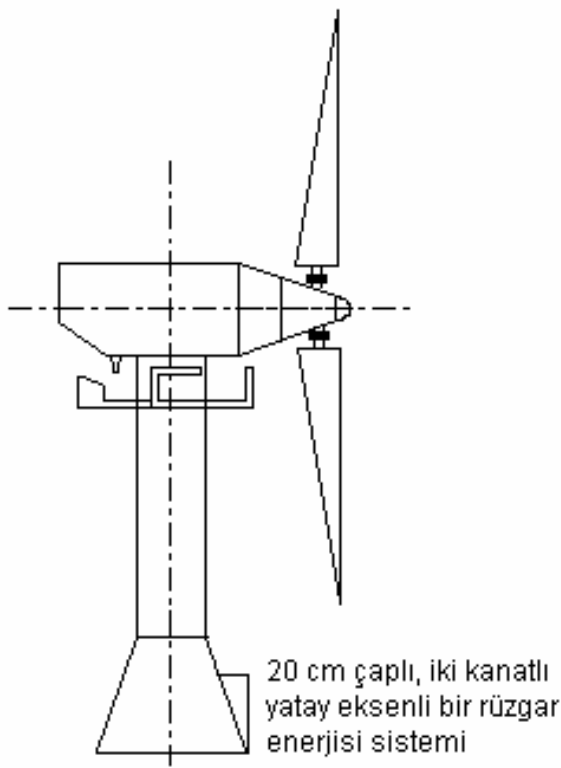
Dönme eksenleri rüzgar yönüne dik ve düşey olan bu türbinlerin kanatları da düşeydir. Bu türbinlerin rüzgarı her yönden kabul edebilme üstünlüğü vardır. Kanatların güç üretebilmeleri için rüzgardan daha hızlı dönmeleri gerektiğinden, ilk harekete geçişleri güvenli değildir. Giromill ise açısı değiştirilebilen kanatlara sahip olduğundan, kendi başına çalışmaya başlayabilir. Düşey eksenli türbinlerin bir diğer üstünlüğü ise makina aksamı, hız yükselticisi ve jeneratörün toprak üzerine konulabilmesidir. Günümüzde çeşitli ülkelerdeki elektrik enerjisi üretimi uygulamalarının çoğunluğunu 2 veya 3 kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri oluşturmaktadır. Büyük güçlü düşey eksenli uygulamalar da mevcuttur.

Dikey eksenli çok çeşitli tasarım geliştirilmiştir. Bunlara troposkein biçiminde “yumurta çırpıcı” rüzgâr türbini (adını mucidi Darrieus’tan alır, özellikle Flowind Corp. tarafından 1980’li yıllarda geliştirilmiştir), İngiltere’de Musgrave tarafından geliştirilmiş olan (sonradan Heidelberg Motor’un doğrudan tahrikli tasarımında benimsenen) düz kanatlar bulunan H şekli tasarım ve bazısı kanallı veya germe halatlı pervaneyi kuşatan kanatlar, bazısı Savonius tasarımını veya döner değirmen (gyromill) kavramını benimseyen çok sayıda varyant dahildir.

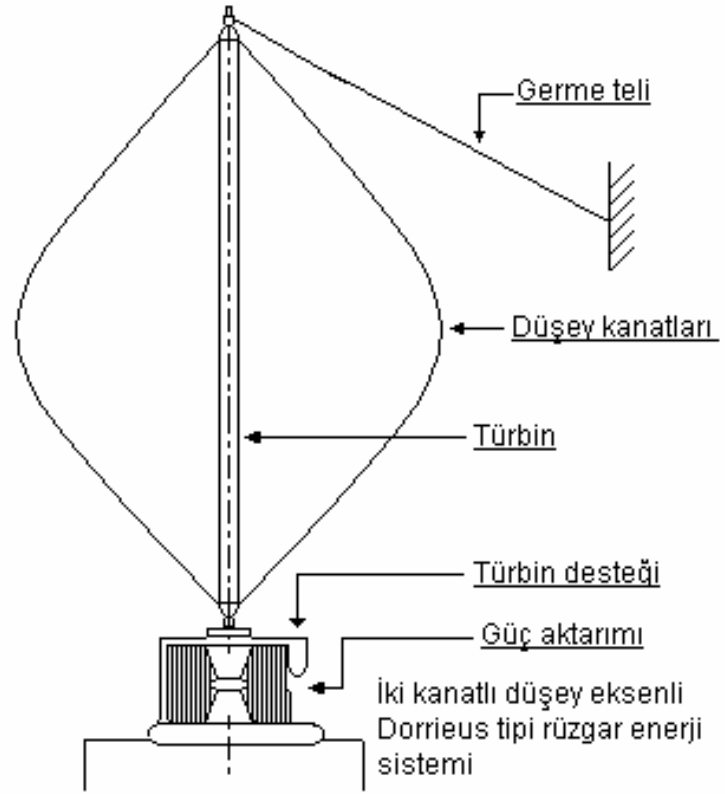
Dikey eksenli tasarımlar eğimli sistem gereğini ortadan kaldıran dönme simetrisi üstünlüğüne sahiptir. Tüm güç aktarma hattı ve güç tahvil donanımının zemin düzeyinde olabileceği sık sık iddia edilen bir üstünlük olmuş ancak bunun ana mil için uzun ve ağır bir tork borusu ve ana mil üzerinde dişli kutularının bozduğu çeşitli tasarımlar gerektirdiği belirlenmiştir. Ancak dikey eksenli tasarımların yatay eksenlilere göre dikkate alınmayan sakıncaları,

- tahrik torkunun pervane dairesinde kanat pozisyonuna göre çok değişmesi nedeniyle doğal olarak daha düşük olan (bazı pozisyonlarda negatif bile olabilen aerodinamik verimlilik),
- pervane sisteminde maliyeti arttıran önemli pasif destek yapısı.

Rüzgâr teknolojisinde çeşitli tasarım seçeneklerine ilişkin kararın verilmesi ertelenmişse de, oyların büyük çoğu şu anda yatay eksenli tasarımlar lehinedir.(Spinger Werlag)



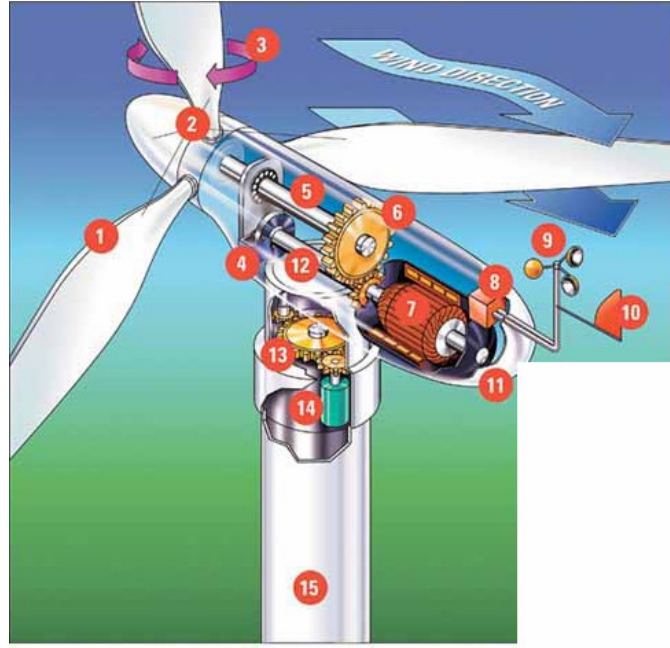
Şekil 3.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini



Şekil 3.2..Dikey Eksenli Rüzgar Türbini

3.2. Modern Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Ana Elemanları

Yer konumuna göre, rotoru yatay eksende çalışan yatay eksenli rüzgar türbinleri, daha geleneksel ve daha modern bir kullanımı sunarlar. Modern yatay eksenli kanatlı rüzgar türbinlerini oluşturan ana elemanlar aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 3.3 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Ana Elemanları

1. Kanatçıklar
2. Rotor
3. Otomatik açı kontrolü
4. Hidrolik fren
5. Düşük hız mili
6. Dişli kutusu
7. Jeneratör
8. Kontroler
9. Ananometre
10. Yön kanadı
11. Fan
12. Yüksek hız mili
13. Yaw mekanizması
14. Yaw mekanizması motoru
15. Kule

3.2.1. Kule

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

Tüp şeklindeki kule şekli en çok tercih edilen kule şeklidir. Şekil a da tüp şeklinde kule kullanılan rüzgar türbinleri görülebilir. Genellikle 20 – 30 metre yükseklikte üretilir.

Kafes yapılı kuleler çelik profillerin kaynaklanarak birleştirilmesi ile oluşturulur. (Şekil 3.4.) En temel avantajları maliyetlerinin düşük olmasıdır. Benzer boyutlarda bir tüp kulenin hemen hemen yarısı kadar malzeme ve yapım maliyeti vardır.

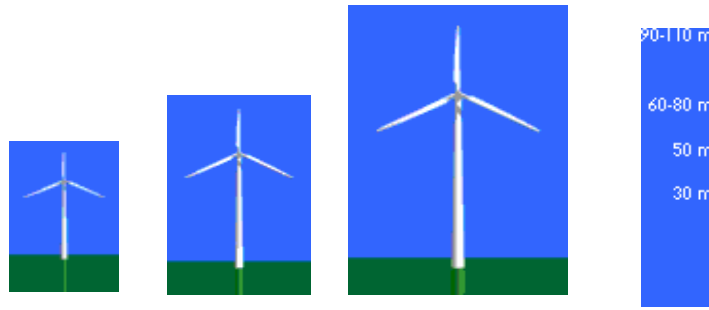
Birçok küçük türbin halat destekli direk tipi kule kullanılarak inşa edilir. En büyük avantajı ağırlığının çok az ve maliyetlerinin çok düşük olmasıdır.(Şekil 3.4) de bir bu kule tipine bir örnek görülüyor. Dezavantajları ise araziye kurulum zorluğu ve tarım alanlarının kullanımını engellemesidir .



Şekil 3.4. Çeşitli Kule Tipleri

3.2.2. Kule Uzunluğunun Seçimi

Büyük bir türbinden küçüğüne oranla daha büyük bir güç elde edileceği muhakkaktır. Eğer ağağıdaki şekiller e bakacak olursak sırası ile 225 KW , 600 KW ve 1500 KW lık türbinleri görebiliriz.



Şekil 3.5. Kule Uzunluğu Seçimi

Bu türbinlerin güçleri gibi büyüklüklerinin de farklı olduğu açıktır. Ayrıca büyük güç elde etmek için jeneratörün daha büyük olması, onu tahrik içinde daha büyük kanatlar gerekir. Kanat boyunun uzaması demek doğal olarak kule boyunun da uzaması anlamına gelir. Ancak unutulmaması gereken husus, her 10 metre ekstra uzunluğu için 15.000 \$ ekstra maliyet olduğudur.

Kısaca kule ve kanat boyutları elde edilen gücün maliyete oranı ekonomik olduğu sürece büyük seçilebilir .(www.windpower.org)

3.2.3. Rotor Kanatları

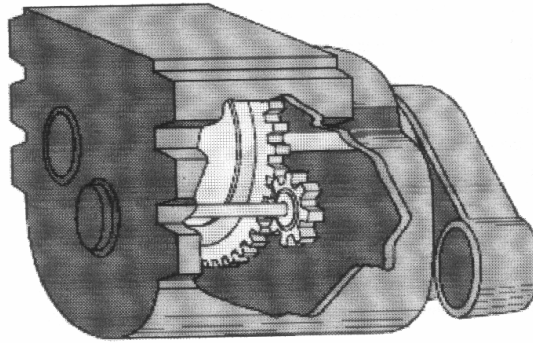


Şekil 3.6. Rotor Kanatları

Rüzgar türbinlerinin kanatları; alüminyum, titan, çelik, elyaf ile güçlendirilmiş plastik (cam elyafı, karbon elyafı ve aramid elyafı) ve ağaçtan imal edilmektedir. Modern rüzgar türbinlerinin kanatlarının hemen hemen tamamı, cam elyafı ile güçlendirilmiş polyester veya epoksi gibi, cam elyafıyla plastikten üretilirler. Çelikten üretilen kanatların eğilmeye dayanımı çok iyidir. Fakat, yorulma dayanımları ve korozyon sorunu yaratmaktadır. Alüminyum kanatlar, çeliğe göre daha hafiftir, yorulma dayanımları daha iyidir ve korozyona daha dayanıklıdır. Alüminyum malzemenin zayıf noktaları; kabuk şeklindeki malzemenin burkulması, imalat tekniğinin zorluğu ve pahalı olmasıdır. Cam elyafının kopma mukavemeti, 420 N/mm^2 ile St 52 çeliğinin kopma mukavemeti 520 N/mm^2 'ye yakındır.

3.2.4. Dişli Kutusu

Pervane muindeki enerji, jeneratöre bir dişli sistemi ile (örneğin, çevrim oranı; 1:15) aktarılır. Dişli sistemi, pervane milinin devir sayısını jeneratörün gerek duyduğu devir sayısına çıkarır. Örneğin Nortex Firması tarafında üretilen N 54 adlı, 1000 kW nominal güçlü rüzgar türbinlerinde dişli kutusunun çevrim oranı 1:70'dir. Bu türbinlerin jeneratörlerinde, rüzgar hızına göre otomatik olarak devreye giren 6 ve 4 kutup söz konusudur. 6 kutubun devrede olması durumunda, pervane rotorunun dakikadaki devir sayısı 14, jeneratör milinin dakikadaki devir sayısı 1000 ve türbin gücü 200 kW olurken; 4 kutubun devrede olması durumunda, pervane rotorunun dakikadaki devir sayısı 22, jeneratör milinin dakikadaki devir sayısı 1500 ve türbin gücü 1000 kW olmaktadır.



Şekil 3.7. Dişli Kutusu

3.2.5. Jeneratör

Rüzgar enerjisi tesislerinde kullanılan jeneratörler, alternatif akım veya doğru akım jeneratörleri olabilir. Burada elde edilen elektrik akımı, yetersiz kalitede alternatif akım veya doğru akım bile olsa, çeşitli güç elektroniği düzenekleriyle şebekeye uygun hale getirilebilir.

Doğru akım jeneratörleri, büyük güçlü rüzgar enerjisi tesislerinde tercih edilmemektedir. Bunun nedeni, sık bakım gereksinimi ve alternatif akım jeneratörlerine göre daha pahalı olmasıdır. Doğru akım jeneratörleri, günümüzde sadece küçük güçlü rüzgar enerji tesislerinde akülere enerji depolamak için kullanılır.

Direkt şebekeye bağlantı sistemlerinde; alternatif akım jeneratörlerini oluşturan asenkron veya senkron jeneratörlerin millerinin devir sayısı

$$N_{\text{senkron}} = 60.f/p \text{ (d/d)} \quad (1)$$

bağlantısı ile verilir. Burada f Hertz biriminde elektrik şebekesi frekansı, p çift kutup sayısı ve n dakikada devir sayısıdır. Dişlideki kayıplar ve gürültünün önlenmesi amacıyla, çok kutuplu jeneratörü olan dişli kutusuz türbinler de kullanılmaktadır. Bu bağıntıdan da anlaşılacağı gibi, jeneratörün kutup sayısı arttıkça, 50 Hz'lik elektrik şebekesi frekansına uygun akım için gereken jeneratör mili devir sayısı da azalmaktadır. Bu nedenle, yüksek kutup sayılı jeneratörlerde dişli kutusuna gerek kalmamaktadır.

Germiyan da otoproduktör sistemi ile kurulan, Alman Firması Enercon tarafından üretilen E-40 adlı dişli kutusuz rüzgar türbinleri, 84 kutupludurlar ve pervane milinin dakikada 38 devir yapması durumunda 500 kW'lık nominal güce ulaşmaktadır.

Şebeke bağlantılı alternatif akım jeneratörlerinde, sadece şebeke frekansını sağlayan devir sayısında elektrik enerjisi üretebilmektedir. Bu da, rüzgar türbininden örneğin sadece 8 m/s için optimum yararlanmak demektir. Bu nedenle, rüzgar türbinlerinin bazılarında, düşük ve yüksek rüzgar hızları için iki ayrı jeneratör kullanılmaktadır.

Rüzgar türbinleri senkron veya asenkron jeneratörlerle ve bu jeneratörlerin şebekeye doğrudan veya dolaylı bağlanmasıyla tasarlanır. Türbinler jeneratörün şebekeye bağlantı şekline göre çeşitli şekillerde seçilir. Direkt şebeke bağlantılı sistemlerde 3 fazlı AC jeneratörler kullanılır. İndirekt şebeke bağlantılı sistemle de üretilen gerilim çeşitli ara birimlerden geçirildikten sonra şebekeye uyumlu hale getirilir. Rüzgar türbinlerinde kullanılan senkron rotorlarındaki doğru akım şebekeden alınan besleme ile sağlanır. Şebekeden alınan AC doğrultularak DC ye çevrilir. Daha sonra rotorun sargılarına fırçalar aracılığı ile iletilir. Jeneratörün kutup sayısına ve dönüş hızına bağlı olarak

istenen frekansta gerilim üretilir. Aşağıda kutup sayısı ve dönüş hızına bağlı olarak frekans oluşumu tablosu verilmiştir.

Çizelge 3.1. Jeneratörlerde kutup sayısı ile devir sayısı arasındaki ilişki
(Danish Wind Industry Association , www.windpower.org)

FREKANS	50 HZ	60 Hz
Kutup sayısı	Dönüş hızı	Dönüş hızı
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600

Jeneratör hızı terimi sadece şebekeye bağlanan senkron makineler için geçerlidir. Asenkron jeneratörlerde böyle bir şey söz konusu değildir. Rüzgar türbinlerinde genellikle altı kutuplu makineler kullanılır. Jeneratörün düşük ya da yüksek hızlarda olması kullanılacağı türbinin büyüklüğüne ve maliyete bağlıdır. Büyük güçlü türbinlerde yavaş, küçük güçlülerde daha hızlı jeneratörler kullanılır. Jeneratörün şebekeye doğrudan bağlantısında jeneratörden elde edilen gerilim, üzerinde hiçbir değişiklik yapılmadan direk şebekeye verilir.

Dolaylı şebeke bağlantısında ise elde edilen gerilim bir dizi elektriksel aygıt vasıtasıyla şebekeye uygun hale getirildikten sonra şebekeye verilir.

3.2.6. Rüzgar Türbinlerinde Yaw (yön saptırma) Mekanizması



Şekil 3.8. Yaw (yön saptırma) Mekanizması

Genellikle bütün yatay eksenli türbinlerde kullanılır. Bu mekanizma ile motor, dişli kutusu ve rotor rüzgara doğru yöneltilir. Şekil 750 KW lık bir türbinin YAW mekanizması görülüyor. Şeklin en dışında YAW taşıyıcısı görülüyor. Daha içte YAW motoru tekerlekleri ve en içte YAW frenleri bulunur. Genellikle tüm üreticiler frenli YAW sistemlerini tercih eder. YAW mekanizması elektronik kontrolör ile çalıştırılır. Bu sistem YAW konumunu saniyede birkaç kez kontrol eder. Konum verileri rüzgar gülünden elde edilen yön bilgileri ile karşılaştırılıp YAW mekanizmasına gerekli komut verilir.

3.2.7. Yaw Hatası

Rüzgar türbinlerinde eğer rüzgar yönü rotora dik konumda ise bu duruma YAW hatası denir. Bu hata sonucu rotor enerjiden daha fazla şekilde yararlanır.

Bu durum çıkış gücünün kontrolü ile belirlenir. Diğer yandan YAW mekanizması rotoru bu konumdan alarak rüzgara doğru yöneltilir.

3.2.8. Kablonun Kıvrılmasını Önleyici Sistem

Jeneratörde üretilen elektrik enerjisi kulede aşağıya kablolar ile iletilir. Ancak kablolar YAW mekanizmasının hareketi ile bükülmeye uğrar, Bu hem mekanik hem de elektrik olarak kabloyu zorlayıcı ve zarar verici bir etkidir. İşte bu durumu önlemek için türbinlerde bu sisteme ihtiyaç duyulmuştur.



Şekil 3.9. Kablonun Kıvrılmasını Önleyici Sistem

3.3. Rüzgar Türbinlerinde Hız Kontrolü

3.3.1. Adım veya Yavaşlama Kontrolü

Adım veya yavaşlama kontrolü sorunu orta veya büyük rüzgâr türbinleri tasarımında çok zıtlaşan bir tartışmadan doğar. Küçük rüzgâr türbinlerinde ise seçenek daha fazladır.

Yavaşlama ayarı bu sorunu ele almazken, adım ayarı her iki sorunu adım sistem mekanizması ve ilgi kumanda kullanılması pahasına çözer.

Adım ayarında (kanatlara genellikle “aktif yavaşlama” denilen tasarım seçeneğinde yavaşlama durumuna kadar eğim verilmesi hali hariç) kanatlar pervanenin kanatları savurarak sağladığı gücü kanat aerofolyo kesitlerinin ürettiği kaldırma güçlerini azaltmak üzere ayarlarlar. Yavaşlama ayarının esası, pervane geometrisi değiştirilmeksizin, rüzgâr hızı ve ilgili akım açısı arttıkça pervane aerofolyolarının yavaşlamasıdır. Pervane veriminde artan kayıp, yavaşlama pervaneye yayıldıkça gücü ayarlar. Böyle bir yavaşlamanın meydana gelmesi için pervane hızının sabit tutulması zaruridir ve bunu genellikle elektrik şebekesine bağlı asenkronik bir jeneratör sağlar.

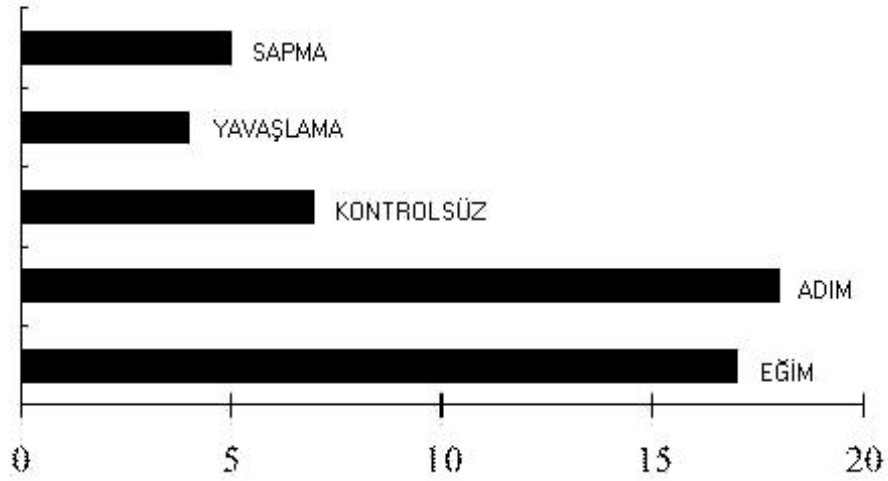
3.3.2. Küçük Rüzgâr Türbinleri

Küçük rüzgâr türbinlerinin güç ve hız ayarı için kullanılacak çeşitli yöntemler vardır. Bunlar (Çizelge 3.2)’de verilmiştir.

- Türbin pervane ve sisteminin yüksüz durumdaki tüm aşırı hızlarla başa çıkmaya tasarlandığı “kontROLSÜZLÜK” (muhtemelen aerodinamik performansın ve hızın azalmasına yardımcı olan kanatların merkezkaç kuvvet altında biraz deforme olması sonucu)
- Motor ekseninin rüzgâr istikâmetinden ayrılması olan “sapma” ve “eğim” (genellikle pervane itme merkezi ile sapma veya eğim yatakları arasında dengelenme ile sağlanır)
- Büyük rüzgâr türbinlerindeki gibi “adım” veya “yavaşlama”.

Çizelge 3.2. Küçük rüzgâr türbinlerinin güç ve hız ayarı

(John Wiley ,1997, Wind Energy Technology)



Küçük rüzgâr türbinlerinde güç kontrolü, hız kontrolü ve aşırı hız ayarı arasında ifade hatasından kaçınmak zordur. Sapma, yavaşlama veya kontrolsüzlükten yararlanan türbinlerin çoğu yavaşlama etkilerinden yararlanır. Ancak emniyet ve yük ayarlama işlevleri için sapma, adım, eğim vs. uygulayan mekanizma sayısını doğru biçimde vermektedir. Küçük türbin tasarımlarındaki sorun basit çok küçük pasif sistemlerin mi, yoksa büyük türbinlere benzer aktif adımli mekanizmaların mı yeterince iyi çalıştırılabileceğidir

3.3.3. Büyük Rüzgâr Türbinleri

Çizelge 3.3. Adım veya Yavaşlama Arasında Seçimde Ana Sorunlar

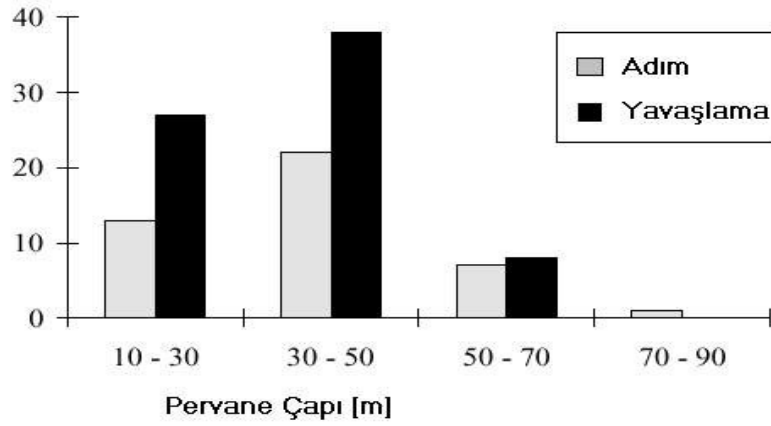
(John Wiley ,1997, Wind Energy Technology)

<u>Sorunlar</u>	<u>Adım</u>	<u>Yavaşlama</u>
Enerji üretimi	Prensip olarak daha iyi	Güç eğrisi etkileniyor
Sabit hız kontrolü	Yüksek rüzgâr hızlarında zor	Tasarım belirsiz olsa da genellikle yeterli
Değişken hız kontrolü	Güç kalitesi daha iyi, güç aktarma hattı yükleri yavaşlama seçeneğinden daha az	İspatlanması gerekir
Emniyet	Komple bir pervane koruyucusu olabilir	Aşırı hız koruması için yardımcı sistemler gerekir
Maliyet	Pervane sistemlerinde daha yüksek maliyet	Pervanede daha az, fren sisteminde daha yüksek maliyet

Büyük rüzgâr türbinleri neredeyse sadece adım veya yavaşlama kontrolü kullanır. Birkaç örnekte yedek emniyet veya kontrole katkı olarak rüzgârdan sapma kullanılır. Kısa süre önce bazı imalâtçılar değişken hızlı çalışma ile birlikte yavaşlama kontrolünü kullanmıştır. Şimdi ittifakta reddedilen tek konfigürasyon gücü kontrol ederken üretimde çok büyük değişmelere yol açmıştır. Ancak bu red, ilk günlerde popüler bir tercih olduğu için çok ilginçtir.

Çizelge 3.4. Adım veya Yavaşlama Karşılaştırması

(John Wiley ,1997, Wind Energy Technology)



Bir tasarım seçeneği olarak yavaşlama kontrolünün genel hâkimiyeti (tasarımların %60 kadarı) bulunsa da megawattlık türbinlerde adım ve yavaşlama kontrolünün oranı neredeyse eşittir. Özellikle Alman pazarında büyük rüzgâr türbinleri her kanadın bağımsız adım hareketi yaptığı “bağımsız” adımlı sistemler tercih edilmektedir. Bu, adım sisteminin 2 bağımsız fren sağlaması nedeniyledir. Bir arızada bir kanat küçük eğimde sıkışsa bile diğer ikisi pervaneyi güvenli hıza getirebilir. Bu bağımsız adım sistemi önceleri daha yaygın olan, 3 kanadın tümünün adımının birbirine mekanik bağlantılı olduğu ve tek bir hareketlendiriciden güç alan “toplu” adım sisteminden farklıdır.

Yavaşlama kontrollü makinelerin güç kalitesine dair (özellikle Alman pazarında da mevcut) endişe orta boy yavaşlama kontrollü makineler üreten bazı imalâtçıları caydırmıştır. Ayrıca yavaşlamanın özellikle büyük makinelerde yol açtığı titreşimler hakkında uzun yıllar boyu endişe var olmuştur ve megawattlık makineler imalâtçıların çoğunun yavaşlama kontrolüne bağlı kalması önemli bir güvenoyudur.

Ancak değişken hız yavaşlama kontrollü makinelerin nasıl çalışacağına dair belirsizlik ile birleştiğinde değişken hıza artan ilgi büyük ölçekte yavaşlama kontrollü makinelere duyulan ilgiyi azaltmıştır

3.3.4. Değişken Hızlı Çalışmayı Teşvik Eden Faktörler

Birkaç sebepten dolayı değişken hızlı tasarım uzun süredir ilgi görmüştür:

- Sabit hızlı çalışmaya göre daha yüksek pervane verimi ve daha fazla enerji alınabileceği şeklinde “geleneksel” beklenti,
- Orta Avrupa’da sesin daha fazla önem kazanması ve değişken hızlı sistemin tahrik sisteminde çok fazla tork ve maliyeti önleyerek nispeten yüksek azami hıza imkân sağlarken hafif rüzgârlarda hız ve sesi azaltabilmesi,
- Değişken hızlı çalışmanın adım kontrolünü kolaylaştırabilmesi, güç kalitesini iyileştirebilmesi ve tahrik sistemini yüklerini hafifletebilmesi (dolayısıyla tasarım gereklerini ve dişli kutusu ya da jeneratör maliyetini muhtemelen azaltması).

3.3.5. Değişken Hızlı Sistemlerin Niteliği

Yukarıda sayılan yararları azamiye çıkarmak için geniş bir değişken hız aralığı gerekir (hızda 2,5 - 3 kat ayarlama). Değişken hız temininin çeşitli yolları vardır. Mekanik sistemler de vardır, ancak elektrikli sistemler hâkimdir. Geniş bir değişken hız aralığının yararlarının tümünü değil bazısını sağlayan çeşitli uzlaşmacı çözümler vardır. Bu seçeneklerin topluca tümü geniş değişken hız aralığı seçeneğinden çok daha yaygındır.

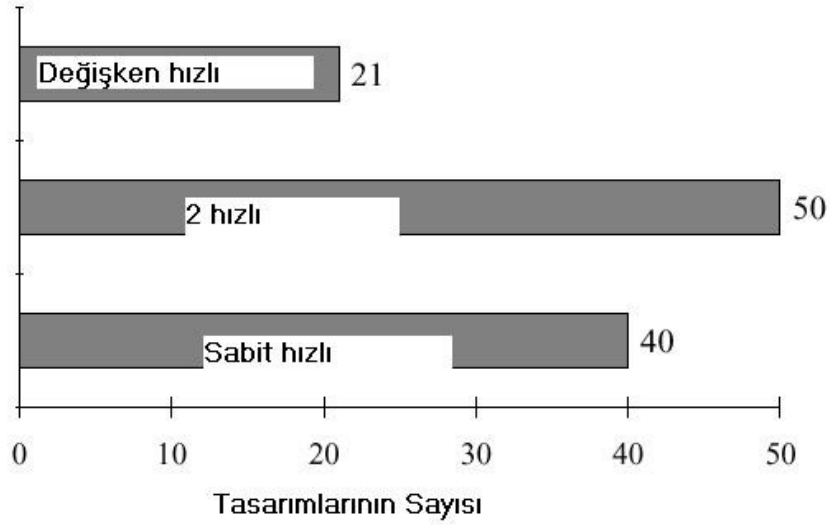
Bunlar arasında:

- 2 hızlı sistemler,
- Genel hız aralığının azalması pahasına üretimin sadece bir kısmının değişken hızlı tahrik ve güç ayar donanımından geçirildiği sürekli değişken hızlı sistem çeşitleri bulunur.

10 yıl öncesinin Danimarkalı tasarımlarında bir kayışa bağlı 2 jeneratör arasında geçiş sureti ile 2 hız elde edilmesi olağandı. Şimdiki kuşak rüzgar türbinlerinde 2 hızlı çalışma elde etmek için neredeyse sadece tek jeneratörde kutup değişimi kullanılır. Çizelge 3.5. şimdiki ticari rüzgar türbin tasarımları arasında, bu tasarım seçenekleri bazısının dağılımını gösterir.

Çizelge 3.5. Çalışma hızı bakımından tasarım seçenekleri

(John Wiley ,1997, Wind Energy Technology)



Sürekli değişken hızlı çalışma tasarımları arasında, sadece 1/3'ü geniş değişken hız aralığı uygular (hız aralığı >2,5:1). Çoğu hız aralığı ve performansa güç ayar sistemleri maliyetini tercih eder. Vestas Optislip sisteminde, mükemmel güç kalitesi için sınırlı değişken hız (nominal güçte çalışırken %10 hız değişmesi) kullanılır. Çoğu imalâtçının tasarım etüdü en ekonomik olarak 2 hızlı sistemi seçmiştir. Bugün değişken hızlı çalışmaya genellikle en uygun doğrudan tahrikli sistemlerin geliştirilmesine önem verilmesi ve ilgili güç ayar sistemlerinin geliştirilmesi ve maliyet azaltılması her ihtimâlde rüzgâr türbini tasarımında geniş değişken hız aralığının gelecekte daha fazla kullanılması ile sonuçlanacaktır.

3.3.6. Çok Hafif/Esnek Tasarımların Durumu

Çok hafif ve yapısal esnek makineler (özellikle kanatlar ve kuleler) düşük maliyetli teknolojiye bir yol olarak her zaman ilgi görmüştür. Çok hafif ve esnek terimlerini doğal olarak birbirleriyle ilgili görme eğilimi vardır.

Yapısal esnek tasarımlarının yükten kurtulma, daha az malzeme kullanma, dolayısıyla çok hafiflik ve düşük maliyet elde etme açık niyet olmakla birlikte, mevcut çok hafif makinelerin çoğu yapısal olarak esnekten çok serttir. Oldukça esnek kanatlar veya kuleler bulunan Carter rüzgar türbini gibi tasarımlarda yapısal esneklik yararlı olabilir, ancak düşük ağırlık elde edilmesinden çok, yüksek

tasarım uç hızı seçilerek düşük tahrik sistemi torku elde edilmesiyle ilgilidir. Şimdiye kadar bu kavramlar ticari başarı elde etmemiştir.

Bu türden son tasarım WEG Rüzgar Enerjisi Grubunun eğilen motor yeri ve yüksek yük kabiliyetli özel geliştirilmiş yapısal esnek kanatları bulunan MS4 600 KW, 3 kanatlı, serbest sapmalı, rüzgarı arkadan alan türbinidir. Aşırı rüzgarlarda esnek pervane kanatları ile önemli yük azaltması sağlanmaktadır. Bu tasarım için kendiliğinden dikilen sistem özellikle zayıftır. Bu makinenin tasarım kavramı bazı diğer Avrupalı imalatçıları tasarımının tersine çalışır. Ancak esnek elemanları daha küçük V42 ve V44 ile neredeyse aynı olan bir destek yapısına önemli ölçüde daha büyük pervane montajına müsait esnek kanatları bulunan yeni Vestas V-47 makinesinde de mevcuttur.

Yine pervane kanatlarını genel olarak değerlendirerek, ağırlık oranına göre en yüksek yorulma direncine sahip malzemelerden üretilmiş olanlar (özellikle Atout Vent'in tahta epoksi ve CFRP kanatları) en hafif, ancak aynı zamanda en sert kanatlardır. Bu hafiflik ile yapısal esneklik arasında doğrudan ilişki olmadığının altını çizer.

Bu yorumlar yapısal esnekliğin hem yük azaltılması hem de aktif mekanizmaları yerinin alınması bakımından potansiyel kullanılabilirliğinin değerini küçümsemeyi amaçlamamaktadır. Varılan sonuç şimdiki kuşak çok hafif rüzgar türbinlerinin hafifliklerini başlıca olarak yapısal esneklikten elde etmezler, rüzgar türbini tasarımında yapısal esnekliğin en büyük etkisi henüz elde edilmemiştir. Plastik ve kompozit menteşeler (küçük türbinlerde zaten kullanılır), esnek kirişler ve akıllı malzemeler gelecek gelişmeler için büyük potansiyele sahiptir. Çok yumuşak kuleler (yani doğal frekansı pervane frekansından düşük kuleler) rüzgâr türbini tasarımlarında kullanılmıştır. Sistem dinamiklerine özen gösterilmelidir, ancak bu tasarımlar kule kütlesi ve maliyetinde azalma yaratabilir.

3.4. Enerji Üretim Kapasitelerine Göre Türbin inceleme

3.4.1. Küçük Rüzgâr Türbinleri

Dünyada halen elektriği olmayan 2 milyar insan var. Tüm kırsal talebi karşılamak, yani elektrik sistemi büyütülmesi ile tam elektrifikasyon maliyeti 1 Trilyon Euro'den fazla olacaktır. Küçük rüzgâr türbinleri piyasası 50 kW'a kadar türbinler için çeşitli uygulamalar içerir. Bu piyasanın çok genişleyeceği tahmin edilmektedir.

Çizelge 3.6. Küçük rüzgâr türbinleri dünya piyasası

(Yerebakan, 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

Uygulama	1995 Euro/yıl	2005 Euro/yıl
Uzak bölge evleri	4	100
Telekomünikasyon	2	20
Köy/Kır Elektrifikasyonu	3	400
Muhtelif uzak bölge yükleri	2	20
İçme/Sulama suyu pompalama	1	100
Petrol kuyusu pompalama	0,1	30
Soğutma	0,1	5
Tuz giderme	0,1	5
Toplam	12,3	680

Küçük türbin üretici küçük şirket sayısı artmaktadır. Küçük rüzgar türbinleri tasarımları büyük rüzgâr türbinleri üreten iki büyük imalâtçı, Enerco ve Micon, tarafından da üretilmekte olup, önemli uluslararası rekabet, örneğin, Windlite 8 kW, World Power Technologies 22 kW, Canon/Wind Eagle 35 kW ve Bergey Windpower 40 kW gibi tasarımlar vardır.

Modern Danimarka ve Avrupa rüzgar enerjisi işinin başladığı 10-50 KW aralığı şimdi önemli bir Pazar sektörüdür. Bu pazara en iyi, büyük tasarımlara aktarılmış mevcut tasarım kavramlarından yararlanılarak değil, ancak henüz daha küçük rüzgar türbinlerinin müşterek tasarım kavramları adapte edilerek hizmet edilebileceği büyüyen görüştür. Bu kavramlara, düşük bakım iyi verim için daimi mıknaatısla (PMG) doğrudan tahrikli jeneratörler, pervanenin koruması için pasif adım veya sapma dahildir. Bu bağlamda, Proven Engineering 2.2 KW tasarım teknolojisi kendiliğinden ayarlı

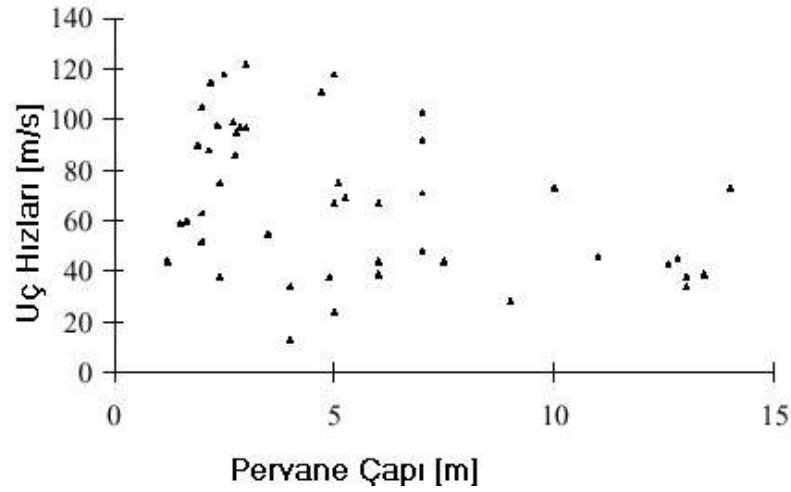
pervanesi olan daimi mıknatıslı (PMG) doğrudan tahrikli jeneratör içerdiği için kayda değerdir. Aşağıdaki tablo Avrupa'nın 10 – 50 kW aralığında küçük rüzgâr türbinleri imalâtçıları listesini verir. Bu türbinlerin çoğu hem elektrik sistemine bağlıdır hem de bağımsız uygulamadır.

Çizelge 3.7. Küçük rüzgâr türbinleri güç kapasiteleri

(Yerebakan, 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

<u>İmalâtçı</u>	<u>Kapasite (kW)</u>
Aeroman	33
Aeroturbine	9
Atlantic Orient Corp. 15/50	50
Enercon E12	30
Fuhrlander 30	30
Genvind	22
Jacobs	10, 20
Husumer Schiffswerft – HSW 30	30
JBA Vindenergi	15
Lagerwey 18/80	80
LMW	10
SudWind 18/80	30, 37, 45
Vergnet	2, 3, 5, 10, 15, 25, 50, 60

Küçük rüzgâr türbinleri arasında kısmen uygulamaların çok çeşitliğinden dolayı büyük tasarım çeşitliği mevcuttur. Şekil 3.10 yüksek derecede yeknesaklık arz eden büyük türbinlerin tersine geniş tasarım uç hızları aralığını göstermektedir.



Şekil 3.10 Küçük rüzgâr türbinleri

(Yerebakan, 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

En düşük uç hızları birkaç yüksek torklu pompa tasarımı ile ilgilidir (Brummer 1 kW, 4 m. çapında, 7 kanatlı rüzgâr pompası 13 m/sn uç hızına sahiptir). En yüksek uç hızları daha büyük türbinlerde görülenler gibi ses sorunları olmaması gereken pazarlarda düşük torklu, düşük maliyetli bir sistem isteğini yansıtır. Bazı imalatçılar ayar sistemi maliyetinden kaçınmak üzere aşırı yüksek hızlara direnecek küçük pervaneler tasarlamaktadır (Örn. Bergey 10 kW, 7 m. çapında rüzgâr türbini 220 m/sn uç hızına kadar çalışmaktadır). Şekil 3.3.1 pervane yükü ve pervane hızını kontrol edecek eğim ve sapma uygulamasının yaygınlığını göstermektedir.

Küçük rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansı (piyasa liderlerin de bile) nispeten zayıftır. Örneğin, Bergey 10 kW, güç kapasitesine çevrildiğinde Bonus 600/41 ile benzer güç eğrisine sahiptir. Ancak pervane verimi Bergey'le 260, Bonus'la 455 W/m² 'dir. Bu, küçük rüzgâr türbinlerinde olağan dışı bir durum değildir ve küçük rüzgâr türbinlerinin çok artırılmış maliyet/kW oranı kısmen, arttırılmış pervane çapının aerodinamik tasarımdaki eksiklikleri dengelenmek üzere kullanılması stratejisinden kaynaklanır.

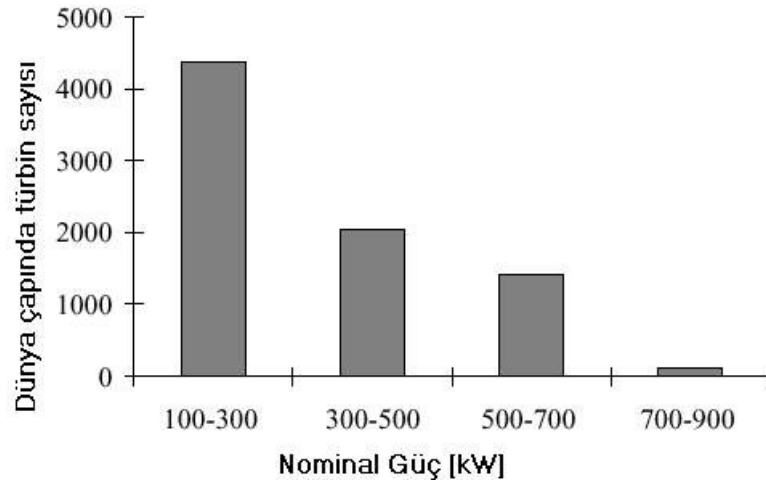
Bu daha zayıf performansın nedeni, kısmen, düşük Reynolds sayısında çalışırken verim azalmasından yada uygun olmayan aerofoil kesitinden kaynaklanır. Ancak bazen kanat tasarımında ve konstrüksiyonunda (ucuz kanat ve düşük ilk maliyet için) uygun olmayan taviz verilmesinden yada çok kaba güç ayar sistemleri kullanılmasından kaynaklanır. Avrupalı

imalâtçılar için hızla büyüyen dünya pazarına çok rekabetçi bir tasarım üretebilecek özel teknolojik gelişmeler yapmaları için büyük bir fırsat belirecek gibi görünmektedir.

En küçük rüzgâr türbinleri boyları arasında Marlee Engineering ürünü Rutland tasarımları dikkat çekicidir. Bu akü şarjlı ünitelerin güç çıkışı 20 ilâ 250 W arasındadır. Bu tasarım aralığında 30.000'den fazla türbin satılmıştır.

3.4.2. Orta Boy Rüzgâr Türbinleri

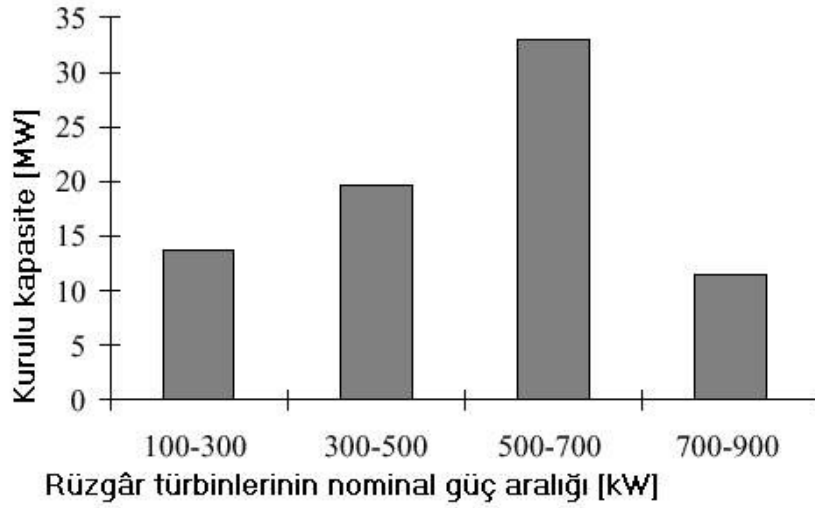
Orta boy türbinlerin sayı ve kapasite dağılımları (Şekil 3.11.) 500 – 600 kW civarında ünitelerin arzında son zamanlarda büyük bir artış içerir ve dünya çapında kurulu kapasitede bu boy aralığının hâkimiyetini göstermektedir.



Şekil 3.11 Orta Boy Rüzgar Türbini Sayıları

(Yerebakan, 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

Orta boy rüzgâr türbini teknolojisi birkaç imalâtçının çok istikrarlı 600 kW rüzgâr türbinleri üretimi ile olgunlaşmıştır. Terminoloji ilham açısından teknolojiyi izlemektedir. On yıl önce kimse 600 kW rüzgar türbinleri orta boy sınıfına sokmamıştır.



Şekil 3.12. Rüzgar Türbinlerin Nominal Güç Aralığı

(Yerebakan, 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

Türbin konfigürasyonları, bir süredir daha küçük orta boy 300 kW civarında türbinler arasında olduğu gibi üç kanatlı yavaşlama ayarlı tasarımların hâkimiyetiyle denge bulmuştur. Şimdi “sapmalı” sistemlerin çoğu döner elemanlı yataklar yerine sürtünme yastıkları kullanmaktadır. Yumuşak ilk çalışma elektroniği ve kutup değişimli jeneratörler yaygındır. Rüzgâr türbini tasarımında ses azaltma giderek vurgulanmaktadır. Ses bastırıcılığı çelikten daha iyi olan dairesel grafit demir döküm, ses iletimi azaltıcı elastomer conta yaygın özelliklerdir. Görsel etki tasarımları çoğunu bir derece – birkaç imalâtçının 2 kanatlıdan 3 kanatlı tasarıma geçmek zorunda kalması bakımından güçlü olarak, boya rengi tespitinde ve çirkin özelliklerden kaçınma bakımından daha hafif olarak, etkilenmektedir. Bazı imalâtçılar kule tabanını doğal çevreyi takliden yeşil/kahverengi tonlarına boyamakta, birkaç metre yükseklikte beyaza dönmektedir. Nordtank maliyet ve görsel etki bakımından optimum motor yeri biçimi tespiti için endüstriyel tasarımcılar çalışmaktadır.

Avrupalı rüzgâr türbinleri için dünya pazarı büyüdükçe çok sayıda tasarım adaptasyonu ortaya çıkmaktadır. Bu adaptasyonlar arasında düşük rüzgâr hızlı yerler (özellikle Hindistan) için büyük çaplı seçenekle ve kutupsal iklimler için düşük ısı tasarımları vardır. Orta boy rüzgâr türbini teknolojisi şimdi çok olgunlaşmıştır ve bu durumu radikal gelişmeler yerine başlıca olarak adım adım gelişmeler ile elde etmiştir

3.4.3. Megawatt Ölçeğinde Tasarımlar

1980’li yıllarda çok sayıda megawatt ölçeğinde tasarım olmasına karşın bunların hiçbiri ticari teknoloji olarak çoğalamadı. Aşağıdaki imalatçıların megawatt ölçeğinde rüzgâr türbinlerine genel olarak test ve kontrol aşamasında, ancak bir çok durumda mevcut siparişlerinin büyük kısmı olarak sahip olması Avrupa Komisyonu WEGA programından büyük destek gören Avrupa rüzgâr endüstrisinin büyük başarısıdır. Enercon bu yıl 1.5 MW’lık 20 – 30 adet E66 monte edileceğini tahmin etmektedir.

Çizelge 3.8. Mevcut megawatt ölçeğinde rüzgâr türbinleri

(Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği)

<u>Tasarım Tipi</u>	<u>Pervane Çapı (m)</u>	<u>Kanat Adedi</u>	<u>Göbek Yüksekliği (m)</u>	<u>Nominal Kapasite (kW)</u>	<u>Uç Hızı (m/s)</u>	Kontrol <u>Yavaşl. Adım</u>	Hız
NEDWIND NW 53/2/1000-240	52,6	2	70	1000	68	✓	2 hızlı
NORDIC 1000	53,0	2	58	1000	69	✓	2 hızlı
BONUS 1 MW/54	54,0	3	60	1000	62	✓	2 hızlı
MICON M2300-1000/250kW	54,0	3	59	1000	59	✓	2 hızlı
NORDEX N 54	54,0	3	70	1000	62	✓	2 hızlı

Enercon E 66 doğrudan tahrikli jeneratör kullanan (E-40 tasarımında başarı ile kullanılan teknolojinin ölçek yükseltimine dayalı) ilk megawatt ölçeğinde rüzgâr türbini olarak dikkate değerdir. Sadece Nordtank daha küçük Danimarka rüzgâr türbinlerinin geleneksel tarzında sabit hızlı yavaşlama kontrollü çalışmaya bağlı kalmış, Enercon geniş değişken hız aralığını olarak tarif

edilebilecek prensibi benimsemiştir. Nordtank'ın sabit hız kararının bedeli en düşük uç hızı, en yüksek özgül tahrik sistemi torku elde edilmesidir. Yararı her zaman olduğu gibi basitliktedir. Enerjinin hayati niteliği maliyet ancak zaman ile ortaya çıkacaktır.

Diğer imalâtçıların tümü bir derece hız değişkenliği benimsemiştir. Bu ya düşük rüzgârlarda ses ve enerji üretimi (özellikle 2 hızlı sistemler) nedenlerine veya yüksek rüzgârlarda adım kontrolü ve güç kalitesini arttırmaya yöneliktir. Tacke Windtechnik güç ayar donanımının tam güç kapasitesine ayarlanmaması, böylece maliyet tasarrufu için çift beslenmeli bir endüksiyon geniş değişken hız aralığının doğrudan tahrikli jeneratör tasarımlarının ayrılmaz bir parçası olmadıkça masrafa değmediğine dair fikir birliği oluşacak gibi görünmektedir.

Çok büyük rüzgâr türbinleri için uç frenleri bakımından maliyet ve mühendislik zorlukları vardır ve Bonus, normal çalışma için sabit adımlı yavaşlama kontrolünü sürdürse de, pervane frenlemesi ve aşırı hız koruması için tam mesafeli adımla yavaşlamayı tercih etmektedir. En büyük türbin, Kvaerner Türbini BMW tasarımı İsveç'te büyük türbin teknolojisine duyulan ilginin sonucudur. 1983'te Nasudden ve Maglarp'ta 2 adet 2 MW türbin kurulmuştur. İkinci neslin geliştirilmesi Nasudden II programında İsveç-Alman işbirliği yaratarak 1988'den sonraki çalışmaların ürünü olmuştur. Oluşan 3 MW 80 m. çapında türbinler, Nasudden II ve Aeolus II, hedef emre amadeliği aşarak ve bakım ihtiyaçlarında önemli azalma elde ederek 3 yıldır çalışmaktadır. Ancak Kvaerner mevcut tasarımları ticari kullanım için çok pahalı bulmaktadır. (Yerebakan 2001)

3.4.4. Deniz

Avrupa rüzgâr endüstrisinde bir sonraki büyük gelişmenin denizdeki kaynaktan önemli ölçüde istifade elde edilmesi olacağı tahmin edilmektedir. Bunu destekleyen geliştirmeler:

- denizdeki rüzgâr kaynağının daha iyi tahmin edilmesi ve rüzgâr modeli kurulması için daha iyi metodoloji,
- kombine rüzgâr ve dalga yükü ile başa çıkabilen tasarım araçları geliştirilmesi,
- belgeleme kurallarının aynı şekilde geliştirilmesi,
- makinenin denizde kalması, bakım ve enerji maliyeti hususlarının değerlendirilmesi için pilot tesis rüzgâr çiftliklerinin kurulması alanlarında gerçekleşmiştir.

Son zamanlardaki pilot tesisler:

Çizelge 3.9. Avrupa'nın Denizdeki Tesisleri

(Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği)

Yer	Kapasite	Türbinler	Şirket	<u>Kurulma Tarihi</u>
Vindey	5 MW	11 Bonus 450 kW	Elkraft	1991
Lely, Ijsselmeer	2 MW	4 NedWind 500 kW	ENW	1994
Tuno Knob, Jutland	5 MW	10 Vestas V39 500	Midkraft	1995
Dronten, Ijsselmeer	17 MW	28 Nordtank 600 kW	ENW	1997

İlk ciddi ticari deniz rüzgâr çiftliği Danimarka şirketi ELKRAFT'ın 11 Bonus 450 kW rüzgâr türbini ile kurduğu ve Bonus'un maliyetini 77 milyon DK olarak bildirdiği Vindeby Deniz Rüzgâr Çiftliğiydi. Türbinler derinliği 2,5 – 5,2 m. arasındaki sığ suda 1,5 – 3 km. deniz içine yerleştirildi. Her türbinin geniş tabanlı toplam konik (yarısı çakıl ve kum olan) 1050 kg. ağırlığında temeli vardır.

Bonus'un denizde çalışmada azami maliyet yararı için özel türbin tasarımı üretme niyeti yoktu. Hedef standart rüzgâr teknolojisinin kullanılması, ancak türbinlerin sürekli idamesi için donanımın denizde kalabilirliğinin artırılması için gerekenin belirlenmesiydi. İki nem giderici, iki ilâve küçük servis vinci, özel bir soğutma sistemi ve kuleler için özel boya özellikle deniz ortamı nedeniyle kullanılan ana kalemlerdi. Bu, özellikle kara türbinleri atmosferde tuz buharı olan sahil ortamına göre tasarlandığı için, denizde çalışma için denizde kalabilirliğinin türbin sistemi üzerindeki etkisinin küçük olduğu genel görüşünü doğrulamaktadır.

Ancak daha önemli bir konu bakım ziyaretlerinde türbin bağlama sistemlerinin kullanılmasındaki çok sakin deniz durumu hariç güçlüktür.

3 NedWind 500 kW rüzgâr türbini içeren Medemblik yakınında Ijsselmeer'deki küçük rüzgâr çiftliği Haziran 1994'te hizmete alındı. Türbinlerin dinamik davranışı aynı şekilde analiz edilmiş ve karadaki yerlere göre enerji üretiminde %30 kadar iyileşme gösteren bazı performans ölçümleri yapılmıştır. İlginç teknik özellikleri arasında türbinlere fırtına geçişi sırasında yıldırım çarpma tehlikesini azaltıcı surette 2 kanadı yatay durumda park etme talimatı veren bir rüzgâr çiftliği Elektrik Fırtınası Teşhis Aygıtı (ESID) bulunur. Bir sis tesbit aygıtı pervaneyi park etmek ve gemilerin emniyeti için ikaz lambalarını yakmak üzere çalışmaktadır.

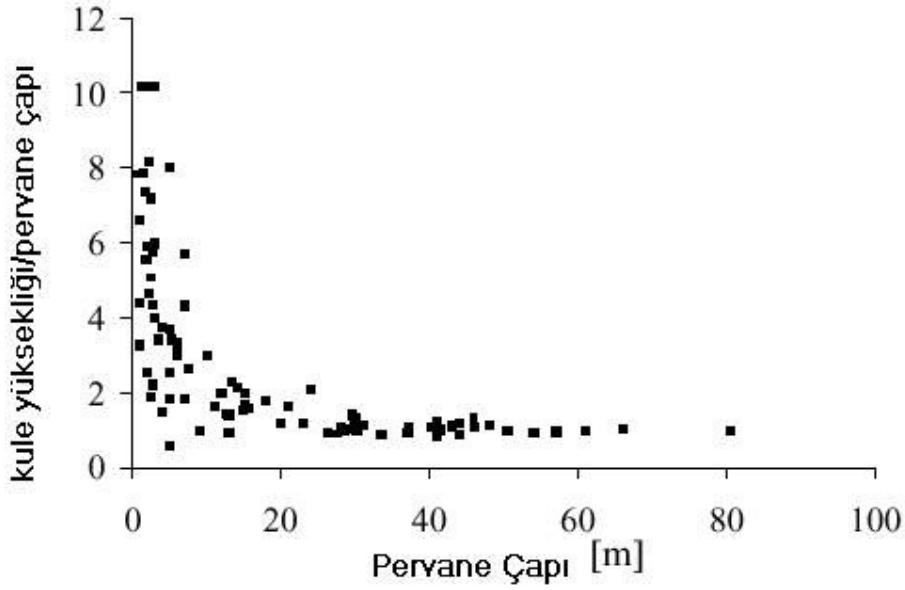
Ekim 1995'te, Midkraft'ın Tuno Knob'da kurduğu 10 Vestas V39 500 kW rüzgâr türbini faaldi. 5 m derinlikle suya , 6 km deniz içine her biri 1000 tonluk kapalı sandık temeller kullanılarak yerleştirildi. Kuş yaşam etüdü, görsel etki değerlendirmesi ve deniz arkeolojisi dahil diğer çevresel hususlara büyük dikkat sarf edildi. 6 aylık çalışma sonrası enerji üretim maliyetinin karadaki üretim maliyetinden %40 kadar yüksek olduğu tahmin edildi.

Son ve en büyük gelişme 28 Nordtank 600 kW türbinin Lely tesisine çok benzer çelik tek kazıklı temeller üzerinde kurulmakta olduğu Dronten yakınında Ijsselmeer'in doğu sınırında bir yerdedir. Türbinler 5 m derinlikte sadece 40 m deniz içindedir, yaya köprüleri ile ulaşımına sahiptir.

Deniz teknolojisinin şimdiki durumunda dalga darbe yüksekliği üzerindeki türbinler kara türbinlerinden biraz farklıdır. Özel tasarımlı, şimdiki rüzgâr türbinlerinden yüksek ünite kapasiteli deniz rüzgâr sistemlerinin potansiyel yararı önemlidir. Deniz rüzgâr enerjisi evrimine henüz başlamamıştır. Gelecek asrın ilk yıllarında en heyecanlı faaliyet alanlarında biri olacaktır. Bu gelişmenin başladığına dair belirgin işaretler vardır – imalâtçıların ve büyük geliştirmecilerin çoğu şimdiden aktif surette bu teknolojiyi araştırmaktadır

3.4.5. Mevcut Teknolojide Ölçek Eğilimlerinin Değerlendirilmesi

Beklendiği gibi, küçük makineler yeryüzünün sınır tabakasının en kötü etkilerinden kaçınmak üzere nisbeten yüksek kule yüksekliklerine sahiptir. Yaklaşık 30 m çapından büyük türbinlerde (Şekil 3.13.) ortalama olarak kule yüksekliğinin pervane çapına orantılı ve yaklaşık olduğu açıktır. Bu seçenek hem teknik hem de görsel değerlendirmelerin bir sonucudur.

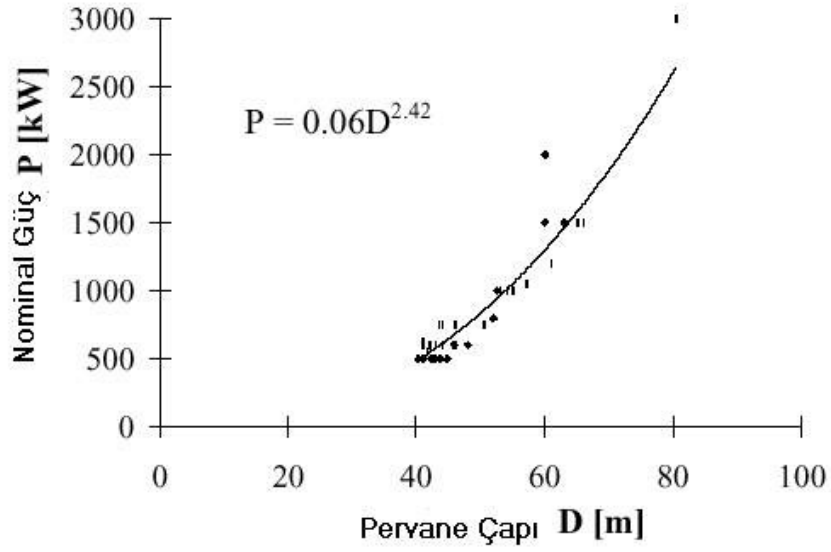


Şekil 3.13. Kule yüksekliğinin ölçeklendirilmesi

(Yerebakan, 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

İmalâtçıların değişik kule yükseklikleri sunduğu çoğu durumda nisbeten tutarlı tablo orta değerde kule yüksekliği seçilerek elde edilir.

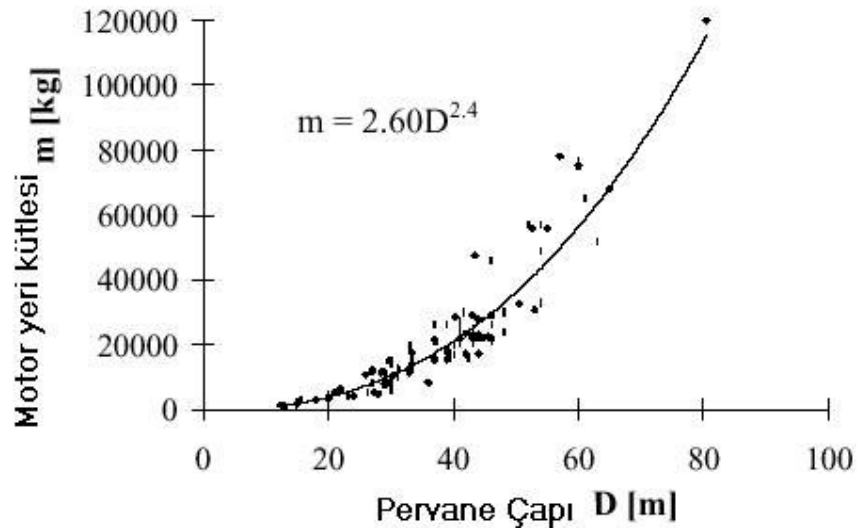
Zemin yukarısında rüzgâr hızının değişkenliğini genellikle α içeren bir güç yasası temsil eder ve şekil olarak benzer rüzgâr türbinlerinin güç çıkışının çapa (D), $D^{(2+3\alpha)}$ olarak bağlı olacağı hemen anlaşılır (Şekil 3.14.). α en tipik olarak 1/7 alınır, yani $D^{2,43}$ olur. Tasarım uygulaması, trend çizgisi katsayısı olarak 2,42 üstel sayısını vererek buna uyduğu ölçüde bu açıktır.



Şekil 3.14. Büyük rüzgâr türbinlerinin nominal güçleri

(Yerebakan, 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

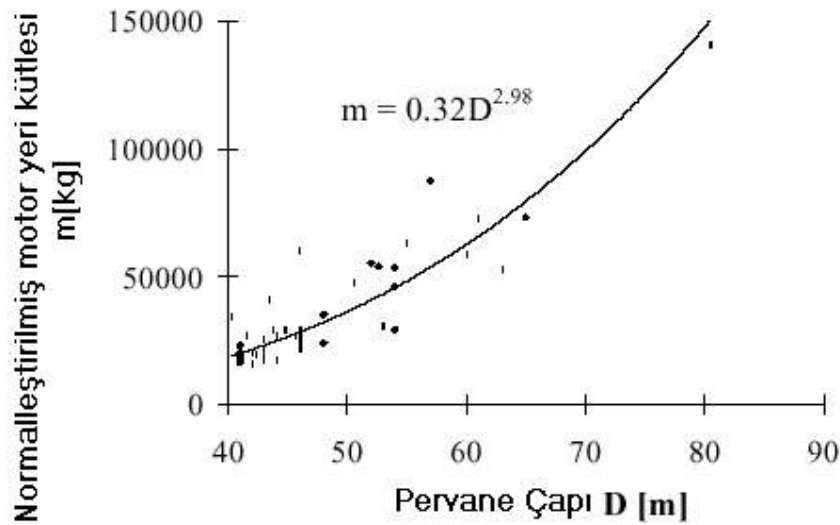
Pervane çapı arttıkça motor yeri kütesinin küp oranının altına indiği (Şekil 3.15.) açıktır. Ancak daha küçük (genellikle daha eski) tasarımlar hariç tutulursa üstel sayı Şekil 3.16.'te 2,4 ten 2,7'ye çıkar.



Şekil 3.15. Motor yeri kütesinin ölçeklendirilmesi

(Yerebakan, 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

Motor yeri kütlesi başlıca tahrik sistem torkuna, tahrik sistem torku da jeneratör gücü ve tasarım uç hızı seçimlerine bağlıdır. Ayrıca geçerli tasarım standartlarına ve imalâtçının yaklaşımına, örneğin ucuz kalın çelik plaka kullanımında basitlik veya daha optimum ağırlığı azaltılmış imalâtlar tercihinin bağlıdır. Şekil 3.16’da uç hızını ve güç değerini dikkate alan bir normalleştirme uygulamasıdır. En aşırı saplamalar gerçekte imalâtçının ağırlık tasarruf yaklaşımına atfedilebilirken, veriler yine de yüksek dağılım sergilemektedir. Ancak trend çizgisi katsayısının şimdi neredeyse tamamen kübik olması dikkate değer.



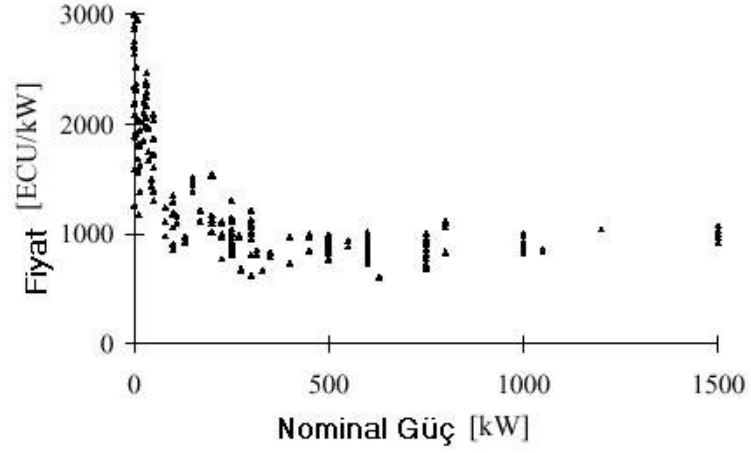
Şekil 3.16. Normalleştirilmiş motor yeri kütlesinin ölçeklendirilmesi

(Yerebakan, 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

Rüzgâr türbini ölçeklendirilmesine basitlik yanlışı bakış ile, sık sık kareküp yasanından bahsedilir. Rüzgâr türbinlerin ölçek artırımı şimdi zemin yukarısında artan ortalama rüzgâr hızının yararı nedeniyle “kare” kısmının 2.4’e daha benzer olması sonucu bu yasanın belirttiğinden daha uygundur. Ancak değişkenlerin tümü (özellikle tasarımın yaşı) dikkate alındığında kütle ve maliyetler ölçeklendirilmesi için kübik katsayıya göre daha az temel mevcuttur.

Arazi kullanımı, elektrik bağlantısı vs. gibi direkt makine maliyetleri ötesinde faktörler çok büyük türbinlere ekonomik yarar sağlamaktadır. Orta ve büyük boy rüzgâr türbinlerinde (Şekil 3.17.)

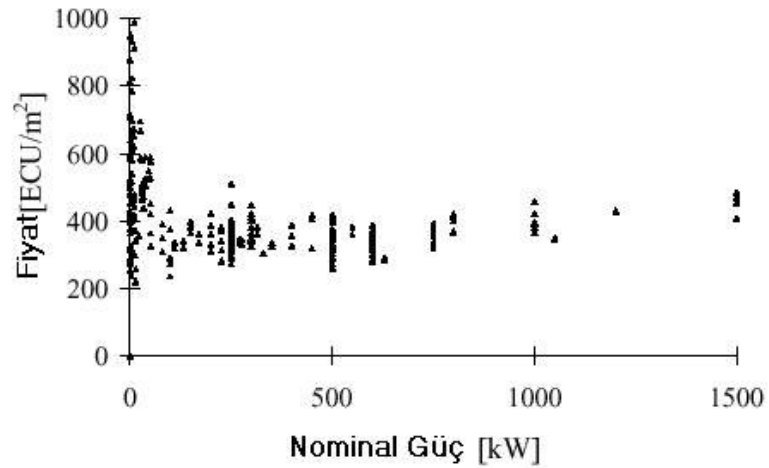
fiyat/kW oranı şu anda ölçeğe oldukça duyarsızdır ve piyasa gelişmesini ve teknik ilerlemeyi yansıtan düşük düzeydedir.



Şekil 3.17. Rüzgâr türbinlerinde fiyat/kW oranı

(YEREBAKAN, 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

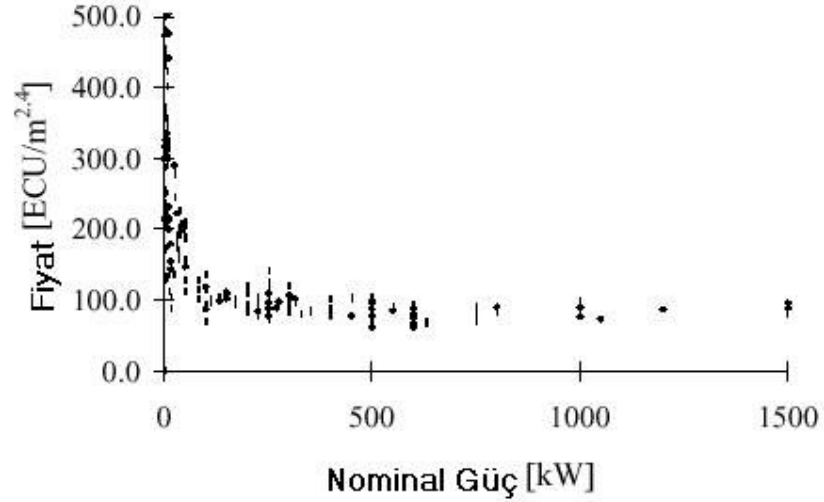
Rüzgâr türbinlerinin taradığı alanın m^2 başına fiyatı, büyük rüzgâr türbinleri aleyhine görünmektedir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Fiyat/Rüzgâr türbinlerinin faaliyet alanı

(YEREBAKAN, 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

Ancak bu fiyat, bahsedildiği gibi D^2 yerine $D^{2.4}$ kullanılarak ilgili üretkenlik ile ilişkilendirildiğinde en sona megawattlık türbinlerin yerleşmiş orta boy tasarımlara göre özgül fiyat bakımından çok benzer olduğu doğrulanmaktadır.



Şekil 3.19. Fiyat/Rüzgâr türbinleri normalleştirilmiş alanı

(Yerebakan, 2001. İTO Yayınları, Rüzgar Enerjisi, Ankara, Türkiye)

En büyük rüzgâr türbinleri özgül makine fiyatı bakımından orta boy tasarımlarla açıkça rekabet eder görünse bile, megawattlık türbinler genellikle en son ve en gelişmiş türbinlerdir ve orta boy türbinlerin tasarımı tekrar elden geçirilip daha da iyileştirilebilir. Daha fazla üreten ünitelerin şirketlere cazibesi ve belirli yerlerde yararlanmanın avantajları, deniz uygulamalarında temel bloğu başına daha fazla üreten ünitelerin ekonomik yararı gibi açıktır. Şimdi sektör kritik bir teknolojik sorun ile karşı karşıyadır mevcut kavramların ölçek yükseltilmesi sınırlarının ve çok megawattlık türbinlere ait kavramlara geçiş noktasının değerlendirilmesi.

3.5. Rüzgâr Çiftliği Teknoloji Sorunları

3.5.1. Rüzgâr Çiftliklerinde Rüzgârdan İstifade

Rüzgâr enerjisi potansiyelinden yararlanılması diğer yetenekler ve mühendislik disiplinler gerektirir. Rüzgâr çiftliklerinde – makine grubuna verilen genel isim, büyük ölçüde istifade azami

birkaç yüz adet çiftlikte gerçekleşmektedir. Rüzgâr enerjisinin klasik alternatifler ile rekabet edebilmesi için enerji maliyetinin en aza indirilmesi gerekir, dolayısıyla rüzgâr enerjisinden üretilen elektriğini toplam maliyetinin tesbitinde sadece türbinlerin değerlendirilmesi yeterli değildir. Tesisin dengesi: İnşaat ve elektrik mühendisliği karadaki bir rüzgâr çiftliğinde %15 ilâ %40 arasında paya sahiptir, deniz uygulamalarında bu %50'ye kadar çıkabilir.

3.5.2. Tesis Dengesi

Tesisin dengesi inşaatları içerir; yollar, temeller, ek binalar, elektrik sisteminin makineleri birbirine ve ulusal elektrik sistemine bağlamasını içerir. Genellikle her makine altında ve ulusal elektrik sistemi bağlantısında birer transformatör, ayrıca ilgili şalt donanımı ve ölçü aletleri bulunur.

Rüzgâr çiftliklerinin çoğunda uzak operatörün rüzgâr çiftliğini büyük hassasiyetle çalıştırması ve kontrol etmesine imkân veren gelişmiş bir izleme sistemi bulunur. Bu sistem SCADA (Denetim, Kontrol ve Bilgi Toplama) sistemi olarak bilinir. Tesisin elektriksel ve inşaat unsurları nisbeten standarttır, ancak rüzgâr çiftlikleri sürecinin maliyet etkisi büyük ölçüde azalmıştır. Temeller kısmen yük anlayışının iyileşmesinden kısmen de bir rüzgâr çiftliğinin sistem yönü takdir edilmesinden dolayı 5 yıl öncesine göre çok daha alçak gönüllü görünmektedir. Tipik montaj ve hizmete alma süreleri şimdi bir 600 kW'lık türbinli makine başına 1 güne kadar inmiştir. SCADA sistemleri hem güvenilirlik hem de gelişmişlik açısından büyük ölçüde katkıda bulunabilir. Şimdi rüzgâr çiftliğinde her makinenin sadece enerji verimini değil arızaları, önemli eleman sıcaklıklarını ve diğer sıhhat izleme sinyallerini, keza rüzgâr hızlarını ve yönlerini ve tüm bakım görevlerinin ayrıntılı bir kaydı ile kullanılan yedek parçaları verecek kayıtların her yarım saatte elde edilmesi rutin olarak surette beklenmektedir.

3.5.3. Enerji Tahminleri ve Optimizasyon

Bir rüzgâr çiftliğinin enerji verimi üç bileşene bağlıdır; makineler, rüzgâr ve yer. Rüzgâr ve yer bir rüzgâr çiftliğinin geliştirilmesinde aynı derecede önemlidir ve en azından bu teknoloji başlığı altında kısa bir bahse lâyıktır.

Bir rüzgâr çiftliğinin ömrü 20-30 yıldır. Bu süre içinde bir rüzgâr çiftliği kurulması için borçlanılan tutarı geri ödemeye ve uygun getiri sağlamaya yeterli enerji üretmelidir. Bu nedenle uzun vadeli rüzgâr davranışının anlaşılması son derece önemlidir. Rüzgâr çiftliğinin ilk günlerinde rüzgârın doğru değerlendirilmesi bir tür aşırıdır ve bu yaklaşım sektör için önemli güçlükler yol açtı.

Ancak Şimdi doğrudan ölçüm veya rüzgâr kaynağı tahminlerine alınabilecek kadar güven sağlayan yakındaki meteorolojik istasyonlar ile karŐılaŐtırmaya dayalı gelişmiş ve güvenilir yöntemler mevcuttur. Rüzgâr enerjisi sektörüne giren bankalar için, dolayısıyla sektörün geleceği için bu hayati önem taşır.

Yer topografisi bazı yerlerde rzgr büyük ölçüde etkileyebilir. Rüzgâr hızı yokuŐ yukarı artar, yokuŐ aşağı azalır. Ancak meyiller çok dikse, rüzgâr araziden ayrılabilir ve hasar yapıcı aŐarı çalkantı ve daha düşük ortalama rüzgâr hızı üretebilir. Bu nedenle dikkatli yer seçimi zaruridir. Nisbeten uzman olmayan kullancıların akış dinamiğinde güçlü bir araca kavuŐmasını sağlayan kullanıcı dostu topografik rüzgâr akım modeli WASP (10)'ı yayınlayan Danimarka Milli Laboratuvarının (RISO) yerel topografik etki hesabından bazı büyük gelişmeler olmuştur. Doğru Şartlarda kullanıldığında bu araç yerel akımlar için güvenilir sonuçlar üretebilir ve rüzgâr enerjisi toplununca yaygın olarak kullanılmıştır. Bir rüzgâr iftliğindeki makineler birbirleriyle etkileŐirler. Bu etkileŐim makinelerin ürettiği “dmen suları” ile gerçekleşir. Bir makine diğerinin dmen suyunda çalıŐtıđında sadece daha düşük ortalama rüzgâr hızı değil çok daha yüksek çalkantı, dolayısıyla hasar yapıcı akım ile karŐılaŐır. Makinelerin birbirlerinden güvenli mesafe uzaklıkta, ancak aynı zamanda düşük maliyet için yeterince yakın tutulması önemlidir. Hem ayrı dmen sularının hem de tüm rüzgâr iftliklerinin davranışının anlaŐılmasına büyük çaba sarf edilmiŐtir. Teknoloji Şimdi olgunlaŐmıŐtur ve akım ayrılması olmazsa hem enerji üretiminin hem de rüzgâr iftliğinde karşılaşılan yüklerin tahmini için güvenilir modeller mevcuttur. Şimdi topografik modellerin ve dmen suyu modellerinin rüzgâr iftliklerinin tertiplerinin optimizasyonunu sağlamak üzere birlikte çalıŐmasına müsait yeni araçlar belirlemektedir. Bazen bu modeller bir rüzgâr iftliğinin üretimini “gözle” yapılan tasarımlara göre %10'a kadar arttırabilmektedir.

Teknolojinin bazı yeni alanları rüzgâr çiftliklerine ilişkin izin hususlarının (rüzgâr türbini ses yayılımı ve verilen rahatsızlık, elektromanyetik haberleŐmenin etkilenmesi, bir rüzgâr iftliğinin ve gerçekçi fotomontajların tesbiti) bir sonucu olarak geliŐmiŐtir. Bu hususların hiçbiri sadece rüzgâr enerjisi için gerekli değildir, ancak her birinin bu yeni tür gelişmenin doğru değerlendirilmesine müsait bazı özel iyileŐmelere ihtiyaı vardır. Rüzgâr enerjisi sektörü bu soruna kadar yükselmiŐ olup, bu konuların her birinde yeni fiziksel ve hesaplama araçları geliştirilmiş, kontrol edilmiş ve benimsenmiŐtir. Planlama aşamasında bir rüzgâr çiftliğine dair doğru bilgi yerel kamuoyuna rüzgâr iftliği hakkındaki doğru ve bilgilendirici bir fikir verecek çevresel beyanların hazırlanmasında zaruridir. Bu yeni araçlar bu gereğin yerine getirilmesine yardımcı olmuştur .

3.6. Elektriksel Entegrasyon

3.6.1. Generatörü Başlatma ve Durdurma

Büyük bir rüzgar türbin jeneratörünü devreye alma ve devreden çıkarma esnasında sıradan, rasgele bir anahtar kullanılırsa jeneratör, dişli kutusu ve yakın çevredeki şebeke akımı zarar görebilir. Kullanılacak anahtar jeneratör tasarımı göz önüne alınarak seçilir.

3.6.2. Rüzgar Türbini + Dizel Sistemleri

Rüzgar türbini, inverteri ve küçük akü bankası ile birlikte bir dizel jeneratörüyle beraber çalışabilir. Rüzgar + Dizel sistemleri en iyi aşağıdaki yollarla kullanılabilir.

- I.** Eğer mevcut bir dizel jeneratör varsa yakıt sarfiyatını azaltmak için kullanılabilir.
- II.** Rüzgar türbini ana ihtiyacı karşılamak için kullanılabilir. Dizel jeneratör de arada bir olan daha yüksek güç ihtiyacını karşılamak veya çok düşük rüzgar zamanlarında rüzgar türbinine destek olmak için kullanılabilir.
- III.** Dünya üzerindeki pek çok elektrikten uzak bölgede dizel jeneratörlerden yararlanılmaktadır. kWsaat başına elektrik fiyatı, o bölgedeki yakıt fiyatına, jeneratörün bakım masraflarına ve dizel jeneratörün verimliliğine bağlıdır. Dizel jeneratörün ilk yatırım masrafları azdır ve dizel teknolojisi dünya çapında iyi bilinen bir teknolojidir. Eğer, siz de kendi yerinize böyle bir sistem kurmak istiyorsanız, rüzgar enerjisinin size sağlayacağı ekonomik faydanın hesabını yapmakta size yardımcı olabiliriz.
- IV.** Eğer kullanım yerindeki elektrik ihtiyacı ara sıra çok yüksek güçlere çıkıyorsa ve bu olay günde toplam 1-2 saat için oluyorsa, ortalama genel ihtiyacı rüzgar türbini karşılar, arada bir olan yüksek ihtiyaç dizel jeneratörle karşılanabilir. Akü voltajını 220V alternatif akıma çeviren inverterin maksimum gücü aşıldığı zaman dizel jeneratör devreye sokulur. Çekilen yük inverterin gücü içerisine girdiği zaman, belli bir süre sonra dizel jeneratör devreden çıkarılır. Jeneratörün verimini artırmak için çalıştığı süre içerisinde aküleri şarj ederek rüzgar jeneratörüne destek olur.

Akü yedekli rüzgar türbini + dizel jeneratör sistemi aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır:

- a. Rüzgar Türbini
- b. Dizel jeneratör seti
- c. Doğrultucu
- d. Kontrol ünitesi + direnç
- e. Akü bankası
- f. İnverter
- g. Dizel jeneratörün otomatik açma/kapama sistemi

3.6.3. Derece Kontrollü Türbinler

Derece kontrollü Rüzgar Türbinleri, türbinlerin elektronik kontrolörü saniyede birkaç kez güç çıkmasını kontrol eder. Güç çıkması gereğinden yüksek hale geldiğinde kanat derece mekanizmasına emir verir. Bu mekanizma ise rotor kanatlarını hemen rüzgarın olmadığı yöne doğru döndürür. Aksi takdirde,tekrar rüzgar oluştuğunda kanatlar rüzgara doğru döner. Normal operasyon sırasında kanatlar bir anda bir derecenin bir küçük bir kısmı kadar döndüğünde rotor aynı anda dönecektir.

Güç kontrollü rüzgar türbininin tasarımı rotor kanat derecesinin miktar şartını sağlayacak düzeyde iyi mühendislik gerektirir. Güç kontrollü rüzgar türbininde,bilgisayar kanatları rüzgar değişmelerinde bir kaç derece döndürecektir. Böylece rotor kanatları tüm rüzgar hızlarında maksimum çıktıyı elde etmek için optimum dereceyi muhafaza edecektir .

3.6.4. Bağımsız Çalışan Akü Şarj Eden Sistemler

Akü şarj eden sistemler, genellikle şebekeden uzak bölgelerde kullanılmaktadır. Şehir dışı yerleşimler, çiftlik evleri, telekomünikasyon aktarıcıları, radyo ve orman kuleleri, askeri tesisler, demiryolu sinyalizasyonu, balık çiftlikleri, seralar, maden ocakları, deniz vasıtaları ve bazı fabrikalarda, aydınlatma, meteoroloji istasyonları, bilimsel ve diğer araştırma istasyonlarında elektrik ihtiyacını karşılar. Rüzgarla akü şarj eden bir sistem başlıca aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır.

- AC çıkışlı Rüzgar Türbini ve 6-18mt yüksekliğindeki kulesi
- Elektronik kontrol ünitesi
- Aşırı şarjdan koruyan direnç
- Akü bankası

- Alternatif akım ile çalışan cihazlar için inverter
 - Özel doğru akım cihazları
- a.** Standart Rüzgar Türbinleri 20Watt - 10kW güçleri arasındadır. Daha yüksek güçler için iki veya daha fazla 10kW'lik türbin paralel bağlanabilmektedir. Rüzgar türbinleri 12, 24, 48 ve 120VDC doğru akım gerilimlerinde üretilmektedir.
- b.** Elektronik kontrol ünitesi, AC çıkışı istenilen doğru akım voltajına çevirmek için kullanılmaktadır. 500 Watt'a kadar olan modellerde ünite pervane içerisinde, daha büyük olan modellerde ayrı bir elektronik ünite olarak bulunmaktadır.
- c.** Voltaj kontrolü aküleri aşırı şarjdan korumaktadır. Aküler tam olarak dolduysa (2.30V/hücre), ve sadece çok az bir yük varsa, rüzgar türbininden gelen fazla enerji, yük direncine aktarılır. Bu direnç hava ısıtan bir dirençtir, istenirse aynı değerlere sahip olan su ısıtıcısı da konabilir.
- d.** Gerekli olan akü bankası sistemin kurulduğu yerin şartlarına bağlıdır. Akülerin uzun ömrünü sağlamak için şarj akımı, akü kapasitesinin %10'nundan fazla olmamalıdır. Örneğin, 600Ah bir akü bankası 60A'in üzerinde bir akımla şarj edilmemelidir. Ayrıca kapasitenin %40'inin altına incek kadar da aküler boşaltılmamalıdır (1.75V/hücre). Akü kapasitesinin %60'ünün kullanılacağı düşünülürse, 2kWsaatlik günlük harcamayı örnek alırsak; 24VDC akü grubu için $2000\text{Watt.saat} / 24\text{V} = 80\text{Ah}$ demektir. Buna göre; günlük akü kapasitesi $80/0.6 = 140\text{ Ah}$.
- e.** Alternatif akım (AC) yükler için yeterli kapasitede bir invertere gerek vardır. Piyasada mevcut olan inverterler genel olarak 12 , 24, 48, 96 ya da 120 V DC girişlidir. İnverterin gücü devamlı ihtiyaç duyulacak maksimum güç kadar olmalıdır. İnverter kendi maksimum gücünün 2 kati kadar anlık güçleri karşılayabilmelidir çünkü elektrik motoru gibi bazı yükler kalkışlarda kendi anlık güçlerinin 3-4 kati kadar yük çekerler. En basit inverterler trapez dalga ile çalışırlar. Aşağı yukarı bütün ev aletleri bu elektrikle çalışır. Fakat bazı özel durumlarda, örneğin ölçme aletlerinde tam sinüs akımına ihtiyaç duyulmaktadır.

f. Doğru akımla çalışan cihazların rüzgar enerjisi ile birlikte kullanılması, çevirici kayıplarının hiç olmaması ya da çok az olmasından dolayı en verimli kullanım seklidir. Bu tip tesislere en yaygın örnekler:

- Telsiz vericileri (12 ya da 24 V DC)
- GSM aktarıcıları (24 V DC)
- Telekom aktarıcıları (48 V DC)
- Motorlu taşıtlar (12 ya da 24 V DC)
- Deniz vasıtaları (12 ya da 24 V DC)
- Uyarı ışıkları (12 V DC)
- 12 ya da 24 V DC ile çalışan elektrikli aletler vs.

Rüzgarla akü şarj eden bir sistem tasarlarken, her zaman çekilecek güç göz önüne alınmalıdır. Daha az enerji harcayan cihazlar; örneğin, elektronik dengeli ampuller, kullanılarak güç ihtiyacı azaltıla bilinir mi, düşünülmelidir.

3.6.5. Alternatif Akımın Filtre Edilmesi

Uygun endüktans ve kapasitanslar kullanılarak, elde edilen alternatif akım daha düzgün bir hale getirilir yani filtre edilir(AC filtre mekanizması).İğne uçlu gerilim yükselmeleri böylece ortadan kaldırılır.

Değişken hız uygulaması bilezikli indüksiyon jeneratöründe rotor dirençleri değiştirilerek sağlanmaktadır. Bu sistemde indüksiyon jeneratörü çıkışlar bir çevirgece gereksinim olmadan doğrudan enterkonnekte şebekeye bağlanabilmektedir. Rotor dirençleri değiştirilmek suretiyle indüksiyon jeneratörün tork – hız eğrisi değiştirilerek güç akışı kontrol edilmektedir. Buradaki sistemde makinenin rotor dirençlerinde kaybolabilecek enerji (rotor terminalleri kısa devre edildiğinde veya dirençle sonlandırıldığında), bir a c – d c – a c çevirici yardımıyla kaynağa geri gönderilmektedir. Sistemin dinamik denklemi yazılacak olursa:

$$T_a = J \frac{d\omega}{dt} = T_w - T_d \quad (3.1)$$

Burada,

T_a : Hızlanma torku (Nm)

T_w : Rüzgar türbininden elde edilen tork (Nm)

T_d : İndüksiyon generatörünün ürettiği tork (Nm)

J : Tüm sistemin eylemsizlik momenti (kgm^2)

ω : Rotor milinin açısal hızı (rad/s)

$T\omega$ rüzgar hızı ile mil hızının bir fonksiyonudur. T_d ise mil hızı ve rotor direncinin bir fonksiyonudur. İndüksiyon generatörünün ürettiği tork, mil hızı sabit kaldığı sürece, rotor direnci arttıkça azalır veya tersi olarak azaldıkça artar. Buna göre T_a değeri 0 olacak şekilde, türbin hızı artma eğilimi gösteriyorsa ($J d\omega / dt > 0$) rotor direnci azaltılır veya azalma eğilimindeyse ($J d\omega / dt < 0$) rotor direnci artırılır. Böylece rotor direnci değiştirilerek indüksiyon generatörü sabit hız uygulamasından değişken hız uygulamasına geçer ve türbin verimi optimum değerinde tutulmuş olur.

Değişken hız uygulaması eğer indüksiyon jeneratörü kullanılıyorsa PWM çevirgeçlerle sağlanır. Bu sistemde indüksiyon jeneratörlerinin reaktif güç gereksinimi PWM çevirgeçler, tarafından sağlanmaktadır. PWM çevirgeçlerin kontrolü bulanık mantıkla gerçekleştirilmektedir. Sistemde 3 tane bulanık mantık kontrolü vardır. Bunlar sırayla jeneratör hız izleme kontrolü, jeneratör akı programlama kontrolü ve kapalı çevrim jeneratör hız kontrolüdür. Jeneratör hız izleme kontrolünde herhangi bir rüzgar hızında sistemin maksimum güç noktası tespit edilir ve jeneratörün hızı maksimum güç verilecek şekilde ayarlanır. Jeneratör akı programlama kontrolünde rotor akısı kontrol edilerek makinenin demir kayıpları azalır dolayısıyla sistemin verimi artmış olur. Kapalı çevrim jeneratör hız kontrolüyle rüzgardaki çok ani değişimleri ve türbindeki salınım torklarına karşı dayanıklı hız kontrolü gerçekleştirilmektedir.

Fırçasız çift beslemeli indüksiyon jeneratör kullanıldığında stator kısmında farklı kutup sayılarında 2 adet sargı bulunmakta olup sırayla güç sargıları ve kontrol sargıları olarak adlandırılmaktadır. Stator sargı frekansları ile rotor mil hızı arasındaki ilişki şu şekildedir:

$$f_c = f_r (P_p + P_c) - f_p \quad (3.2)$$

Burada

P_p ve P_c sırasıyla güç ve kontrol sargılarının kutup sayısı

f_p şebeke frekansı

fr mil hızı

fc gerekli kontrol sargıları frekansı

Buradaki sistemde kullanılan PWM çevirgeçler yardımıyla indüksiyon generatörünün kontrol sargıları frekansı ayarlanarak jeneratör mil hızı kontrol edilmekte ve değişken hız uygulaması sağlanmaktadır.

3.7. Rüzgar Türbinlerinin Dağıtım Şebekesine Bağlantısı

Dağıtım gerilimi seviyesinde şebekeye bağlanması planlanan bir rüzgar santrali, diğer enerji santralleri veya otoproduktör santrallerde olduğu gibi, ancak bağımsız bir enerji nakil hattı ile bir dağıtım merkezine veya TEAŞ trafo merkezine bağlanabilir. Sistem emniyeti ve can güvenliği açısından dağıtım hatlarına saplama girmelerine müsaade edilmemektedir.

Ülkemizin elektrik dağıtım şebekesi genelde 34,5 kV ve daha düşük gerilim seviyesindedir. Rüzgarın bol olduğu kıyı bölgelerimizde trafo merkezlerinin güçleri 25-50 MW olduğu, bu bölgedeki iletim sistemimizin genelde radyal olduğu ve minimum sistem empedansı göz önüne alınırsa, kısa devre güçleri 200-300 MVA ile sınırlı kalmaktadır. Bu durumda dağıtım şebekelerine bağlanacak rüzgar santrallerinin gücü azami 15 MW civarında olmaktadır.

Rüzgar türbinleri çoğu gelişmiş ülkelerde basit sigortalı ayırıcılar ve her bir türbin için trafo ile şebekeye bağlanmakta ve başında eleman bulunmadan işletilmektedir. Personelsiz işledikleri için türbinin her türlü şebeke olayına ve türbin arızalarına karşı koruyan bilgisayarlı bir kontrol sistemi içermekte, çok nadir olarak meydana gelen arızalarda türbin kontrol sistemi tarafından sinyal yollanmakta ve uzaktan müdahale ile teknisyen yollanarak arıza giderilmektedir.

Ülkemizde ise, trafoları, türbinleri ve bağlantı kablolarını korumak için kesici ve ayırıcı gibi ilave teçhizat ve kablo arızalarına karşı ring sisteminin kullanılması şart koşulmakta, mükerrer sayılabilecek bu teçhizat ise santral maliyetlerini arttırmaktadır.

3.8. Rüzgar Türbinleri İletim Şebekesine Bağlantısı

İletim şebekesine bir rüzgar santrali, ya en yakın TEAŞ trafo merkezine çekilecek bir iletim hattı ile, yada en yakın iletim hattına girdi çıktı yaparak şebekeye bağlanabilir İletim şebekemizin gerilim seviyesi 154 veya 300 kV dur. Bu gerilimdeki trafo merkezlerimizin kısa devre güçleri 300-400 MVA dan başlamakta, 10000 MVA ya kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle büyük güçte rüzgar santrali tesis etmek isteyenler ancak iletim şebekesine bağlanabilecektir.

Dağıtım sistemine bağlanacak bir rüzgar çiftliğindeki elektrik bağlantılarının gerilim seviyesi, tercihen bağlanacak trafo merkezinin gerilim seviyesi olarak seçilmektedir. Bu durumda santral çıkışına ilave bir yükseltici (veya düşürücü) trafo tesis maliyeti olmayacaktır. İletim şebekesine bağlanacak rüzgar santralinde ise gerilim seviyesi olarak en ekonomik dağıtım gerilim seviyesi seçilir. Bu durumda, santral çıkışında kullanılacak yükseltici trafonun, ülkemizde kullanılan standartlardan farklı olması durumunda, yedekleme sorunu ortaya çıkabilir.

Rüzgar , santrallerinin üretim şebekesine bağlanması diğer bir şekilde ise, kısa devre gücünün oldukça yüksek olduğu bir 380 kW merkeze bağlanmalıdır. Ülkemizde 380 kW merkezlerinin minimum kısa devre gücü genelde 5000 MVA'nın üzerinde olduğundan böyle bir merkeze çok sayıda rüzgar santrali, şebekeyi rahatsız etmeden bağlanabilir

Burada önemli olan, çok sayıda trafo maliyetinden tasarruf etmek için, gerektiğinde sadece rüzgar santrallerinin bağlanacağı bir kirli bara tesis edilerek en ekonomik çözümün bulunmasıdır.

3.9. Şebeke Üzerindeki Bozucu Etkiler

Rüzgar türbinleri bağlandıkları şebeke üzerinde olumsuz etkilerini genelde gerilim dalgalanmaları, fliker ve harmoniklerin üretilmesi olarak göstermektedir

Gerilim dalgalanması ve fliker, rüzgar türbinlerinin devreye girmesi, devreden çıkması, rüzgara bağlı olarak üretimin değişmesi gibi geçici olaylar nedeniyle oluşmakta ve kullanılan türbin tipine bağlı olarak değişmektedir.

Bugün ülkemizde rüzgar çiftliklerinde kullanılan, yeni rüzgar projelerinde teklif edilen ve gelişmiş ülkelerdeki Pazar payının en ön sıralarında yer alan rüzgar türbinleri, senelerce geliştirildikten sonra sertifika aldıklarından, şebekeyi bozan bu etkileri asgariye indirilmiştir

3.10. Elektriksel Uygulama

Ülkemizde sanayi tesislerinden kesintili olarak enerji çeken tesislerin sistemindeki olumsuz etkilerini sınırlamak için TEAŞ tarafından sınır değerler belirlenmekte ve sistemdeki bu olumsuzlukların sınır değerlerini aşan tüketicilerin gerekli önlemleri almaları istenmektedir.

Rüzgar santralden da kesintili tüketici sınıfına sokulmakta ve elektrik şebekesini zorlayan olumsuzlukların sınır değerlerinin altında kalması istenmektedir. ARES santrali devreye alındıktan sonra TEAŞ tarafından yapılan incelemede, Ortak Kuplaj Noktası olan Alaçatı Trafo Merkezindeki olumsuzlukların sınır değerlerin altında kaldığı kıvançla izlenmiştir.

3.11. Şebekeye Katkıları ve Faydaları

3.11.1. Kayıpların Azaltılması

Ülkemizde üretim kaynakları ile tüketim birimleri arasında uzun mesafeler bulunmaktadır. Çok yüksek gerilim ile taşınan bu gerilim daha sonra yüksek ve orta gerilime indirilerek tüketicilere taşınmaktadır.

Bilindiği gibi ülkemizin doğusundaki enerji tüketim kaynakları tüketimin yoğun olduğu batıdaki merkezlere taşınmasında ve daha sonraki dağıtım şebekelerinde sarfınazar edilmeyecek kadar yüksek oranda enerji kayıpları oluşmaktadır.

Rüzgar kaynakları genelde ülkemizin batısında ve Ege kıyılarında yoğunlaşmaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından çalışmalarda, ülkemizde fizibil olarak tesis edilebilecek on bin MW dolaylarında rüzgar gücü olduğu belirlenmiştir.

Batı yörelerimizdeki uygun bölgelere dağıtılmış olarak tesis edilecek bir-iki bin MW dolaylarındaki rüzgar santrali, gerek çok yüksek gerilimle gerekse yüksek ve orta gerilimle enerjinin kayıplarının azalmasında azda olsa rol oynayacaktır.

3.11.2. İletim Şebekesine Katkısı

İletim sistemimizin işletme maliyetleri arasında, iletim kayıplarına ilaveten, gerekli iletim hatlarının ve indirici trafo merkezlerinin tesis maliyeti de önemli bir yer tutmaktadır.

Rüzgar enerjisi kesintili bir enerji kaynağıdır. Bu nedenle, dağıtım şebekelerinde, tüketiciye götürülecek enerji için dağıtım ve trafo merkezi planlamasında, lokal olarak tesis edilecek rüzgar santrallerinin önemi çok sınırlıdır.

Ancak her bölgenin rüzgar rejimi sınırlıdır. Bir bölgede rüzgar olmadığı halde diğer yörede rüzgar esebilir. Bu güne kadar yaptığımız rüzgar ölçümlerinde, birbirinde 100 km kadar uzak olan iki bölgede farklı rüzgar rejimlerinin olabildiğini gördük. Bu nedenle iletim şebekelerinin ve trafo merkezlerinin planlanmasında daha büyük bir bölge göz önüne alındığından, rüzgar santrallerinin üretimi önemli bir rol oynayabilir ve enerji iletimi planlaması açısından tesis maliyetlerinde nispi bir tasarruf sağlayabilir.

Bilindiği gibi, rüzgar santralleri gibi dağıtılmış ve yüklere yakın olarak tesis edilmiş üretim kaynakları, enterkonnekte iletim şebekesinin stabilite açısından gerekli olan iletim hatlarının tesis maliyetinden de tasarruf sağlanabilir.

3.11.3. Dağıtım Şebekesine Katkısı

Türkiye'deki dağıtım şebekelerinin tasarımında genelde o bölgedeki dağıtım yükleri göz önünde bulundurulur. Özellikle kıyı bölgelerinde yüklerin düşük olması nedeni ile bu bölgelerde dağıtım şebekeleri radyal ve nispeten zayıf olarak tasarlanmıştır. Bunun sonucunda şebekelerin kısa devre gücü düşüktür. Bu ise bu bölgelerde dağıtım şebekelerine bağlanacak rüzgar santrallerinin güçlerinin düşük olmasını gerektirmektedir.

Buna örnek olarak, Alacatı da kurduğumuz Türkiye'nin ilk Yap-İşlet-Devret rüzgar santrali olan ARES'i (Alacalı Rüzgar Enerji Santrali) gösterebiliriz. Alacatı trafo merkezinde 34,5 kısa devre gücünün 200 MVA civarında olması nedeni ile buraya bağlanacak rüzgar santrallerinin toplam gücü 10 MW ile sınırlandırılmıştır.

Diğer yandan ARES, Alacatı-Çeşme'nin enerji gereksiniminin belirli bir oranını karşılamaktadır. Bu ise ilerideki yük artışlarında, ilave trafo tesis maliyetinden tasarruf sağlayacaktır. Şebekeye verilen enerji, 34,5 kV orta gerilim seviyesinden verildiğinden, 154/34,5 kV trafoların reaktif kayıplarından da tasarruf sağlanmaktadır.

Ülkemizin çoğu bölgesinde rüzgarın yoğun olduğu, ancak enterkonnekte şebekelerin uzak ve kısa devre gücünün düşük olduğu yerler bulunmaktadır. Bu bölgelerdeki kısa devre gücü, 1-2 MW gibi, ancak lokal enerji ihtiyacının karşılayacak kadar düşük güçte bir rüzgar santralının tesisine olanak sağlamaktadır.

Rüzgar enerji santrallerinin bu özelliği göz önüne alınarak, dağıtım şebekelerine saplama bağlanmasına olanak tanınır. Diğer yandan bu santrallerde minimum salt cihazının kullanımına onay verilirse, bu yerlere bir veya birkaç rüzgar türbininin tesis edilmesi uygun olacaktır. Böylece lokal ihtiyacının bir bölümü karşılanacak ve dağıtım olarak tesis edilecek bu rüzgar türbinleri ile, dağıtım şebekelerinin hat ve trafo tesis maliyetlerinden ve kayıplardan tasarruf sağlanması mümkün olacaktır.

3.12. Şebekeye Zararları

Avrupa'nın rüzgâr kaynağından yararlanılmasını sınırlayan ekonomik faktörlerden birinin rüzgâr türbinlerinin kurulması için en cazip alanlarda büyük ölçüde zayıf mevcut kamu elektrik şebekesi

olduğu Şimdi açıkça takdir edilmektedir. Temel sorun dağıtım sistemlerinin gücü toplamaya değil, tüketiciler dağıtmaya tasarlanmıŐ olmasındır. Bu nedenle sorun ekonomiktir. İyi bir yerde büyük bir proje mevcut Őebekede nispeten güçlü bir noktaya uzun bir besleme hattı kurulmasını haklı gösterebilir. Ana sorunlardan bazıları:

3.12.1. Sabit Durum Voltajı

Rüzgâr türbini veya rüzgâr iftliğinden kaynaklanan gerçek ve reaktif güç Şebeke empedanslarından aktıka Őebekedeki voltajları etkileyecektir. Şebeke zayıfsa etki büyür.

3.12.2. Voltaj AŞaması Değişmeleri

Elektrik Őirketleri bir müŐterinin voltajda yol açabileceği azami ani adım değişimi sınırlarını belirlerler. Rüzgâr türbini ilk çalışmada veya jeneratörler arası geçiŐte voltajda adım deđiŐimlerine yol açarlar. Bir Őebekedeki çok zayıf noktalar için bu husus bağlanabilecek rüzgâr türbini sayı ve ebadını sınırlayıcı faktör olabilir.

3.12.3. Titreme

Rüzgâr türbini gerçek ve reaktif güçte, dolayısıyla voltajda dalgalanmalara yol açar. Voltaj dalgalanmaları akkor aydınlatma ıŐık yoğunluğunun hissedilir Şekilde dalgalandığı titreme olayı ile müŐteriyi rahatsız edebilir. Değişken hızlı rüzgâr türbini sabit hızlılara göre genelde çok daha az titreme yapar. Titreme zayıf Őebekelerde önemli bir sorun olabilir. Bir tesisin ürettiği titreme limitleri Őirketler arasında değişir. Bazılarının çok basit bir prosedürü varken, bazıları Őebenin titremesini tüm Şebeke kullanıcıları arasında eşit olarak paylaŐtırma tasarımı kompleks bir metodoloji tarif eden uluslararası standartları sahiptir.

3.12.4. Harmonikler

Zayıf kırsal Őebekelerde ev kullanıcılarından doğan ve belirtilen limitleri zaten aşan önemli düzeylerde harmonikler olabilir. Bunlar başlıca olarak akŐam televizyonlar açıldığında zirveye çıkan beŐinci veya yedinci harmoniklerdir.

3.12.5. Voltaj Dengesizliği

Zayıf kırsal Őebekelerde tüketime yüklerinin çoğu tek fazlıdır. Bunlar fazlar arasında eşit olarak paylaŐtırılmazsa voltaj dengesizliği oluşur. Bu Őebekelere bağlanan endüksiyonlu makineler dengesizliği azaltıcı etki yapar, ancak zamanla aşırı ısınırlar. Bazı durumlarda voltaj dengesizliğinin belirtilen düzeyleri aŐtıđı ve rüzgâr türbinleri önemli süre atıl kaldığı bilinmektedir.

3.12.6. Güç Kalitesi

Titreme, harmonikler ve ilgili diğer sorunlar “güç kalitesi”ni ilgilendirir. Rüzgâr türbinlerinin güç kalite standardı halen uluslararası rüzgâr endüstrisinden üyelere sahip IEC Çalışma Grubunca tasarlanmaktadır. Avrupa'nın rüzgâr enerjisi kaynağından tam yararlanılması için Şebeke bağlantısını düzenleyen duyarlı ve iyi değerlendirilmiş düzenlemeler gereklidir. Rüzgâr endüstrisinin gereksiz derecede pahalı Şebeke bağlantılarında doğan kısa devre gücü ile rüzgâr türbini kapasite arası orantıya dayalı esnek olmayan elektrik Şirketi kriterlerini sorgulaması gereklidir.

“Kabul edilebilir asgari Şebeke gücü” tek bir rüzgâr türbininin diğer tüketicilere yetersiz etkiler (kötü güç kalitesi) yaratmadan bağlanabileceği bağlantı noktasının asgari kısa devre düzeyidir. Bu değer küçüldükçe bir noktaya kötü etkiler yaratmadan bağlanabilecek türbin kapasitesi açıkça artmaktadır. Bu parametreye duyulan ilgi Alman elektrik Őirketlerinin Şebekeye çok sayıda rüzgâr türbini bağlama davranıŐına yol açmıştır. Bu, sektör için hem teknolojik gelişmenin önemli bir alan olduğuna hem de tekno-politik endişe alanına iŐaret etmektedir.(Arıkan 1984)

3.13.Çevresel Maliyetler ve Yararlar

Her türlü üretimin çevresel maliyetler ve yararları bütün olarak geniş kabûl göre de bunlara parasal kaynak ayrılması teŐebbüsleri genellikle sıcak tartıŐmalar yol açmakta ve nadiren kabûl görmektedir. Petrol, gaz, kömür gibi fosil yakıtların yakılması büyük ölçüde çevresel ve sosyal hasara yol açan emisyonlar yaratmaktadır. İklim deđiŐiminin tam maliyeti henüz tam takdir edilmemiştir. Artan kararsız hava tarzı, yükselen deniz düzeyleri ve artan hastalık oranı muazzam potansiyel sosyoekonomik maliyetleri beraberinde getirir.

3.14. Standartlar ve Belgeleme

3.14.1. Rüzgâr Türbini Belgelemesi

Rüzgâr türbinlerinin belgelenmesi sektör için sadece Avrupa'da değil, önceleri ABD'nin düzensiz piyasasında, Güney Amerika, Asya ve Avustralya'da yükselen pazarlarda artan önemde bir gerek haline gelmiştir. Yasal gerek haline gelmiştir. Yasal gerek olmayan pazarlarda bile belgeleme bir rüzgâr projesinin yatırım ve sigorta temini için ticari gerekliliktir.

Kuzey Avrupa'da, özellikle Danimarka, Almanya ve Hollanda'da rüzgâr türbinlerinin belgelenmesi rüzgâr projelerinin inşaat izni ve/veya sübvansiyon alabilmesi için uzun süreden bu yana gereklidir. Bu üç ülkede kurallar ve standartlar belgeleme esası olarak geliştirilmiş olup, bunlar imalâtçıların benimsediği tasarım usûllerini doğrudan etkilemektedir. İlgili ulusal standartlar ve belgeleme kuralları:

- (Danimarka'da) Danimarka DS 472 standardı (14) ve onay ve belgeleme Teknik esası
- Almanya'da (16) Alman Yapıteknîği Enstitüsü (DIBt) Rüzgar Türbinleri Mevzuatı", Alman Lloyd (GL) "Rüzgar Enerjisi Dönüştürme Sistemleri Belgeleme Mevzuatı"
- Hollanda'da "Rüzgâr Türbinleri Tip Belgeleme Teknik Kriterleri, NEN 6069/2

Bu çeşitli ulusal standartlar ve belgeleme kuralları arasında emniyet faktörleri ve tasarım yük durumlarından rüzgâr türbini emniyet sisteminin farklı gereklerine kadar önemli farklılıklar vardır. Standartlar ve belgeleme kurallarının uyumlulaştırılması aşağıda açıklanan uluslararası girişimlerin arasındaki başlıca itici güç olmuştur.

Yukarıda sayılan standartlar ve belgeleme kurallarına ek olarak özellikle deniz rüzgâr türbinlerinin belgelenmesi için Alman Loydu' nun yayınladığı bir dizi kural mevcuttur.

Bu kurallar halen deniz rüzgâr tesisleri için mevcut tek tasarım ilkeleridir.

3.14.2. Uluslararası Standartlar

1987 yılında Uluslararası Elektroteknik Komitesine (IEC) bağlı "Eylem Komitesi" rüzgâr enerjisi alanında uluslararası standartlar geliştirilmesini başlatılması gereğine karar verdi. Bir teknik komite, IEC/TC88 ve teknik alanlarda odaklanacak Çalışma Grupları kuruldu. 1987 yılından bu yana aşağıdaki uluslararası standartlar geliştirilmiş ve onaylanmıştır:

- IEC 1400-1: Rüzgâr Türbin Jeneratör Sistemleri Emniyeti
- IEC 1400-1: Küçük Rüzgar Türbinlerinin Emniyeti

Bu iki standart dünya çapında rüzgâr endüstrisinde büyük önem görmektedir.

Diğer iki IEC standardı halen son onay aşamalarındadır. Bu standartlar rüzgâr türbinlerinin akustik ölçüm teknikleri ve güç performansı ölçüm teknikleri alanlarını kapsamaktadır. Ayrıca aşağıdaki alanlarda standartlar ve ilkeler hazırlamak üzere IEC/TC88 Çalışma Grupları kuruldu:

- IEC 1400-1 değişikliği
- Kanat test yöntemleri
- Belgeleme yöntemleri standardizasyonu
- Güç kalitesi
- Mekanik yük ölçümleri

Tüm Avrupa iç pazarında uyumluluğun artırılması amaçlı ayrı bir girişim olarak Avrupa Komisyonu elektrik işlerinden sorumlu Avrupa standartları kurumuna (CENELEC) yetki vermiştir. Bu yetki CENELEC'in Avrupa pazarında rüzgâr türbinleri için standartlar geliştirmesini öngörmektedir. CENELEC'in faaliyetleri oldukça ilerlemiştir ve her ne zaman mümkün olursa çıkacak standartların eşdeğer IEC belgelerini esas alacağı açıktır.

3.15. Rüzgar Enerji Santrali İşletme ve Bakımı

3.15.1. Rüzgar Enerji Santrali (RES) İşletmeciliği

Rüzgar enerji santrallerinde üretim yapabilmek için kaynak olarak gereken tek unsur "rüzgar"dır. Nükleer santraller veya termik santrallerden farklı olarak üretim için gereken kaynağı stoklamak, istenildiği ölçüde kullanmak gibi bir durum söz konusu değildir. Bu sebepten dolayı elinizde mevcut olan kaynağı, bu kaynak var olduğu sürece en etkin şekilde kullanmanız gerekir. Bunu sağlamanın tek yolu da tesisin "emre amadeliliği" nin maksimum olmasıdır. Emre amadelikten anlaşılması gereken "tesisin sürekli olarak üretim yapmaya hazır durumda bulunması"dır. 15-20 m/s hızlarda tam kapasitede çalışan bir tesisin, gereken özenin gösterilmemesi nedeniyle, çalışmaması hiçte hoş bir durum değildir.

İstenilen hedefe ulaşabilmek için üzerinde önemle durulması gereken iki ana konu vardır;

1-Bakım

2-Kontrol

3.15.2. Rüzgar Türbinleri Periyodik Bakım

Üretici firmanın tavsiyesi ve prosedürüne uygun olarak belirli aralıklarla tekrarlanan bakım çakışmalarının tamamı "Periyodik Bakım" adı altında toplanabilir Bu çalışmalar yağlama, sistem tesisleri ve kontroller, değişmesi gereken ekipmanlar ve temizlik konularını kapsar.

3.15.2.1. Yağlama

Makine ömrüne doğrudan etki eden en önemli faktörlerden biri yağlamadır. Yüksek miktarda statik ve dinamik yüklere maruz kalan ana yatak, dişli kutusu, kanat, jeneratör, absorber ve kaplin bağlantılarının uygun yağlayıcılarla , uygun miktarda, uygun periyotlarla yağlanması,hidrolik ünitenin ve dişli kutusunun yağlarının belirli periyotlarla analizlerinin yapılması ve zamanında değiştirilmesi işlemlerini kapsar. Yağlama sorunu nedeniyle sistemde meydana gelebilecek en küçük arızanın giderilme süresi birkaç saat yerine birkaç gün hatta birkaç ay olarak ifade edilebilir. Bu süre zarfındaki üretim kayıplarının yüksek miktarlarda olacağı bellidir.

3.15.2.2. Sistem Testleri

Hidrolik sistem, pitch bağlantıları, rotor-kanat kontrol mekanizmaları ve elektriksel testleri kapsar. Sistemin kontrolünü sağlayan bu ekipmanlarda yapılacak kontroller

- Bağlantı elemanlarının kontrolü
- Sıcaklık sensörlerinin kontrolü
- Isıtıcı-soğutucu kontrolleri
- Basınç kontrolleri
- Anemometre-windvane kontrolleri
- Yaklaşım açılan (ofset) kontrolleri
- Kapasitör kontrolleri
- Hız koruma sistemlerinin kontrolü

- Emergency stop butonlarının kontrolü gibi sağlıklı çalışmayı sağlayacak tüm teçhizatların işlevlerini test etme işlemidir. Periyodik bakımlarda tamamı kontrol ve test edilen bu sistemlerden bazıları olası arıza bakımlarında türbine çıktığı zaman görsel olarak kontrol edilmelidir.

3.15.2.3.Temizlik

Çalışan sistemlerde zamanla toz, yağ birikintilerinin olması normaldir Bu kirliliği mümkün olduğunca azaltacak önlemler alınmalıdır. Türbine çıkıldığı zaman temizliğe azami önem gösterilmelidir. Bu sayede ileride sorun çıkarabilecek durumların tespiti (yağ kaçaqları, v.s.) kolaylaşır.

3.16. Rüzgar Türbinleri ile İlgili Özel Konular

3.16.1. Kuş Ölümleri

Gözlemler, rüzgar türbini çevresinde yaşayan kuşların türbinlere alıştıklarını göstermektedir. Yerli olmayan göçmen kuşlarının da en az 200 m yüksekten uçtukları düşünüldüğünde, rüzgar türbinlerinin kuşlar için çok tehlikeli olmadıktan sonucu doğmaktadır.

3.16.2. Gölge Etkisi

Tüm yüksek binalar gibi rüzgar türbinleri de, gölge etkisi göstermektedirler. Rüzgar türbinlerinden 500-1000 metre uzaklıkta, bu etki yok denecek kadar azdır.

3.16.3. Televizyon Yayınları

Tüm büyük yapılar gibi rüzgar türbinleri de verici ile alıcı arasında bulunmaları durumunda televizyon yayınlarının izlenmesinde problem yaratmaktadırlar Rüzgar türbinlerinin televizyon yayınlarını etkileme mesafesi; pervane yarıçapı ve televizyon sinyallerinin dalga boyu ile orantılı olarak artmaktadır.

Rüzgar türbinleri nedeniyle oluşan televizyon yayınlarını izleyememe problemi; alıcı antenlerindeki düzenlemelerle veya bir yardımcı verici ile çözülebilmektedir. Kablo yayınları ve uydu vericili kanalların yayınları ise, doğal olarak rüzgar türbinlerinden etkilenmemektedir.

3.16.4. İklim Etki

Betz'e göre, rüzgar optimum enerji elde si için, pervane öncesi üç birimlik rüzgar hızı, pervane sonrasında bir birime iner. Bu nedenle, rüzgar türbinlerinin iklime etki yaptığı doğrudur. Fakat bu etki, ihmal edilebilecek düzeydedir. İklim açısından hava hareketlerine ihtiyaç duyulan düşük rüzgar hızlarında türbinleri çalışmazlar. Yüksek rüzgar hızlarında ise, hareketli havanın frenlenmesi istenir. Rüzgar türbinleri de bunu yapmaktadır. Bu nedenlerle, rüzgar türbinlerinin iklime negatif etkide bulunduğu eleştirisine katılmak mümkün değildir (Anonim 2001)

3.17. Rüzgar ve Diğer Yakıtların Maliyet Karşılaştırılması

Rüzgar enerjisi gelecekteki pazar başarısı için en önemli kriter olan ekonomik maliyette kararlı ve hızlı bir gelişme göstermektedir. 1990 lı yılların başında Pasific Gas & Electric ve Electric Power Research Institute tarafından yapılan ve rüzgar enerjisinin en ucuz elektrik üretim kaynağı olacağına ilişkin uzun vadeli öngörüler artık hayal olmayıp gerçekleştirilmek üzeredir. Kaliforniya Enerji Komisyonu çeşitli enerji seçeneklerinin maliyetlerini ve pazara hazırlılıklarını incelemektedir (çizelge 1.17) temel yakıt tiplerinin maliyetini rüzgar enerjisi ile karşılaştırmaktadır.

Çizelge 3.10. Rüzgar ve Diğer Yakıtların Maliyet Karşılaştırılması

(Oğuzhan Akyüz , Asmakinsan, Ankara)

<u>Yakıt</u>	<u>Maliyet (sent/kWh)</u>
Kömür	4.8-5.5
Gaz	3.9-4.4
Hydro	5.1-11.3
Biomass	5.8-11.6
Nükleer	11.1-14.5
Rüzgar (ABD Federal Üretim Vergi Kredisi hesaba katılmadan,)	4.0-6.0

Rüzgar maliyetleri artık fosil yakıtların en ucuz seçenekleri olan kömür ve gaz ile rekabet edebilir duruma gelmiştir ve enflasyona göre düzenlenen ABD Federal Üretim Kredisi ile rekabet daha da iyileştirilebilecektir.

- Rüzgarın gücü iki faktörden etkilenmektedir, ortalama rüzgar hızı ve faiz oranları
- Rüzgar yeni bir teknolojidir ve maliyeti konvansiyonel üretime göre daha hızlı düşmektedir.

Rüzgar türbinleri için yakıt maliyeti yoktur .Projenin maliyeti ödendikten sonra sadece işletme ve bakım maliyetleri söz konusudur. Yatırım maliyeti toplam maliyetin %75 ila %90 'ını oluşturmaktadır. Türbin maliyeti kW güç başına halen 600-900 Euro'dur. Projenin hazırlanması ve tesis etme maliyetleri kW başına 200-250 Euro daha eklemektedir. Bu rüzgar türbinlerinin toplam maliyetini kW kurulu kapasite başına 1000 Euro ya ulaştırmaktadır. Rüzgar enerjisi geliştirmenin işletme maliyetleri üretilen kWh elektrik başına yaklaşık 1-2 Euro mertebesindedir. Bu maliyet arazi kirası, bakım ve sigorta primlerini kapsamaktadır .

3.18. Rüzgar Çiftliği İçin Gerekli Parametrelerin İncelenmesi

Bugünkü tüketim oranları baz alınarak yapılan hesaplamalara göre, günümüzde yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlardan kömürün 240, petrolün 43 ve doğalgazın 67 yıl sonra tükeneceği belirtilmektedir. Bugünkü enerji planlamaları ve bunların sonucunda yüz yüze gelinen çevreci karşı çıkışlar, gerek fosil yakıt kullanılan santrallerin, gerekse geleceği halen açıklık kazanmayan nükleer enerji kullanımının önünü tıkamaktadır.

3.19. Gerçekçi Bir Yatırım İçin Gerekli İncelemeler

Rüzgar türbini teknolojisi gelişimi, çevre dostu bir enerji kaynağına yatırım için yeni bir fırsat yaratmaktadır. Hızlı bir biçimde gelişen rüzgar enerjisi endüstrisinde gerçekçi bir yatırım için yapılması gereken incelemeleri şöyle sıralamak gerekir,

- 1- Çiftliğin kurulacağı bölgenin belirlenmesi.
- 2- Bölgenin ön değerlendirmesi.
- 3- Rüzgar hızı gözlemleri ve veri analizi.
- 4- Yüzey yapısı modellemesi ve mikro -konuşlandırma.
- 5- Alt yapı tasannu ve türbin seçimi.

6- Enerji üretimi değerlendirmesi.

7- Ekonomik analiz.

8- Çevre etki değerlendirmesi

3.19.1.Teknik Fizibilite ve Mühendislik Tasarımları

Yapılması gereken teknik ve mühendislik işlemleri şöyle sıralanabilir:

- Rüzgar türbinlerinin satın alma koşullarının ve mevcut türbinlerin teknik karakteristik fiyat analizlerinin hazırlanması.
- Rüzgar çiftliği bölgesinin incelenmesi; yerin jeolojik yapı analizi ve yol gereksinimin belirlenmesi
- Rüzgar türbini temel inşaatının tasarlanması
- Bölgenin elektrik şebekesinin incelenmesi
- Ana şebeke bağlantılarının, tasarlanması
- Teknik veri ve türbin karakteristiklerinin gerçekleşme durumlarını belirlemek için rüzgar türbini performans testi ölçümlerinin yapılması.

3.19.2.Enerji Üretimi İncelemesi

Bir rüzgar çiftliğinin net enerji üretimi, projenin ekonomik açıdan uygulanabilirliğin belirlenebilmesindeki anahtar faktörlerden birisidir. Bu, bilgisayar ortamında hazırlanan modeller kullanılarak hesaplanır.

Dijitize edilmiş yeryüzü verisi, rüzgar türbini verisi, rüzgar hızı ve yönü dağılımları, rüzgar profili ve türbülans düzeylerini rüzgar türbini dizilişiyle birleştirerek, türbinlerin tek tek ve bir arada üretecekleri yıllık enerji miktarları hesaplanır. Bu hesaplamalarda, çiftlik bölgesindeki akış değişimleri ve iz bölgesi etkileri de dikkate alınmalıdır. Elektrik sisteminde meydana gelebilecek diğer kayıplarda bu hesaplamalara dahil edilebilir. Prosedürün etkileşimli olarak kullanılmasıyla türbin dizilişini optimize etmek ve böylece enerji üretimini, dolayısıyla karlılığı en yüksek değerine yükseltmek de mümkündür.

Bu işlemler sonucunda rüzgar çiftliğinin toplam ve ayrı ayrı her türbinin beklenen yıllık enerji üretimi miktarları elde edilir.

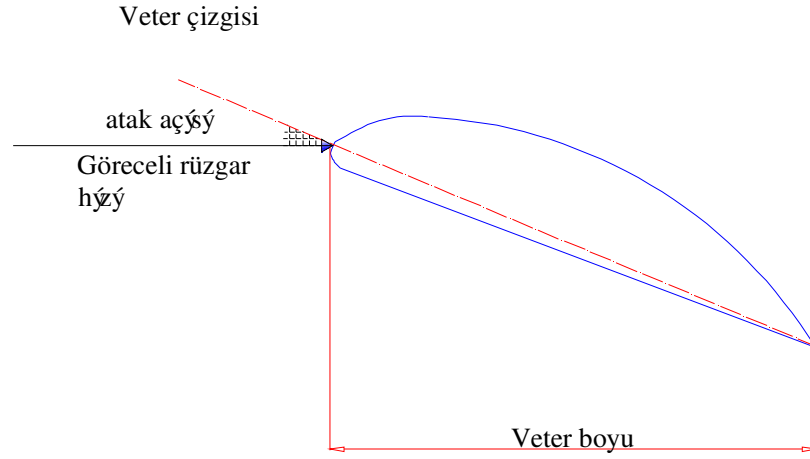
3.19.3.Elektriksel Alt Yapı Tasarımı:

Rüzgar çiftliği planlamalarında ihmal edilen özelliklerden bir tanesi de elektriksel alt yapının durumudur. Bu, rüzgar çiftliğinin yatırım maliyeti, enerji üretimi ve dolayısıyla karlılığı üzerinde önemli etkilere neden olabilmektedir. Elektrik sistemindeki kayıplar tipik olarak rüzgar çiftliğinin toplam üretiminin %2-3'ü kadardır. Bu nedenle optimum hat ve transformatörlerin belirlenmesi gerekmektedir. Maliyetlerin ve iletim hatlarıyla transformatörlerin belli bir alan için enerji kayıplarının veri tabanı kullanılarak yatırım maliyetleri ve enerji kayıpları hesaplanır. Alınan enerji ve reaktif güç miktarları ayrıca belirlenmektedir. Daha sonra basit bir yatırım -kazanç testi yardımı ile en ekonomik durum belirlenir

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Airfoil Kanat

Etkin enerji elde etmek için modern rüzgar türbinleri Airfoil kesit formunda imal edilirler, Bu form NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) tarafından kullanılmıştır. Bir airfoil kesiti üzerindeki önemli açı ve kavramlar kesitte Şu Şekilde gösterilebilir ,



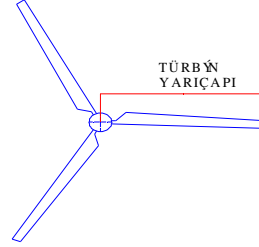
Şekil 4.1. Airfoil Kesiti

Veter Çizgisi: Kesiti boydan boya kesen en uzun eksen çizgisine veter çizgisi denir sanal bir eksendir.

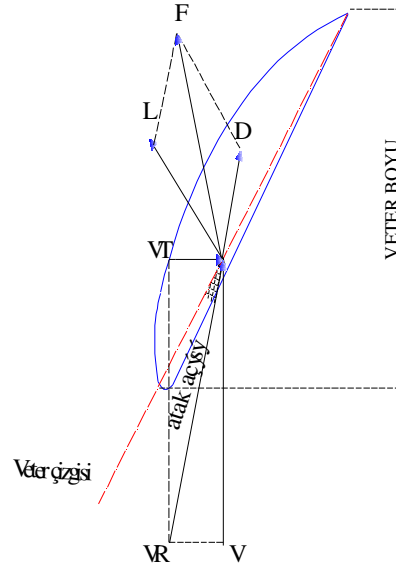
Veter Boyu: Veter eksenin kanat kesiti üzerinden geçtiği başlangıç ve bitiş noktası arasındaki mesafedir.

Atak Açısı : Veter çizgisi ile Göreceli rüzgar hızı arasında kalan açıdır.

4.1.1. Airfoil Üzerindeki Açı ve Büyüklükler



Şekil 4.2. Türbin Kanadı



Şekil 4.3. Airfoil Üzerindeki Açı ve Büyüklükler

F= Basınç farkından doğan kuvvet

L= Kaldırma kuvveti

D= İteleme kuvveti

V_R = Göreceli rüzgar hızı

V_T =Türbin hızı

$V_R = V$ ile V_T nin bileşenidir

V_R de L ve D gibi iki bileşene sahiptir. Bu koşullar altında α Hücüm açısı relatif hız ile veter çizgisi arasındaki açıdır.

V_T hızı türbin yarıçapı ile değişmektedir,

$$V_T=2*\Pi*R/T \quad (4.1)$$

V_T nin değişimi ile birlikte vektörel olarak V_R de değişir buna bağlı olarak hücüm açısının korunması için kanadın bükülmesi gerekir.

Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini etkileyen diğer bir etken de Reynold sayısıdır.

$$Re=V*C/\gamma \quad (4.2)$$

V= Rüzgar hızı

γ = Havanın kinematik vizikozitesi

$\gamma=20^0C$ de $15*10^{-5}$ m/sn dir.

Fakat pek çok uygulamada reynold sayısının etkisi ihmal edilir. Bu çalışmada da reynold sayısı dikkate alınmamıştır

Türbin tasarımında kullanılan önemli kavramlar aşağıda açıklanmıştır,

ρ_a = Havanın özgül ağırlığı ($1,225 \text{ kg/m}^3$)

C=Veter boyu

R=Türbin yarıçapı

B= Türbinin kanat sayısı

λ = Uç hız oranı

α = Hücüm açısı

β = Kanat ayar açısı

Φ = Göreceli rüzgar açısı

P_D = Türbinden beklenen güç

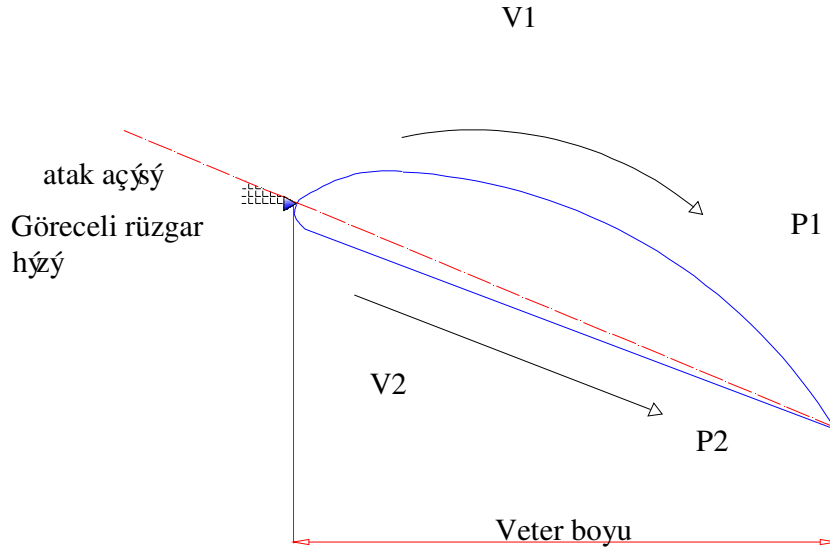
R =Türbin yarıçapı

CP_D = Türbin güç katsayısıdır ve değeri 0,4- 0,45 arasında alınır

λ_r =r çapındaki uç hız oranı

λ_D = D çapındaki uç hız oranı

4.1.2. Türbin Kanadına Etkiyen Kuvvetler



Şekil 4.4. Türbin Kanadına Etkiyen Kuvvetler

Bir airfoil kesitli kanat Rüzgara maruz kaldığında, hava, kesitin altından ve üzerinden akar fakat alttan akan hava daha yavaştır. $V_1 > V_2$

Bernoulli denklemine göre

$$P_1/\gamma + V_1^2/2g + h_1 = P_2/\gamma + V_2^2/2g + h_2 \quad (4.3)$$

$P_2 > P_1$ dir.

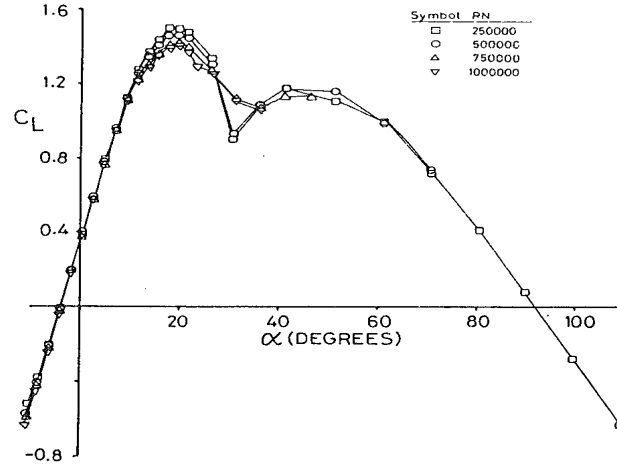
Bu durum kesitin üst kısmında düşük basınç oluşturur, bu basınç farkından dolayı bir F kuvveti meydana gelir bu F kuvveti bir kaldırma kuvveti L ve iteleme kuvveti D gibi iki adet bileşene sahiptir ,

Burada Sürüklenme kuvveti kanadın dönüşüne karşı bir direnç kuvvetidir, kaldırma kuvveti ise kanadın dönmesine yardımcı olan kuvvettir.

$$L=C_L*1/2 *\rho_A*A*V^2 \quad (4.4)$$

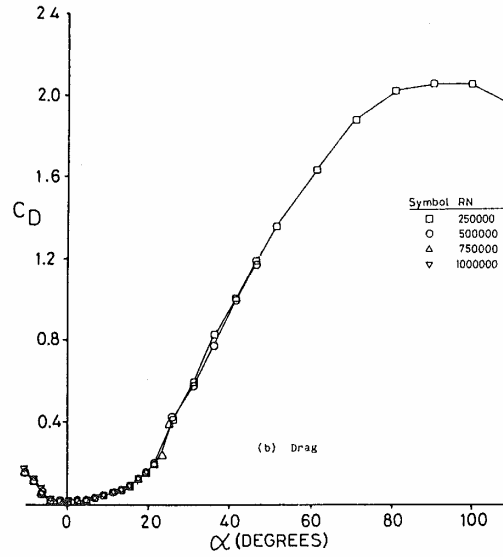
$$D=C_D*1/2 *\rho_A*A*V^2 \quad (4.5)$$

Buradaki C_L ve C_D sürüklenme ve kaldırma katsayıdır.



(a) Lift

Şekil 4.5. NACA 4412 İçin Kaldırma Katsayısının Hücum Açısı ile Değişimi



(b) Drag

Şekil 4.6. NACA 4412 İçin Sürüklenme Katsayısının Hücum Açısı ile Değişim

CL değerinin teorik olarak hesaplanması mümkün değildir deneysel olarak belirlenir.

D Sürüklenme kuvveti ihmal edilecek kadar küçük bir kuvvettir,

Düşük hücum açılarında kaldırma katsayısı lineer bir artış göstermektedir ve $\alpha = 17^\circ$ de ani bir düşüş gözlenmektedir bunun nedeni en büyük hücum açısında hava bir türbülans bölgesine girer ve sınır katmanı kesit yüzeyinden ayrılır. Bu bölgede kaldırma kuvveti hızla düşer ve sürüklenme kuvveti artar.

Deneysel olarak belirlenen en iyi atak açısı değeri 5 derecedir.

Bu çalışmada NACA 4412 KODU ile adlandırılan kanat kesiti kullanılmış ve tüm hesaplamalar bu kesite göre yapılmıştır.

4.2. Uç Hız Oranlarının Hesaplanması

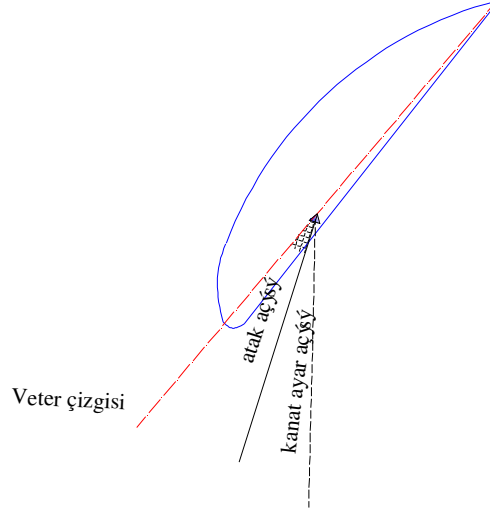
$$\lambda_r = \lambda_D \cdot r / R \quad (4.6)$$

$dr = 10 \text{ cm}$

Her 10 cm deki uç hız oranları hesaplandığında ortaya çıkan değerler çizelge (4.1) de verilmiştir

Çizelge 4.1.Uç Hız Oranının Yarıçap ile değişimi

Uç hız oranı	
λ_{r1}	1
λ_{r2}	1,5
λ_{r3}	2
λ_{r4}	2,5
λ_{r5}	3
λ_{r6}	3,5
λ_{r7}	4
λ_{r8}	4,5
λ_{r9}	5



Şekil 4.7. Airfoil Üzerinde Açılar

$$\beta = \Phi - \alpha \quad (4.7)$$

$$\Phi = \frac{2}{3} \cdot \tan^{-1}(1/\lambda_r) \quad (4.8)$$

$$\lambda_r = \lambda D \cdot (r/R) \quad (4.9)$$

$$C = 4 \cdot D / (\lambda D^2 \cdot B) \quad (4.10)$$

B, Türbindeki kanat sayısı 3 tür,
 Bu ifadelerden kanat ayar açısı ve Göreceli rüzgar açısı hesaplanır.
 Hesaplanan değerler (Çizelge 4.2) de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Yarıçap ile Airfoil Açılarının değişimi

KESİT	KESİT YARIÇAPI	ATAK AÇISI	ETKİNLİK	VETER BOYU	λ_r	Φ	β
	METRE			cm			
r1	0,22	5	0,8	23	1	30	26
r2	0,33	5	0,8	20	1,5	22,4	18,4
r3	0,44	5	0,8	16	2	17,7	13,7
r4	0,55	5	0,8	14	2,5	14,534	10,534
r5	0,66	5	0,8	13	3	12,289	8,289
r6	0,77	5	0,8	11,7	3,5	10,6	6,6
r7	0,88	5	0,8	10,7	4	9,357	5,357
r8	0,99	5	0,8	9,7	4,5	8,352	4,352

4.3. Rüzgar Rürbinlerinde Betz Limiti, Güç ve Tork

Teorik olarak bir rüzgar türbininin gücünü hesaplamak mümkün olsa da, pratik olarak Rüzgardan elde edilebilecek gücü hesaplamak mümkün değildir.

Rüzgar türbin üzerinden geçtiğinde içerisinde var olan kinetik enerjinin ancak bir kısmını türbine aktarır bu aktarım belirli bir katsayı ile orantılıdır ve bu katsayı c_p 'dir ve betz limiti olarak tanımlanır.

$$C_p = 2 \cdot P_T / q_a \cdot A_T \cdot V^3 \quad (4.11)$$

P_T = Türbin tarafından üretilen güç

q_a = havanın yoğunluğu

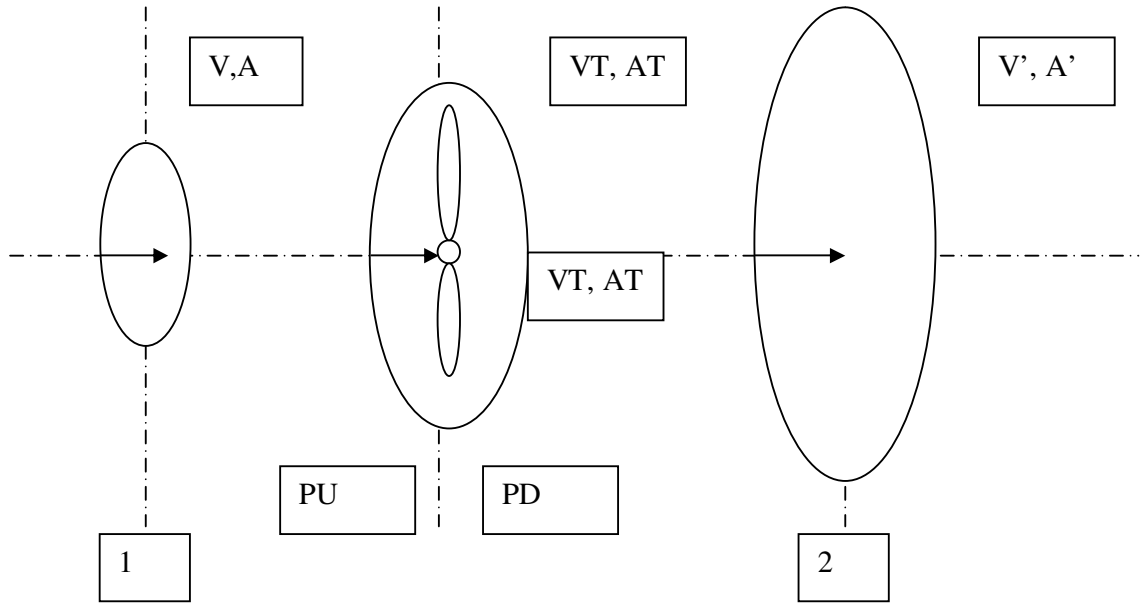
A_T = türbinin taradığı alan

V = rüzgar hızıdır

Bu ifadeye gücü denklemden çekecek olursak,

$$P_T = 1/2 * \rho_a * A_t * V^3 * c_p \quad (4.12)$$

C_p yi aksel momentum teorisine göre hesaplamak mümkündür.



Şekil 4.8. Betz Limiti

1. Analiz ideal koşullarda yapılmıştır.
2. Türbin sonsuz sayıda pervaneye sahiptir.

A_T = Türbin alanı

V_T = Türbindeki rüzgar hızı

A = 1 Numaralı kesit alanı

A' = 2' Numaralı kesit alanı

V = 1 Numaralı kesitteki rüzgar hızı

V' = 2 Numaralı kesitteki rüzgar hızı

Kütlenin korunumu ilkesi gereği;

$$\rho a * A * V = \rho a * A_T * V_T = \rho a * A' * V' = m$$

Türbin üzerinde oluşan aksel kuvvet 1 ve 2 kesitlerindeki momentum değişimlerinden kaynaklanır, Bu durumda

$$F = \rho a * A * V^2 - \rho a * A' * V'^2 \quad (4.13)$$

$$A * V = A' * V' = A_T * V_T \quad (4.14)$$

$$F = \rho a * A_T * V_T * (V - V') \quad (4.15)$$

Ayrıca kuvvet türbinin önünde ve arkasındaki basınç farkı ifadesi olarak yazılacak olursa

$$F = (P_U - P_D) A_T \quad (4.16)$$

1 ve 2 noktalarında bernoulli denklemini yazacak olursak

$$P + \rho a * V^2 / 2 = P_U + \rho a * V_T^2 / 2 \quad (4.17)$$

$$P + \rho a * V'^2 / 2 = P_D + \rho a * V_T^2 / 2 \quad (4.18)$$

$$P_U - P_D = \rho a * (V^2 - V'^2) / 2 \quad (4.19)$$

$$F = A_T * \rho a * (V^2 - V'^2) / 2 \quad (4.20)$$

$$A_T * \rho a * (V^2 - V'^2) / 2 = \rho a * A_T * V_T * (V - V') \quad (4.21)$$

$$V_T = (V^2 - V'^2) / 2 \quad (4.22)$$

Rotor kesitlerindeki rüzgar hızı 1 ve 2 no' lu kesitlerdeki rüzgar hızlarının aritmetik ortalamasına eşittir

a iletim faktörü olarak tanımlanır,

$$a = V - V_T / V \quad (4.23)$$

$$a = 1 - V_T / V$$

$$V_T = V * (1 - a)$$

$$V' = V * (1 - 2a) \quad (4.24)$$

Türbinin ürettiği güç Rüzgarın kinetik enerjisinin türbine iletilmesiyle sağlanır ve buradaki kütle transferi

$$M=\rho*A_T*V_T \text{ olarak yazılır} \quad (4.25)$$

$$P_T=0.5*\rho*a*A_T*V_T*(V^2-V'^2) \quad (4.26)$$

$$P_T=0.5*\rho*a*A_T*V^3*4a*(1-a)^2 \quad (4.27)$$

Burada $4a*(1-a)^2$ ifadesine C_p Yani güç etkinlik katsayısı denir

C_p değerinin maksimum olabilmesi için

$$dC_p/da=0 \quad (4.28)$$

bu difransiyel denklemin çözülmesiyle $a=1/3$ olur

bu değer $4a*(1-a)^2$ ifadesinde yerine konursa yatay türbinler için 16/27 olan bertz limiti elde edilir.

Burada maksimum güç ifadesi

$$P_T \text{ max } =0.5*\rho*a*A_T*V^3*16/27 \text{ olarak yazılır.} \quad (4.29)$$

Türbinden beklenen güç ifadesi

$$P =0,5*C*PD*\eta_d*\eta_g*\rho*a*A*T*V*D^3 \quad (4.30)$$

Buna istinaden türbin yarıçapı

$$R=(2*P/ C*PD*\eta_d*\eta_g*\rho*a*\pi*V*D^3) \text{ şeklinde yazılır} \quad (4.31)$$

η_d, η_g =jeneratör ve dizayn etkinlik katsayılarıdır

$R=1$ metre olan rüzgar türbini için Farklı rüzgar hızlarında elde edilecek güç tablosu aşağıda verilmiştir .

Çizelge 4.3. Güzgar Hızına Bağlı Güç Üretimi

GÜZGAR HIZINA BAĞLI OLAN GÜÇ ÜRETİMİ							
PD=	0,5	C*PD	$\eta_D * \eta_G$	1.225	$V * D^3$	π	
RÜZGAR HIZI							GÜÇ
M/SN							WATT
5	0,5	0,45	0,9	1,225	125	3,14	97,3645
8	0,5	0,45	0,9	1,225	512	3,14	398,805
10	0,5	0,45	0,9	1,225	1000	3,14	778,916
12	0,5	0,45	0,9	1,225	1728	3,14	1345,97
15	0,5	0,45	0,9	1,225	3375	3,14	2628,84

4.5. Türbin Kanadı İmalatı İçin Malzeme Seçimi

Rüzgar türbinlerinin kanatları, alüminyum, çelik, elyaf ile güçlendirilmiş plastik (cam elyafı, karbon elyafı ve aramid elyafı) ve ağaçtan imal edilmektedir. Modern rüzgar türbinlerinin kanatlarının hemen hemen tamamı, cam elyafı ile güçlendirilmiş polyester veya epoksi gibi, cam elyafıyla plastikten üretilirler.

Polimer kompozitler, termoset veya termoplastik yapılarda, tek ya da çok yönde takviye özelliği sağlayacak biçimde cam elyafı veya diğer takviye malzemelerinden katılmış bir polimer matrikstir.

Rüzgar kanadı yapımında kullanılan temel yapı elemanları şunlardır.

1. Reçineler
2. Takviye malzemeler
3. Core (ara) malzemeler
4. Kalıp ayırıcılar
5. Yüzey kaplama malzemeler

4.5.1. Reçineler

Rüzgar türbini kanadı üretiminde kullanılan reçineler Cam elyafı takviyeli plastik (FRP) uygulamalarının başarılı olabilmesi için en önemli parametrelerden birisidir. Reçineleri oluşturan ana madde organik hidrokarbondur. Reçineler temel olarak iki grupta incelenir.

1. Termoset reçineler
2. Termoplastik reçineler

4.5.1.1. Termoset Reçineler

Termoset reçineler çok önemli proses karakteristiklerine sahiptirler. Termoset reçineler genellikle sıvı haldedirler, Son ürüne yönelik kullanım işleminde termoset reçineler bir sertleştirici ile ekzotermik reaksiyona girerek katı hale geçerler. Reaksiyon tamamlandıktan sonra bir daha eski hallerine dönmeleri mümkün değildir. En çok kullanılan termoset reçineler şunlardır.

1. Epoksi
2. Vinilester
3. Doymamış poliester
4. Fenolikler

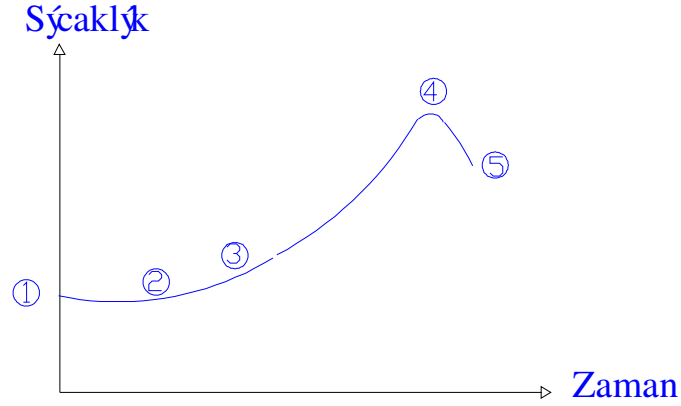
Rüzgar türbin kanatlarını üretiminde düşük hacimsel çekme özellikleri ve sağladıkları yüksek mekanik mukavemet değerleri nedeniyle epoksi reçineler kullanılmaktadır bu çalışmada da tasarlanan kanadı üretmek için epoksi reçine kullanılmıştır.

4.5.1.2. Epoksi Reçineler

Epoksi reçineler öncelikle üstün mekanik özellikleri, korozif sıvılara ve ortamlara dayanımı, üstün elektriksel özellikleri ve yüksek ısı derecelerine dayanım veya bu değerlerin bir kombinasyonu olarak yüksek performanslı polimer kompozit üretimi amacıyla kullanılmaktadır.

Epoksi reçinelerin hacimsel çekme, eğilme, gerilme gibi özellikleri diğer termoset reçinelerden daha iyi olduğu için kanat üretiminde tercih edilmektedirler

Epoksi reçinenin bir amin veya bir anhidrit sertleştirici arasında gerçekleşen ekzotermik kimyasal reaksiyonun sıcaklık değişimi (Şekil 4.9) da gösterilmiştir.(Plastic Magazine , 2001)



Şekil 4.9. Ekzotermik Kimyasal Reaksiyonun Sıcaklık Değişimi

1. Epoksi reçine ve Sertleştirici karışarak ekzotermik reaksiyon başlar
2. Reçine ve sertleştirici karışımının sıcaklığı yükselmeye başlar ve jelleşme başlamıştır
3. Reçine serleştirici karışımının sıcaklığı hızla artmaktadır ve karışım jel halden katı hale geçmeye başlamıştır.
4. Maksimum reaksiyon sıcaklığına ulaşmıştır
5. Reaksiyon sona ermiştir.

4.5.2. Takviye Malzemeleri

Polimer kompozit malzeme teknolojisinde birçok malzeme takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bazı takviye malzemeleri (Çizelge 4.4.) te verilmiştir

2. Cam elyafı
3. Karbon elyafı
4. Aramid elyafı
5. Bor elyafı

Çizelge 4.4. Bazı takviye Malzemeleri
(Reinforced Plastic Magazine)

Takviye Türleri	Gerilme Dayanımı (Mpa)	Gerilme Modülü (Gpa)	Özgül Ağırlık (gr/cm ²)
Cam elyafı	3000-5000	72-82	2,48- 2,60
Karbon elyafı	2500-3000	200-700	1,75-1,96
Aramid elyafı	2750-3000	82-124	1,44
Bor elyafı	3500	400	2,55

Rüzgar türbini kanat imalatında yaygın olarak cam elyafı kullanılmaktadır bu çalışmada da cam elyafından yararlanılmıştır.

Rüzgar türbin kanatları üretiminde en çok E camından üretilmiş cam elyafı ile dokunmuş çok yönlü kumaşlar kullanılır. Polimer kompozitlerin kullanılmaya başladığı ilk dönemlerde, sadece tekstil kumaşlarından oluşan takviye malzemeleri bulunmaktaydı, Cam elyafı takviye malzemesi olarak kullanılmaya başladığından polimer ile takviye malzemesi arasında kimyasal bir bağ oluşturma gereği duyulmuş ve bu amaçla elyaf üretim işleminde elyaf yüzeyinde kullanılan reçineye uygun bağlayıcılar kullanılmaya başlamıştır. Daha sonra bir adım ileriye gidilerek, özellikle ıslak ortamlarda polimerlerin elyafa yapışmasını sağlamak amacıyla bağlayıcı içine krom kompleksleri ve orgono silikon gibi kimyasal bağlayıcılar kullanılmaya başlandı. Tüm gelişmelerin sonucu olarak reçine ile elyaf takviyesi arasında mükemmel bir matriks yapı oluşturarak kompozit malzemelerin günümüzde sağladığı mekanik ve fiziksel değerlere ulaşabilmektedir .

4.6. Polimer Kompozit Malzemelerin Rüzgar Türbin Kanatlarında Kullanım Nedenleri

4.6.1. Yüksek Mukavemet ve Boyutsal Stabilite

Polimer kompozit malzemeler yüksek mukavemet değerleri sağlayan malzemeler arasında en etkin olanlardan birisidir. Çekme, eğilme, darbe ve basınç dayanımı gibi mekanik değerlerin sağlanmasına yönelik tasarlanabilmektedir. Çeşitli mekanik, çevresel baskılar altında termoset kompozit ürünler şekillerini ve işlevselliklerini korumaktadırlar. Polimer kompozitler takviyesiz termoplastiklerin viskoelastik ve büzüşme özelliklerini göstermezler. Isıl genleşme katsayıları daha düşüktür.

Rüzgar türbin kanatlarının dinamik yükler altında oldukları düşünüldüğünde söz konusu yükler altında gösterebilecekleri mukavemet değerlerini ve formlarını korumaları oldukça önemlidir. Çünkü rüzgar türbinlerinin rüzgar türbinlerinin verimini etkileyen en önemli parametrelerden birisi kullanılan kanadın aerodinamik yapısıdır ve üretim aşamasında kanada kazandırılan bu aerodinamik yapısının bozulması halinde rüzgar türbin sistemlerinden istenilen verimin alınması mümkün değildir.

4.6.2. Hafiflik

Polimer kompozit malzemeler birim alan ağırlığında hem takviyesiz plastikler, hem de metallere göre daha yüksek mukavemet değerleri sunmaktadırlar. Malzeme üzerinde yorgunluk verici yükler metallere karşılaştırıldığında hafif oluşları sebebiyle polimer kompozitlerle daha az etkindir. Ayrıca rüzgar türbin sistemleri üzerinde dinamik yükler etkin olduğu için sistemin kule ve rüzgar türbin kanatlarının bağlantı noktalarına fazla yük binmesini önlemek ve olası titreşimleri azaltabilmek için kanatlardaki hafiflik önemli bir tasarım parametresidir.

4.6.3. Korozyon Dayanımı

Polimer kompozit malzemeler paslanmaz ve aşınmazlar. Çeşitli kimyasal ve ısı ortamlara dayanım sağlamak amacıyla geliştirilmiş birçok reçine sistemi mevcuttur. Uygun tasarlandığında polimer kompozit ürünlerin en az bakımla uzun süreli hizmet ömrüne sahip olmaları sağlanabilir. Rüzgar türbinlerinde doğal koşullar altında işletildiği dikkate alındığında korozyon dayanımı da rüzgar türbin tasarımı sırasında dikkat edilen bir başka kritik noktadır.

4.6.4. Tek Parça Üretim İmkamı

Polimer kompozit ürünlerin kullanılması ile çelik türündeki geleneksel malzemelerde karşılaşılan birçok parçanın birleştirilmesi ve sonradan monte edilmesi işlemini tek parçada kalıplama olanağı ile ortadan kaldırılmıştır. Böylece üretim mali

Karbon elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin kopma mukavemeti ise, 550 N/nm^2 ile çelikten daha iyidir. Cam elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin ana sorunu, elastisite modülünün 15 kN/nm^2 ile çeliğe nazaran (210 kN/nm^2) çok düşük olmasıdır. Bu nedenle, çok uzun kanatlarda cam elyafı yerine, elastisite modülü 44 kN/nm^2 olan karbon elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzeme kullanılır. Fakat bu malzemede pahalıdır.

4.7. Rüzgar Türbin Kanatlarının Üretiminde Kullanılan Kalıplama yöntemleri

Rüzgar türbin kanatlarının istenilen forma, performans ve mukavemet değerlerine ulaşabilmesi için üç temel parametre önemli rol oynamaktadır. Bunlar;

Kompozit üretiminde seçilen malzemeler

Rüzgar türbin kanatlarının aerodinamik tasarımı

Üretim sırasında kullanılan kalıplama yöntemi

Rüzgar türbin kanat üretiminde kullanılan 2 adet kalıplama yöntemi kullanılmaktadır.

Bunlar;

1. El yatırması yöntemi
2. Vakum Torba (İnfüzyon) yöntemi

4.7.1. El Yatırması Yöntemi

Bu yöntem en yaygın olarak kullanılan yöntemlerin başında gelir, Söz konusu yöntemin uygulanmasında alüminyum veya epoksi kalıplar kullanılmaktadır, bu çalışmada alçıdan hazırlanan bir kalıp kullanılmıştır.(Şeki 4.10) El yatırması yönteminin kolay işlenebilirlik, pres kolaylığı ve düşük maliyet gibi bir çok avantajı vardır.

Üretimin başlangıç aşamasında ayıcı olarak kullanılan jelkot kalıbın üzerine bir rulo vasıtasıyla tatbik edilir daha sonra reçine yine rulo vasıtası ile kalıba uygulanır. Takviye malzemesi üzerine tatbik edilen reçine sertleşene kadar rulolama işlemine tabi tutulur. Rulolama sayesinde laminant

tabakaları arasında kalan hava kabarcıkları giderilir. Bu rulolama işlemi, aralıklı olarak her kat takviye malzemesi uygulamasından sonra tekrarlanır.

El yatırması yöntemi ile rüzgar türbin kanatlarının alt ve üst kabuk gibi büyük parçaları ile omurga ön kep, arka kep, balans kutusu gibi parçaları da üretilmektedir.

4.7.1.1. El Yatırması Yönteminin Avantajları

1. Düşük üretim maliyeti
2. Üretilen parça boyutlarının teorik olarak kısıtlı olmaması
3. Tasarımda gerekli değişikliklerin kolaylıkla yapılabilmesi
4. Düşük yatırım maliyeti
5. Yerinde kalıplama kolaylığı
6. Maksimum tasarım esnekliği belirli bölgelerin daha dayanıklı yapılabilme olanağı
7. İstihdam yaratma

4.7.1.2. El Yatırması Yönteminin Dezavantajları

1. Reçine uygulamasının homojen olamaması
2. Reçine içindeki kimyasalların uçuculuğu

4.7.2. Vakum Torba (İnfüzyon) Yöntemi

Uzay, uçak ve rüzgar türbin kanatları gibi yüksek düzeyde teknoloji gerektiren kompozit ürünlerin üretilmesinde kullanılan bir yöntemdir.

Yöntemin uygulanmasında genel olarak epoksi kalıplar tercih edilmektedir. Söz konusu yöntemin uygulanması sırasında takviye malzemesi olarak kullanılan cam kumaşı ve ara malzemeler (balsa, PVC köpük) reçine ile ıslatılmaksızın kuru bir şekilde epoksi kalıp üzerine yerleştirilir. Daha sonra kalıp plastik bir folyo veya film ile kaplanıp vakum işlemine tabi tutulur ve sıvı reçine ortam ile kalıp içindeki basınç farkından yararlanarak kalıp dışından kalıp içerisine transfer edilir.. Böylece cam kumaşının ve ara malzemelerin homojen bir şekilde reçine tarafından ıslatılması sağlanır. Reçine transferi tamamlanıncaya kadar kalıp vakum altında tutulmaya devam edilir. (Plastic magazine, August 2001, Vol 19)

4.7.2.1. Vakum Torba (İnfüzyon) Yönteminin Avantajlar

1. Vakum torba yöntemi ile reçine takviye malzemesinin içine el yatırması yöntemine göre daha homojen olarak yayılır
2. İşçilik maliyeti daha düşüktür.

4.8 Kanat Üretim Prosesi

Reçineyi ve Cam yünü uygulamadan önce kalıp tamamıyla temizlenmeli ve kalıbın tabanında ayırma malzemesi olarak gres yağı kullanılmalıdır. Bu aşamadan sonra 3-4 mm lik bir reçine tabakası kalıbın tabanına bir fırça vasıtası ile tatbik edilmelidir. Bu tabakanın üzerine yine 3- 4 mm lik bir Cam yünü yatırılarak bir rulo fırça yardımı ile kalması olası hava boşluklarının bertaraf edilmeleri sağlanmalı ve kalıp ölçülerine ulaşana kadar bu işleme devam edilmelidir. Daha sonra kalıp beklemeye bırakılmalı yaklaşık olarak 12 saat sonra kanat kalıptan ayrılmalıdır. Kanat malzemesi daha sonra boya ile boyanmalıdır bunun nedeni kanadın içerisine su girmesini önlemek ve sistemde balans sorunu oluşmasını engellemektir.



Şekil 4.10. Üretilen Kalıp



Şekil 4.11. Malzemenin Kalıba Dökülmesi



Şekil 4.12. Üretilen Kanat



Şekil 4.13. Üretilen Kanat



Şekil 4.14. Üretilen Kanat

4.9. Üretilen Kanadın Mukavemet Testi

Kompozit malzemeden üretilen kanadın mukavemet değerlerini belirlemek Brinell sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır Şekil (4.18.ve 4.19.) , cihaz 750 kgf lik bir basıya sahip ve cihazın üzerinde 5 mm lik bilye takılıdır.

Kanattan alınan numune Şekil(4.16 ve 4.17) serlik ölçme cihazına bağlanmış, 750 kgf yük numune parçaya uygulanmıştır ve bunun sonucunda numune üzerinde 4. 28 mm lik bir iz meydana gelmiştir.



Şekil 4.15.Deney Numunesi Alınmış Kanat



Şekil 4.16. Numune



Şekil 4.17. Numune



Şekil 4.18. Sertlik Ölçme Cihazı



Şekil 4.19. Sertlik Ölçme Cihazı

P= Numuneye uygulanan yük (kgf)

D= Bilye çapı (mm)

d= İz çapı (mm)

ÇD= Çekme dayanımı

$$BSD = 2 * P / \pi * D * (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad (4.32)$$

P=750 kgf

D=5 mm

d = 4.28 mm

Buna göre malzemenin BSD= 39.47 HB olarak hesaplanır.

4.10.Sertlik ile Çekme Dayanımı Arasındaki İlişki

$$\text{ÇD} = 3,45 * \text{HB} \quad (4.33)$$

$$\text{ÇD} = 3,45 * 39,47$$

ÇD= 136, 20 MPa olarak bulunur,

$$\text{ÇD} = 136, 20 \text{ Nt/mm}^2$$

Kanada etkileyen temel kuvvet kaldırma kuvveti olduğu için bu kuvvet

$$L = C_L * 1/2 * \rho_A * A * V^2$$

Rüzgar hızı 10 m/sn olarak alındığında kanada etkileyen kuvvet

$$L = 0,6 * 0,5 * 1,25 * 3,14 * 1^2 * 10^2$$

$$L = 117 \text{ Nt olarak bulunur,}$$

Rüzgar hızı 12 m /sn olduğunda kanada gelen kuvvet

$$L = 169 \text{ Nt dur ve sınır değeri aşmaktadır.}$$

Bu bağıntılardan anlaşıldığı üzere üretilen kanat malzemesi limit değerler içerisindedir,

Aşağıda çeşitli malzemelerin Çekme Gerilmesi değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.5: Çeşitli Malzemelerin Çekme Gerilmeleri
(SolidWorks Metarial Library)

Malzeme	Çekme Gerilmesi
1023 Çelik Saç	425 Nt/mm ²
AISI 1010 Çelik	325 Nt/mm ²
AISI 1015 Çelik	385 Nt/mm ²
Esmer Dökme Demir	151 Nt/mm ²
Aleminyum 1060	68.9 Nt/mm ²
Aleminyum 110	130 Nt/mm ²
PVC	40.7 Nt/mm ²

5.SONUÇ

Günümüzde fosil yakıtlar dünya enerji gereksiniminin çok büyük bir kısmını karşılamakta ve bununla beraber çeşitli çevresel tahribatlara neden olmaktadır. Başta iklim değışiklikleri ile kendini gösteren bu etkilerin insanoğlu için daha ciddi tehlikeleri beraberinde getireceği açık bir gerçekliktir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise en önemli alternatif olarak görünmektedir ve son on yıl içerisinde dünya üzerinde sayıları giderek artmakta, teknolojik altyapıları geliştirilerek önemli maliyet avantajları sağlanmaktadır.

Bu çalışma sonucunda amaçlanan, ölçeği küçük olsa da modern rüzgar türbinlerinin üzerinde bulundurduğu ekipmanlarının tümünü bu küçük türbinde de kullanmak ve gelecekte ülkemiz için daha da önem kazanacak olan rüzgar enerjisinden daha fazla miktarda enerji elde etmektir. Aslında teknolojisi çokta karmaşık olmayan bu sektörde dışarıya bağımlı olmadan ülke kaynakları ile üretim yapma imkanlarının var olduğu ve ülkemiz için ayrıca büyük bir istihdam aracı olabileceği üzerinde durulmuştur.

Bu amaçla türbin kanatları atölye şartlarında kendi imkanlarımızla yapılan bir kalıp vasıtası ile Reçine ve Cam elyaf kullanılarak kompozit bir malzeme üretilmiştir, bu işlem üç kez tekrarlanarak üç adet özdeş türbin kanadı üretilmiştir. Kutes Döküm Sanayi bünyesinde bulunan sertlik ölçme cihazı kullanılarak malzemenin sertlik değeri belirlenmiş ve Elde edilen sertlik değeri üretilen malzemenin Çekme Gerilmesi hesaplanmıştır, elde edilen çekme gerilmesi diğer malzemeler ile malzemelerle karşılaştırılmıştır. ayrıca türbine ait diğer türbin mili, hub, rulman gövdesi gibi parçaların imalatı yapılmış ve hazır olarak tedarik edilen redüktör ile jeneratör ile montajı yapıp türbin çalışır hale getirilmiştir.

Elektrik alt yapısı oluşturularak üretilen enerji istenildiği takdirde depolanabilecektir fakat bu çalışma olayın bu kısmını hedeflememiştir.

KAYNAKLAR

1. Akyüz, Akmakinsan, Ankara, Türkiye
2. Clean energy foundation Broşür, 2001
3. Danish Wind Industry Association, www.windpower.org
- 4 . EWEA (Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği), www.ewea.org
- 5.E.İ.E.İ.Rüzgar Enerjisi Elektrik İşleri Etüt İdaresi Yayını, Türbin sistemlerinin kontrolü ,1992, Ankara, Türkiye,
6. Fujisawa N. Shirai H ,1987, Experimental Investigation on the Unsteady Flow Field Around a Sovania Rotor at the Maximum Power Performance ,Wind Engineering , Vol.11(4) Tokyo
7. John Wiley,1997,Wind Energy Technology
- 8.KIZILTUĞ, Wind Energy , The Graduation Thesis at the Technical University of İstanbul İstanbul / Türkiye
9. M.Arıkan,C ,1984 ,Rüzgar Enerjisi Elektrik İşleri Etüt İdaresi Yayını, Ankara, Türkiye
10. Reinforced Plastic Magazine ,August 2001, January 2004, April 2005
- 11.,Spinger Verlag, 1996, Windkraftanlagen ,Berlin
12. Şen , 2000 , Rüzgar Türbininin Tarihi gelişme süreci, III. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri kitabı, cilt: I,s:375,15-17 Kasım, İTÜ, İstanbul
13. Teodora Sanchez Campos , Sunith Fernando,Wind Rotor Blade Construction
14. Uyar, ,1985, Rüzgar Enerjisi Sistemleri, TÜBİTAK bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü, Makine ve Enerji Sistemleri Araştırma Bölümü Gebze/Kocaeli
15. Yerebakan, 2001, İstanbul Ticaret Odası Yayınları
16. WIND ENERGY WEEKLY, 2001, Vol.19,929,19 January. Anonim
- S. Marthai ve D. Merriam ,Wind Driven Power-Generating System: preliminary modeling and analysis of power curves
17. WIND ENERGY WEEKLY ,2001, Vol .19, 928, published by the American Wind Energy Anonim

ÖZGEÇMİŞ

1976 Yılında Çameli' de doğdu. İlk ve Orta Öğrenimini Lüleburgaz'da tamamladı. 1994 yılında Lüleburgaz Teknik Lisesi Makine Bölümünden Mezun oldu. 1997 yılında Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne girdi ve 2001 yılında mezun oldu. Çorluda bir tekstil firmasında bakım onarım sorumlusu olarak çalıştı ve 2006 yılında Çorlu Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans Eğitimine başladı.