

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**OTONOM RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE
SİSTEM KARAKTERİSTİKLERİNİN
BELİRLENMESİ VE OPTİMİZASYONU**

Ali Murat ATEŞ

Tez Danışmanı: Yard. Doç. Dr. Numan Sabit ÇETİN

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 625.05.01

Sunuş Tarihi: 26.01.2012

Bornova – İZMİR

2012

AliMurat ATEŞ tarafından DOKTORA TEZİ olarak sunulan “Otonom Rüzgâr Türbinlerinde Sistem Karakterlerinin Belirlenmesi ve Optimizasyonu” adlı bu çalışma, E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesinin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 26.01.2012 tarihinde yapılan tez savunmasında aday oy birliği / oy çokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

İmza

Jüri Başkanı :Yard. Doç. Dr. Numan S. ÇETİN

Raportör Üye :Yard. Doç. Dr. M. Necdet YILDIZ

Üye :Prof. Dr. Haldun KARACA

Üye :Doç. Dr. Mümin KÜÇÜK

Üye :Yard. Doç. Dr. Erginer UNGAN

ÖZET**OTONOM RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE SİSTEM
KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE
OPTİMİZASYONU**

ATEŞ, Ali Murat

Doktora Tezi, Güneş Enerjisi Enstitüsü

Tez Danışmanı: Yard. Doç. Dr. Numan Sabit ÇETİN

Ocak 2012, 124 sayfa

Bu tez çalışmasında otonom bir rüzgâr türbin sistemi simüle edilmiş ve türbinin bulunduğu ortamdaki meteorolojik veriler ve türbinin karakteristik verileri birer saniyelik aralıklarla ölçülmüştür. Bu ölçümlerden yola çıkarak, simülasyon değerleri ile ölçülen gerçek değerler grafik ortamda hazırlanan yazılımla, eşzamanlı olarak karşılaştırılmıştır. Türbin simülasyonu için önce Matlab programı kullanılmıştır. Tezde ölçülen veri sayısının çok olması, ölçülen verilerin simülasyon sonuçları ile aynı grafik üzerinde izlenmek istenmesi ve sonuçların internet üzerinden anlık olarak izlenmek istenmesi sebepleriyle Matlab programının yavaş kaldığı görülmüş ve Delphi programlama dili ile “Turbine Analyser” adında yeni bir program yazılmıştır. Matlab ile yapılan simülasyon sonuçları ile “Turbine Analyser” programında yapılan simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve aynı sonuçlar gözlemlenerek yazılan programın testi de yapılmıştır.

Tez çalışması sonunda, türbin testi yapabilen özgün bir sistem oluşturulmuştur. Bu sistem sayesinde küçük güçlü (20kW ve altı) otonom rüzgâr türbinlerinin karakteristik testleri yapılabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbin karakteristikleri, ölçüm sistemi, rüzgâr türbini simülasyonu

ABSTRACT**IDENTIFYING AND OPTIMIZATION OF SYSTEM
CHARACTERISTICS FOR AUTONOMOUS WIND TURBINES**

ATEŞ, Ali Murat

Phd in SolarEnergyIntitute

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Numan Sabit ÇETİN

January 2012, 124 pages

In this thesis, an autonomous wind turbine system has been simulated and meteorological data and the characteristics of turbine have been measured in 1 second periods at the place of turbine. By depending on these measurement values, simulation values and measured real values have been compared synchronously by a software program which has been prepared in a graphicmedia. For turbine simulation, Matlab program had been used initially. However, it is observed that Matlab program is being too slow because of excessive data calculations in the thesis and it is inefficient to observemeasured data simulation results at the same graph and to observe the results from the internetmomentarily. For these reasons, a new program called ‘Turbine Analyser’ has been prepared by using Delphi programming language. Simulation results which are taken from Matlab and “Turbine Analyser” have been compared and by observing the same results, the newly written program has been tested. In this thesis, an original system which canmanage turbine test has been created.

Thanks to this system, characteristics tests of small-scale (20kW and below) autonomous wind turbines have been achieved.

Keywords: Wind Energy, windturbinecharacteristics, measurementsystem, windturbinesimulation

TEŞEKKÜR

Doktoraalışmalarım sırasında, sürekli desteğini hissettiğim eşime ve aileme, maddi desteklerinden dolayı TÜBİTAK ve Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Sağladıkları imkânlar ve bana verdikleri destekler dolayısıyla Güneş Enerjisi Enstitüsü personeline de ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bana geniş bir ufuk açan, sabırla ve gayretle beni yetiştiren Sayın Hocam Numan S. ÇETİN'e ne kadar teşekkür etsem azdır.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Rüzgâr Türbinleri.....	4
1.1.1 Düşey eksenli rüzgâr türbinleri	4
1.1.2 Yatay eksenli rüzgâr türbinleri	7
1.2 Rüzgâr Enerjisi ve Türbinlere Uygulanması	10
1.2.1 Rüzgâr enerjisi	11
1.2.2 Rüzgâr enerjisinin potansiyeli	11
1.2.3 Rüzgârdan elde edilebilecek güç	15
1.2.4 Güç faktörü (c_p)	19
1.2.5 Uç hız oranı (λ)	21
1.2.6 Güç faktörü – uç hız oranı ilişkisi	22
1.2.7 Aerodinamik kayıplar.....	24
1.2.8 Rüzgâr hızının yükseklikle değişimi.....	27
1.3 Tezin Amacı	29
2 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	30
2.1 Rüzgâr Türbini Modelleme ve İnceleme Çalışmaları.....	32
2.2 Rüzgâr Türbini ve Rüzgâr Çiftliği Tasarımı Çalışmaları	34
2.2.1 Kanat tasarımı çalışmaları.....	34
2.2.2 Generatör tasarımı çalışmaları.....	37
2.2.3 Kontrol sistemi tasarımı çalışmaları.....	38
2.2.4 Rüzgâr çiftliği tasarımı çalışmaları	39
2.2.5 Türbin imalat çalışmaları.....	41
2.3 Rüzgâr Türbini Ölçüm Sistemi Tasarımı Çalışmaları.....	42

İÇİNDEKİLER (devam)

3 GEREÇ VE YÖNTEM.....	46
3.1 Simülasyon Çalışması.....	50
3.1.1 Güç faktörünün uç hız oranına göre değişimi.....	52
3.2 Veri Aktarma Modüllerinin Tasarımı ve Uygulanması	54
3.2.1 Meteorolojik verileri okuma modülü	54
3.2.2 Türbin verilerini okuma modülü	58
3.2.3 RF verileri okuma modülü	61
3.2.4 Kontrol odasındaki verileri okuma modülü	62
3.3 Veri Tabanı Tasarımı ve “Veri Okuyucu” Programının Yazılması.....	64
3.4 Veri Analiz Programı	67
4 BULGULAR.....	69
4.1 Simülasyon Sonuçları.....	69
4.2 Deneysel Bulgular.....	73
5 OPTİMİZASON.....	80
5.1 Test Edilen Rüzgar Türbininin Optimizasyonu.....	80
6 SONUÇ VE ÖNERİLER.....	85
KAYNAKLAR DİZİNİ	87
ÖZGEÇMİŞ.....	97
EKLER.....	
EK 1 Matlab Simülasyon Kodları.....	
EK 2 “Türbin Simülatörü” Program Kodları.....	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Dünyadaki Toplam Kurulu Rüzgâr Gücünün Yıllara Göre Değişimi	1
1.2 Darrious Tipi Rüzgâr Türbini	5
1.3 H-Darrious (Giromill) Tipi Rüzgâr Türbini	6
1.4 Savonious Tipi Rüzgâr Türbini	6
1.5 Rüzgârı Alış Yönüne Göre Türbinler	7
1.6 Rüzgârı Arkadan Alan (Down-Wind) Rüzgâr Türbini	8
1.7 Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini	9
1.8 Rüzgâr Türbini İç Yapısı (Limitsiz Enerji, 2010)	10
1.9 Dünya Rüzgâr Enerjisi Teknik Potansiyel Dağılımı Grafiği.....	12
1.10 Silindir Şeklindeki Hava Kütlesi	14
1.11 Rotor Çarpan Havanın Davranışı (Ragheb & Ragheb, 2011)	16
1.12 Güç Katsayı (C_p) – Uç Hız Oranı (λ) Grafiği	23
1.13 Türbin Çeşitlerine Göre C_p - λ Eğrileri (Justus, 1978).....	23
1.14 Rüzgâr Türbinin Kanadına Etki Eden Kuvvetler.....	25
1.15 $C_{p,Schmitz} - \lambda_A$ Grafiği	27
2.1 Küçük Güçlü Otonom Rüzgâr Türbini Blok Yapısı	31
3.1 Tasarlanan Ölçüm Sistemindeki Sensörlerin Yerleri.....	46
3.2 Rüzgâr Hızına Bağlı Çalışma Parametreleri	51
3.3 C_p 'nin, Uç Hız Oranı Ve Kanat (Pitch) Açısıyla Değişimi	52
3.4 Meteorolojik Verileri Aktaran Devrenin Blok Şeması	55
3.5 Meteorolojik Sensörleri Bağlamak İçin Tasarlanan Platform.....	57
3.6 Meteorolojik Verileri Okuyan Platform.....	57
3.7 Türbin İçinden Verileri Aktaran Modülün Blok Şeması.....	58
3.8 Türbin İçinden Verileri Aktaran Modülün Resmi	58
3.9 Generatör Verimini Ölçme Düzeneği	59
3.10 Tork Sensörü Bağlantısı.....	60
3.11 Generatör Verim Ölçümü İçin Tasarlanan modül	61
3.12 “Tork Okuyucu” Programı	61
3.13 RF Alıcı Devre Blok Diyagramı.....	62
3.14 RF Alıcı Devre.....	62

3.15 Kontrol Odasında Kullanılan Devrenin Blok Şeması	63
3.16 Kontrol Odasına Kurulan Veri Okuma Modülü	64
3.17 "Veri Okuyucu" İsimli Programın Ekran Görüntüsü	65
3.18 "gelenstr" Tablosunun Yapısı	66
3.19 "gelenstr2" Tablosunun Yapısı	66
3.20 "gelenstr" İsimli Tablodan Okunan Örnek Veriler	66
3.21 Veri Tabanında Kayıtlı Verilerin Son Hali.....	67
3.22 “Turbine Analyser” Programı Menüleri.....	67
4.1 Rüzgâr Gücü ve Türbin Çıkış Gücü Grafikleri.....	69
4.2 Rüzgâr Hızına Bağlı λ ve C_p Grafikleri	70
4.3 $C_p - \lambda$ Grafiği	70
4.4 "Türbin Simülatörü" Programının Giriş Ekranı	71
4.5 “Türbin Simülatörü” Programı Ekran Görüntüleri	71
4.6 “Türbin Simülatörü” İle Yapılan Rüzgâr Gücü Ve Türbin Çıkış Gücü Grafikleri	72
4.7 Rüzgâr Gücü Ve Türbin Çıkış Gücünün Çakıştırılarak Görüntülenmesi.....	72
4.8 Rüzgâr Hızına Bağlı C_p Grafikleri	73
4.9 Rüzgâr Hızına Bağlı λ Grafikleri	73
4.10 $C_p - \lambda$ Grafikleri	73
4.11 Simülasyon Parametreleri Giriş Ekranı	74
4.12 Rüzgar Hızına Bağlı Tork Grafiği.....	75
4.13 Rüzgâr Hızına Bağlı Rüzgâr Gücü Ve Türbin Çıkış Gücü Grafiği	76
4.14 Rüzgar Hızına Bağlı Türbin Çıkış Gücü Grafiği	76
4.15 Çıkış Gücüne Bağlı Generatör Verimi	77
4.16 Rüzgâr Hızına Bağlı Türbin Güç Faktörü Grafiği	77
4.17 Rüzgâr Gücü Grafiği	78
4.18 C_p / λ Grafiği.....	79
4.19 Çıkış Gücüne Bağlı İnverter Verimi	79
5.1 C_p/λ ve Rüzgar Hızına Bağlı C_p	80
5.2 Rüzgar Hızına Bağlı Generatör Verimi.....	81
5.3 Türbinin Devir Sayısı Kayıtları	82
5.4 Rüzgar Hızı Ve Generatör Çıkış Akımı	82
5.5 Grafik Detayları	83
5.6 Rüzgar Hızına Bağlı Generatör Çıkış Gücü ve Sistem Çıkış Gücü.....	83

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Rüzgâr Enerjisi Kurulu Gücü En Yüksek 10 Ülke (GWEC, 2011).....	2
1.2 Rüzgâr Enerjisi Teknik Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı	12
1.3 C_p , Schmitz – λ_A Değerleri	27
1.4 Yüzeyle Göre Pürüzlülük Katsayıları	28

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
m	Kütle (kg)
r	Kanat uzunluğu (Rotor yarıçapı) (m)
R	Rotor çapı (m)
P	Güç (Watt)
ρ	Hava yoğunluğu (kg/m^3)
A	Kanat süpürme alanı (m^2)
V	Rüzgar hızı (m/s)
F	Kuvvet (Nt)
a	İvme (m/s^2)
E	Enerji (Joule)
b	Enterferans faktörü
C_p	Güç faktörü (Güç katsayısı)
λ	Uç hız oranı
ω	Açısal hız (rad/s)
f	Frekans (Hz)
η_{profil}	Kanat profil verimi

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
λ_A	Kanat dizayndevirlilik sayısı (d/dk)
ε	Kayma sayısı
n	Devir sayısı (d/dk)
C_D	Sürüklenme katsayısı
C_L	Kaldırma katsayısıdır.
Z	Kanat sayısı
μ	Pürüzlülük katsayısı
T	Tork (Nm)
V_c	Başlangıç rüzgar hızı (m/s)
V_m	Rotor hızının, dizayndevirlilik sayısına ulaştığı andaki rüzgâr hızı
V_n	Nominal rüzgâr hızı
V_b	Türbinin durdurulduğu andakirüzgâr hızı
C_{pm}	Dizayn (maksimum) güç faktörü
C_{pr}	Türbinin nominal rüzgar hızındaki güç faktörü

Kısaltmalar

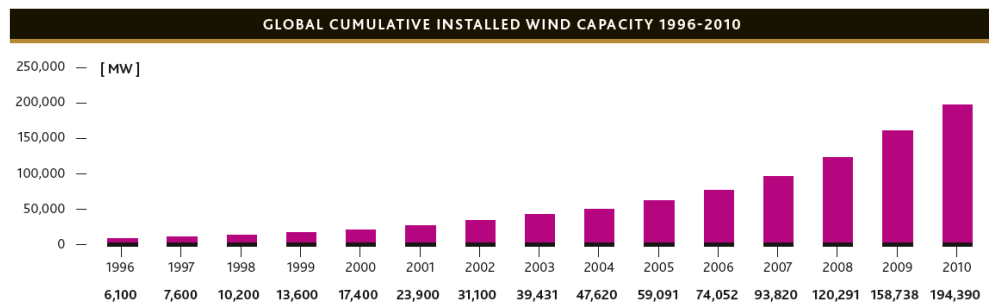
DETR	Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini
YERT	Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini

1 GİRİŞ

İnsanlığın giderek artan enerji ihtiyacını artık tükenmeye başlamış olan fosil yakıtlarla karşılamak imkânsız hale gelmiştir. Ayrıca fosil yakıtların verdiği tahribatı, dünyanın kendimekanizmaları ile temizlemesi de pekmümkün gibi görünmemektedir. Bu sebeple temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının daha fazla kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır.

Temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan güneş enerjisinin bugünkü teknoloji ile günün ancak üçte biri uzunluğunda elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi, zaten çok yüksek olan ilk kurulummaliliyetine bir de depolama elemanımaliyetinin eklenmesine neden olmaktadır. Diğer temiz enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisinde ise, yıllık rüzgâr hızı ortalamasının 5m/s'nin üzerinde olduğu yerlerde kurulummaliliyeti, rakipleri ile rekabet edebilecek düzeydedir. Rüzgâr enerjisi, özellikle ülkemiz için en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Rüzgâr türbini teknolojisindeki gelişmeler, elektrik enerjisi üretimi amaçlı rüzgâr türbinlerinin birim enerjimaliliyetinin düşmesine sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak, rüzgâr türbinlerinin elektrik enerjisi üretimindeki payı gün geçtikçe artmaktadır (Çetin, 2006).

Dünya'da rüzgâr enerjisi kullanımında yıllara göre önemli değişiklikler olmuştur (Şekil 1.1). 2010 sonu itibariyle dünya rüzgâr kurulu güç kapasitesi 194,390MW mertebelerine ulaşmıştır (GWEC, 2011).



Şekil 1.1Dünyadaki Toplam Kurulu Rüzgâr Gücünün Yıllara Göre Değişimi

Rüzgâr enerjisi kurulu gücü bakımından dünyadaki en yüksek 10 ülke Çizelge 1.1’de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde dünyadaki kurulu gücün %86’sı 10 ülkede toplanmıştır.

Çizelge 1.1 Rüzgâr Enerjisi Kurulu Gücü En Yüksek 10 Ülke (GWEC, 2011)

Ülke Adı	Kurulu Güç (MW)	%
Çin	42,287	21.8
ABD	40,180	20.7
Almanya	27,214	14.0
İspanya	20,676	10.6
Hindistan	13,065	6.7
İtalya	5,797	3.0
Fransa	5,660	2.9
İngiltere	5,204	2.7
Kanada	4,009	2.1
Danimarka	3,752	1.9
Ülkeler Toplamı	167,844	86.3
Diğer Ülkeler	26,844	13.7
Dünya Toplamı	194,390	100

Türkiye’nin rüzgâr enerjisi kurulu gücü 1600MW’ta (Aralık 2011) ulaşmış olup, toplam kurulu elektrik santrali gücünün %3’üne karşılık gelmektedir. Bu oran, Türkiye’de rüzgâr enerjisinin mevcut potansiyele göre oldukça az kullanıldığını göstermektedir.

Türkiye, rüzgâr enerjisi bakımından yararlanmaya çok elverişli bir potansiyele sahip olmasına rağmen son birkaç yıl öncesine kadar bu enerjinin etkin bir biçimde kullanımı söz konusu değildi. 2005 yılında çıkarılan Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı ile ilgili yasadan sonra Türkiye’de rüzgâr enerjisinden etkin bir biçimde faydalanma adına gözle görülür bir hareketlilik olmuş, rüzgâr enerjisi santralleri sayısında ve kurulu güçlerde önemli bir sıçrama yaşanmıştır. Bunun yanı sıra halen hazırda bekleyen lisans başvuruları da göz önüne alınırsa ileriki yıllarda da bu yükselişin süreceği şimdiden tahmin edilebilir (Çetin & Salmanoğlu, 2009). Türkiye’nin, kurulu rüzgâr gücü

2012Şubat ayı itibariyle 1478MW kapasiteye ulaşmıştır. Lisans alınmış olan toplamRüzgâr Enerjisi Çevrim Sistemi gücü de 4465MW'tır (EİE, 2012).

Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, 2000 yılından bu güne, yerli firmalara inovatif teknoloji transferleri yaparak, özellikle küçük güçlü rüzgâr türbinlerinin tümüyle yerli üretimine destek sağlamıştır. Bu bağlamda 20kW'a kadar (TÜBİTAK, Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı, Proje No: 3070210) olan otonom rüzgâr güç sistemlerinin yerli imalatını gerçekleştirmiş durumdadır. 2011 yılında revize edilen, elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretimine ilişkin yönetmeliği sayesinde küçük güçlü rüzgâr güç sistemlerinin önü tamamen açılmıştır.

Rüzgâr türbinleri ile ilgili yapılan simülasyonlarda, sistem bir bütün olarak düşünülüp, gelen rüzgârın gücüne göre çıkışta elde edilecek elektriksel güç simüle edilmektedir. Bu simülasyonlardarüzgârdan gelen enerjinin ne kadarının generatöre aktarıldığı hesaplanmakta fakat uygulamada anlık değer olarak ölçülmemektedir. Bu tez çalışmasında rüzgâr hızı, sıcaklık, basınç, nem verilerinin yanında türbinmilindeki devir sayısı ve tork da ölçülmüştür. Bu sayede türbinmekanik verimi hesaplanmıştır.Mildeki devir sayısı ve tork bilindiği için generatöre aktarılan güç de hesaplanmış, generatör çıkışları da ölçüldüğü için generatör verimi de anlık olarak hesaplanmıştır. Ayrıca türbinin farklı çıkış yükleri altında davranış analizleri de yapılmıştır.

Ayrıca, analizler yapılırken rüzgâr hızı genellikle birer saatlik ortalamalar alınarak ölçülür ve rüzgârın 1 saat boyunca hep bu hızda estiği kabul edilir. Rüzgâr enerjisi ölçüm ve kayıt cihazlarının en sık ölçüm yapanları bile birer dakikalık ortalamalar alarak verileri kaydederler. Bu çalışmadaki en önemli noktalardan birisi de rüzgârdaki anlık değişimlerin sistem üzerindeki etkilerinin belirlenmesi ve analizidir. Yapılan çalışmada türbin sistemine ait tüm veriler eş zamanlı olarak birer saniyelik periyotlarla ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Bu sayede rüzgâr hızı artarken türbin davranışı ve rüzgâr hızı düşerken türbin davranışı çok daha ayrıntılı izlenebilmektedir. Yine simülasyonlarda hava yoğunluğu hep sabit kabul edilir ($\rho=1.225 \text{ Kg/m}^3$) ve hesaplamalar buna göre yapılır. Oysa hava yoğunluğu da sıcaklık, basınç ve nem oranına göre değişen bir

değerdir ve hiçbir zaman sabit kalmaz. Bu yüzden genelde simülasyon sonuçlarının ölçülen değerlere küçük bir hata ile yaklaştığı kabul edilir. Bu çalışmada hava yoğunluğu da saniyelik periyotlarla yapılan ölçümlerden hesaplanmış ve kayıt altına alınmıştır. Bu sayede simülasyonun daha doğru sonuçlar vermesi sağlanmıştır.

Ülkemizde üretimi yapılan ya da ithal edilen küçük güçlü (20kW ve altı) rüzgâr türbinlerinin, ayrıntılı olarak, karakteristiklerini çıkaran bir laboratuvar bulunmamaktadır. Üretim yapan firmaların, kataloglarında türbin karakteristiklerine ait sınırlı bazı veriler bulunmaktadır. Bu türbinlerin gerçekte sistem verimleri ve şartlara bağlı gerçek üretimleri bilinmemektedir.

Piyasada kullanılan rüzgâr enerjisi ölçüm ve veri depolama cihazlarının (data logger) en hassas olanları dahi birer dakikalık ortalamalar şeklinde veri kaydı yapmaktadır. Tezde tasarlanan veri ölçme ve depolama sistemi ile saniyelik periyotlarlameteorolojik veriler ve türbin verileri ölçülüp depolanmaktadır. Ayrıca kaydedilen veriler düzenli olarak internet ortamına aktarılmaktadır. Bu sayede veriler istenilen her yerden izlenebilmektedir. Tezin ikincil derecede önemli bir sonucu da, tasarlanan veri ölçme ve depolama sisteminin seri üretimi yapılarakmeteorolojik verilerin daha sık aralıklarla kaydedilmesi sağlanabilir. Bu sayede çok daha hassasmeteorolojik haritalar çıkarılabilecektir.

1.1 Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri, rüzgârdaki kinetik enerjiyi öncemekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine göre "Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri" (DERT) ve "Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri" (YERT) olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar.

1.1.1 Düşey eksenli rüzgâr türbinleri

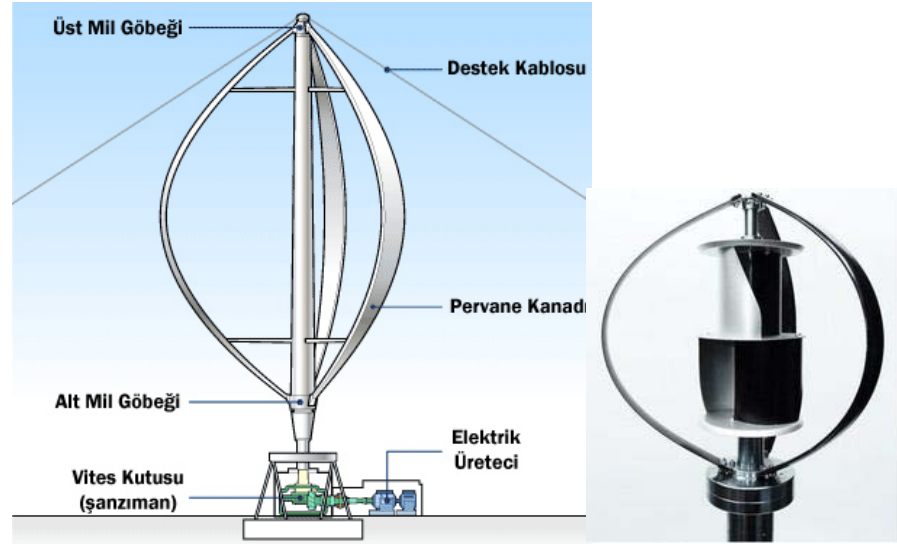
Bu tip türbinlerde kanatlar düşey eksenli birmile bağlanmışlardır. Bu tip türbinler rüzgârı her yönden kabul edebilme özelliğine sahip oldukları için düşük rüzgâr hızlarında dahi rota (yaw)mekanizmasına ihtiyaç duymadan dönmeye

başlayabilirler. Elektrik üretiminde verimleri düşük olmasına rağmen su pompalama gibi işlerde kullanılırlar. Türbinlerin üreteç ve vites kutusu toprak seviyesinde olduğu için kuleye gerek duymazlar fakat dik durabilmeleri için destek kablolarına ihtiyaçları vardır.

Uygulamada 3 çeşit dikey eksenli rüzgâr türbini vardır. Bunlar Darrious, H-Darrious ve Savonious tipi rüzgâr türbinleridir.

1.1.1.1 Darrious tipi rüzgâr türbinleri

1931 yılında Fransız mühendis G.J.M. Darrious tarafından icat edildiklerinden “Darrious Türbinler” olarak adlandırılırlar. 1970 ve 1980’li yıllarda Amerika ve Kanada’da bu tip türbinlerin kanat dizaynlarını geliştirmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Kanatların geometrik formu sebebiyle kanat verimleri yüksektir. 2 ya da 3 kanatlı olarak imal edilen türbinler yüksek hızlarda çalışabilirler (Şekil 1.2). Fakat ilk harekete geçmeleri için Savonious tipi küçük bir rüzgâr türbinine ya da tahrik motoruna ihtiyaç duyarlar.



Şekil 1.2 Darrious Tipi Rüzgâr Türbini

1.1.1.2 H-Darrious tipi rüzgâr türbinleri

En önemli dikey eksenli rüzgâr türbinlerinden birisidir. Darrious tipi türbinlerin geliştirilmesi sonucu üretilmişlerdir. Bu tip türbinler “Giromill” olarak da isimlendirilirler. Kanatlara pitch kontrol yöntemi uygulanarak ilk harekete

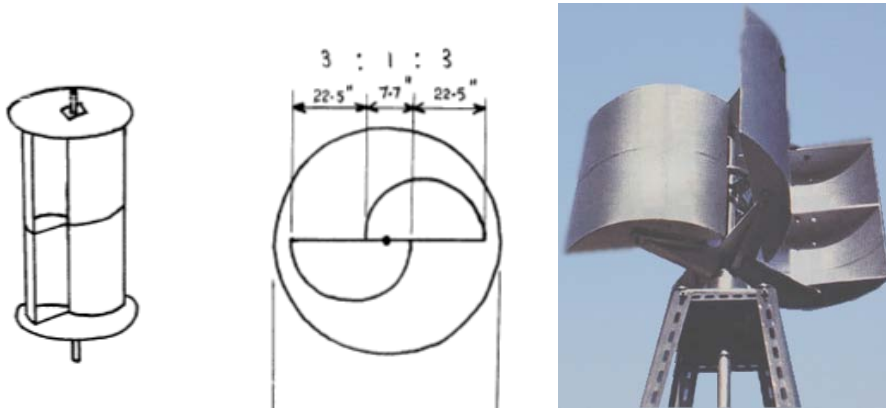
geçme esnasında ihtiyaç duyulan Savonious türbin ya da tahrikmotoru ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3H-Darrius (Giomill) Tipi Rüzgâr Türbini

1.1.1.3 Savonious rüzgâr türbinleri

Finlandiyalı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından 1925 yılında geliştirildikleri için bu tip türbinlere “Savonious Türbinler” denir. Yarım silindir şeklinde olan kanatları, birbirine paralel olarak yerleştirilmiş iki diskin arasına monte edilerek imal edilirler (Şekil 1.4).



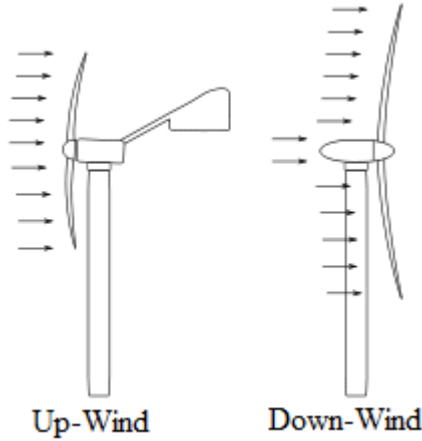
Şekil 1.4Savonious Tipi Rüzgâr Türbini

Savonius tipi rüzgâr türbinlerinin ilk harekete geçmeleri için başka herhangi bir düzeneğe ihtiyaçları yoktur. Ayrıca yapımları daha kolay ve maliyetleri daha düşüktür. Aerodinamik performansları diğer dikey eksenli

türbinlere göre daha düşük olduğu için genellikle havalandırma ve su pompalama işlerinde kullanılmaktadır.

1.1.2 Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin dönme eksenleri yere paralel, kanatları rüzgâra diktir. Aerodinamik verimleri %45 seviyelerinde olduğu için uygulamada en çok kullanılan rüzgâr türbinleridir. Küçük güçlü yatay eksenli rüzgâr türbinleri yer seviyesinden 20 – 30m kadar yükseğemonte edilerek kullanılırlar. Ayrıca monte edildikleri bölgelerde bina, ağaç vb. pürüzlülüğe sebep olabilecek nesnelerden, kanat uzunluğuna bağlı olarak, belirli bir uzaklıkta ve yükseklikte olmaları gerekmektedir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerini yükseltmek için bir kule sistemine ihtiyaç vardır.



Şekil 1.5 Rüzgârı Alış Yönüne Göre Türbinler

Rüzgârı alış yönüne göre yatay eksenli türbinler ikiye ayrılır (Şekil 1.5). Bunlar, rüzgârı arkadan alan (Down-Wind) ve rüzgârı önden alan (Up-Wind) rüzgâr türbinleridir.

1.1.2.1 Rüzgârı arkadan alan türbinler (Down-Wind, DownStream)

Bu tip türbinlerde rüzgâr rotora direk olarak gelmez. Rüzgâr türbin gövdesini (nacelle) ve kuleyi sıyrıp kanatlara ulaşır. Türbin yönünü rüzgâra doğru döndürmeye (yaw mekanizmasına) gerek yoktur. Türbin gövdesi ve rotor düzgün tasarlanırsa gövde, rüzgârı pasif olarak izler (Şekil 1.6).



Şekil 1.6Rüzgârı Arkadan Alan (Down-Wind) Rüzgâr Türbini

Türbin kanatları esnekmalzemeden imal edildikleri için ağırlıkları vemaliyetleri düşüktür. Bu da kuleye binen yük açısından bakıldığında oldukça büyük bir avantaj sağlar. Ancak kanatların dönmesi sırasında kule hizasından geçen kanattaki aerodinamik dengesizlik türbine çok zarar verir (Nurbay & Çınar, 2005).

1.1.2.2 Rüzgârı önden alan türbinler (Up-Wind, UpStream)

Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretmek amacıyla en çok kullanılan tip türbinler bunlardır. Rüzgâr direk olarak kanatlara geldiği için türbin kanatları Tok ve dayanıklı malzemelerden imal edilirler. Ayrıca kule hizasından geçen kanat ile kule arasında kalan havanın çekilmesi sonucu oluşan aerodinamik dengesizlik türbin kanatlarını zorlar. Bu zorlamadan en az şekilde etkilenmek amacıyla türbinin rotor kısmı kuleden belli birmiktar önde olmak zorundadır. Kanatların ağırlığı ve rüzgârı direk karşılamaları sebebiyle kuleye binen yük oldukça fazladır. Ayrıca rüzgâr yönünün sabit olmaması sebebiyle de türbini rüzgâr yönüne çevirebilmek için yönlendirme (yaw) mekanizmasına ihtiyaç vardır (Şekil 1.7).

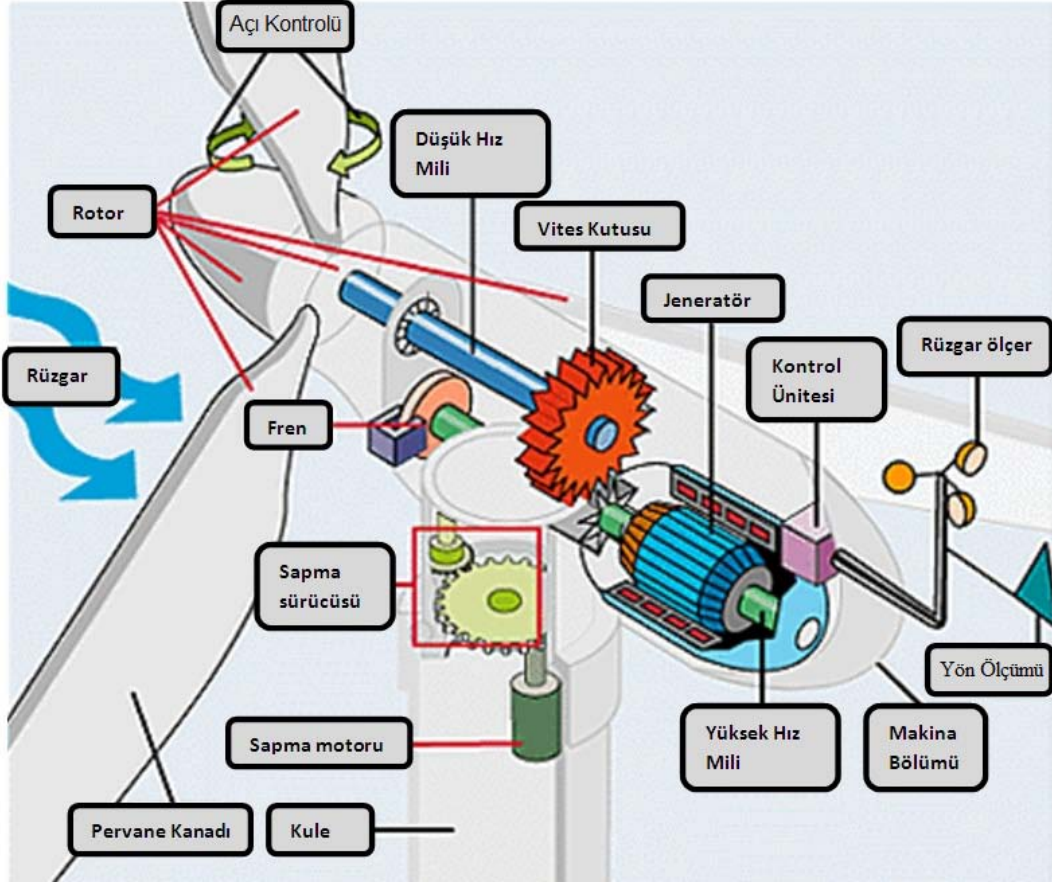


Şekil 1.7 Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri temelde;

1. Rotor (Kanatlar)
2. Şaft ve vites kutusu
3. Generatör
4. Kontrol ünitesi

olmak üzere 4 bölümde incelenebilir. Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji rotor aracılığıyla mekanik enerjiye (döndürme kuvveti) dönüştürülür. Bu kuvvet şaftı çevirir. Şaft üzerindeki vites kutusu kanatlardan gelen düşük devri yükseltip generatöre vererek elektrik üretilmesini sağlar. Kontrol ünitesi de türbin yönünü rüzgâra doğru çevirip türbin kanatlarının devir sayısını ayarlayarak çıkışta sabit bir gerilim üretilmesini sağlar. Ayrıca yüksek rüzgâr hızlarında devir sayısının artmasını engelleyerek türbinin zarar görmesini önler. Yatay eksenli bir rüzgâr türbininin içyapısı Şekil 1.8’de görülmektedir.



Şekil 1.8 Rüzgâr Türbini İç Yapısı (Limitsiz Enerji, 2010)

Rüzgâr türbinleri çok küçük güçlerde olabileceği gibi megawattlar seviyesinde güçlerde de imal edilebilirler. Günümüzde 80m kanat uzunluğuna sahip Vestas V.164 model türbin ile 7MW çıkış gücüne ulaşılmıştır. Türbin imalatı sırasında üreticileri en çok kısıtlayan faktör türbin kanadı tasarımı ve üretimidir.

1.2 Rüzgâr Enerjisi ve Türbinlere Uygulanması

Yüzyıllarca yelkenli teknelerle yol aldirmek, tarımsal ürünleri öğütmek ve su pompalamak gibi amaçlarla kullanılan rüzgâr enerjisi bugün elektrik üretmek amacıyla kullanılmaktadır. İnsanlık, yel değirmenlerinden bugüne kadar çok büyük bir teknolojik devrim süreci yaşamıştır. Yıllar önce kullanılan yel değirmenlerinde, pek çok kanat bulunmaktaydı, bugünün rüzgâr türbinlerinde ise yalnızca iki veya üç kanat bulunmaktadır (Boğaziçi Üniversitesi, 2011).

1.2.1 Rüzgâr enerjisi

Rüzgâr enerjisi, güneş radyasyonunun yer yüzeylerini farklı ısıtmasından kaynaklanır. Yer yüzeylerinin farklı ısınması, havanın sıcaklığının, neminin ve basıncının farklı olmasına, bu farklı basınç da havanın hareketine neden olur. Güneş ışınları olduğu sürece rüzgâr olacaktır. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin yaklaşık %2 kadarı rüzgâr enerjisine çevrilir. Dünya yüzeyi düzensiz bir şekilde ısınır ve soğur, bunun sonucu atmosferik basınç alanları oluşur, yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru hava akış yapar ve böylelikle rüzgâr oluşur (Elektrik İşleri Etüd İdaresi, 2011).

1.2.2 Rüzgâr enerjisinin potansiyeli

Rüzgâr enerjisinin doğadamevcut olan haline doğal potansiyel denir. Doğal potansiyelin tamamı elektrik enerjisi üretimi için kullanılamaz. Bunun bilinen teknolojik yöntemlerle elektrik enerjisine dönüştürülebilen kısmına teknik potansiyel denir. Teknik potansiyelin tamamını da kullanmakmümkün değildir. Çünkü bazı bölgelerdeki rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine çevirmek kolay ve düşükmaliyetlidir, bazı bölgelerde ise zor vemaliyeti yüksektir. Ayrıca dünyada rüzgâr olan her yere rüzgâr enerjisi çevrim sistemi kurmakmümkün değildir. Rüzgâr enerjisi teknik potansiyelinin elektrik enerjisine çevrilme sırasındakimaliyeti diğer enerjilerin üretimmaliyetlerine oranla daha düşük olan kısmına da ekonomik potansiyel adı verilir.

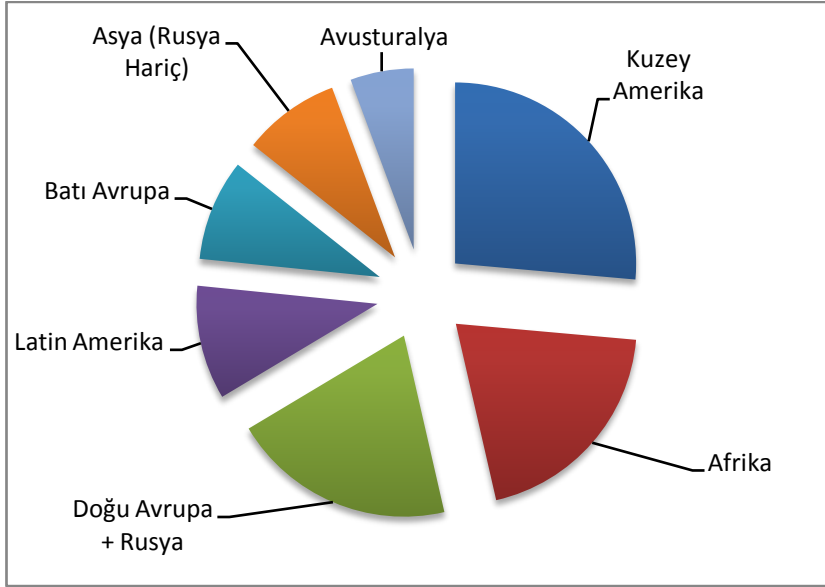
Greenpeace ve Avrupa Rüzgâr Enerji Birliği tarafından 2004 yılında yayınlanan “Wind Force 12” isimli rapora göre dünyadaki rüzgâr enerjisinin teknik potansiyeli 53000TWh/yıl olarak belirtilmiştir (Greenpeace, 2004). Bu çalışmada hesaplama; karasal alanlar (On-Shore) 1 km²’lik parsellere bölünerek yerden 10m yükseklikte ve ortalama rüzgâr hızının 5m/s’nin üzerinde olduğu bölgeler değerlendirmeye alınarak yapılmıştır. Çalışmada deniz yüzeyleri dikkate alınmamıştır. Oysa günümüzde deniz yüzeylerine de (Off-Shore) rüzgâr enerjisi çevrim santralleri kurulmakta ve oldukça iyi verimle çalışmaktadır.

Rüzgâr enerjisi teknik potansiyeli incelendiğinde dünyadaki en yüksek potansiyel 14000TWh/yıl ile Kuzey Amerika'dadır. En yüksek ikinci bölge olarak ülkemizin de içinde bulunduğu Doğu Avrupa ve Rusya bölgesi ile Afrika bölgesi 10600TWh/yıl ile karşımıza çıkmaktadır. Teknik potansiyeli en düşük bölge de 3000TWh/yıl'lık potansiyel ile Avusturalya'dır (Çizelge 1.2).

Çizelge 1.2Rüzgâr Enerjisi Teknik Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı

Bölge Adı	TWh/yıl	%
Kuzey Amerika	14000	26
Doğu Avrupa + Rusya	10600	20
Afrika	10600	20
Latin Amerika	5400	10
Batı Avrupa	4800	9
Asya (Rusya Hariç)	4600	9
Avusturalya	3000	6
Toplam	53000	100

Şekil 1.9'da dünyadaki rüzgâr enerjisi teknik potansiyelinin bölgelere göre dağılımı grafik olarak verilmiştir.



Şekil 1.9Dünya Rüzgâr Enerjisi Teknik Potansiyel Dağılımı Grafiği

(EEA, 2009) Raporunda, Avrupa Birliği ülkelerinin tamamının karasal alanlarını kapsayan, 2030 yılı tahmini, erişilebilecek rüzgâr enerjisi teknik

potansiyeli 45000TWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Avrupa Birliği ülkelerinde denizel alanların teknik potansiyeli de 30000TWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Karasal alanlarda kullanılacak türbinler için 80m hub yüksekliği, denizel alanlarda ise 120m hub yüksekliği ve kıyıdan 10 – 30 km uzaklık düşünülerek yapılan hesaplamalarda Avrupa ülkelerine ait 2000 – 2005 yılları ortalama rüzgâr verileri kullanılmıştır. Bu rapora göre Türkiye'nin karasal alanları teknik potansiyeli 1500TWh/yıl, denizel alanların teknik potansiyeli de 400TWh/yıl'dır.

Türkiye'de genel amaçlı rüzgâr ölçümleri Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) tarafından yapılmaktadır. Ölçümler genellikle 10m yükseklikte ve birer saatlik periyotlarla alınmaktadır. Bazı istasyonlarda 30m yükseklikte ve 10 dakikalık periyotlarla da alınmaktadır. Rüzgârdan elektrik enerjisi üretmek için ayrıntılı rüzgâr potansiyel değerlendirme çalışmalarına ihtiyaç vardır. Bu sebeple rüzgâr enerjisi yönünden uygun görülen yerlere rüzgâr enerjisi gözlem istasyonları kurulup veri toplanmaya başlanmıştır.

2002 yılında yapılan çalışmada DMİ istasyonlarından alınan 1970 – 1980 yılları arasındaki kayıtlar değerlendirilmiş ve Türkiye'nin genel rüzgâr enerjisi dağılımı belirlenmiştir. Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz kıyılarımız rüzgâr enerjisi bakımından zengin görünmektedir. DMİ Genel Müdürlüğü'nün 113 istasyonunu baz alan EİE Genel Müdürlüğü tarafından yapılan bir çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama rüzgâr hızı 2.5m/s, yıllık ortalama rüzgâr gücü yoğunluğu 24 W/m²'dir. Türkiye'nin rüzgâr enerjisi teknik potansiyeli 88000MW, ekonomik potansiyeli de 10000MW civarındadır (Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2002).

Kaya'ya göre 2006 Türkiye'nin karasal alanlarının brüt potansiyeli 400000TWh/yıl, teknik potansiyeli 120000TWh/yıl ve ekonomik potansiyeli de 50000TWh/yıl'dır. Verilen bu değerlere göre brüt potansiyel 160000MW, teknik potansiyel 48000MW ve ekonomik potansiyel 20000MW kurulu güce eşdeğerdir. Kıyı sahalarındaki teknik potansiyel ise 8200MW kurulu güce eşdeğerdir (Acar & Doğan, 2008).

Ülkemizin rüzgâr potansiyelini belirlemek için yapılan çalışmaların sonuçları birbirleri ile tutarsızdır. Son yıllarda yapılan çalışmaların daha çok veri

kullanılarak ve daha ayrıntılı analizlerle yapılması sonucu önceki çalışmalardan daha güvenilir olduğu kanaatine varılmıştır.

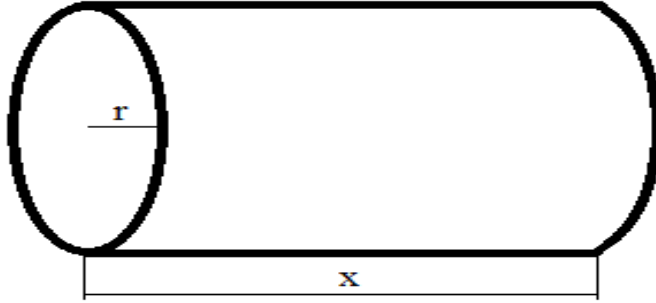
Bir cismin iş yapabilme yeteneğine enerji denir. Bir nesne bir yerden başka bir yere giderken kuvvet harcayarak yol alır ve enerji harcar. V hızı ile hareket eden m kütleli bir nesnenin kinetik enerjisi;

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (1.1)$$

Formülü ile bulunur. Güç ise birim zamanda harcanan ya da üretilen enerjidir.

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m V^2 \right) \quad (1.2)$$

Hareket halindeki cismi Şekil 1.10'deki gibi bir rüzgâr kütlesi olarak düşünelim.



Şekil 1.10 Silindirik Şeklindeki Hava Kütlesi

Bu cismin kütlesi;

$$m = \rho \pi r^2 x \quad (1.3)$$

Formülü ile bulunur. Bu durumda hava kütlesinin gücü;

$$P = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \rho \pi r^2 x V^2 \right) \quad (1.4)$$

Hava kütlesinin yoğunluğunu ve hızını sabit kabul edersek;

$$P = \left(\frac{1}{2} \rho \pi r^2 V^2 \right) \frac{dx}{dt} \quad (1.5)$$

Birim zamanda alınan yol hızı verdiğine göre;

$$\frac{dx}{dt} = V$$

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 V^3 \quad (1.6)$$

Silindirin yüzey alanı πr^2 'yi A harfi ile gösterirsek formül;

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1.7)$$

Olur. Burada;

P : Güç (Watt)

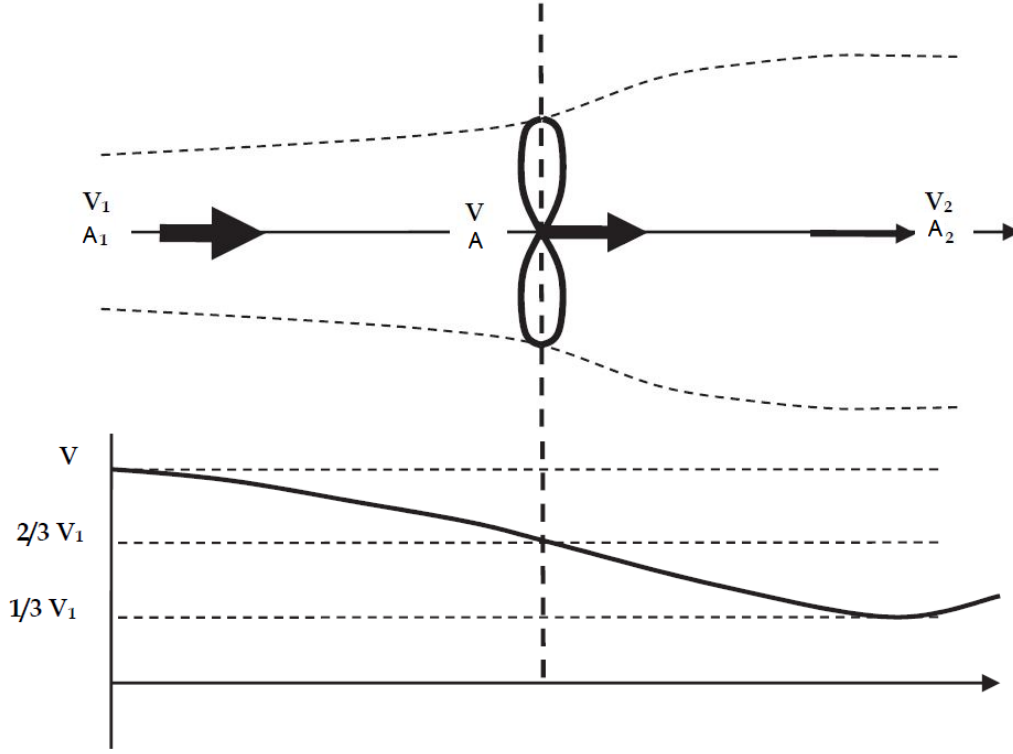
ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

A : Hava kütlesinin yüzey alanı (m^2)

V : Hava kütlesinin hızıdır (m/s).

1.2.3 Rüzgârdan elde edilebilecek güç

Silindir halindeki bir hava kütlesinin yatay eksenli ideal bir rüzgâr türbini kanatlarına çarptığı andaki şekli ve hızı Şekil 1.11'deki gibidir. İdeal türbinin kanatlarının tam ortasında bulunan hub alanı ihmal edilerek kanat sayısının sonsuz olduğu kabul edilir.



Şekil 1.11 Rotor Çarpan Havanın Davranışı (Ragheb & Ragheb, 2011)

Burada, rüzgâr türbinine gelen havanın A_1 yüzey alanına ve V_1 hızına sahip olduğunu varsayalım. Havanın türbin kanatlarına çarptığı andaki alanı A ve hızı V olsun. Kanatlardan çıkan havanın alanı genişleyerek A_2 alanı kadar olacak ve hızı da yavaşlayarak V_2 hızına düşecektir.

Birim zamanda türbine gelen havanın kütlesinin türbin kanatlarının önünde ve arkasında değişmediği bilinmektedir.

$$m' = \rho A_1 V_1 = \rho A V = \rho A_2 V_2 = \text{sabit} \quad (1.8)$$

$$F = ma = m \frac{dV}{dt} = m' \Delta V = \rho A V (V_1 - V_2) \quad (1.9)$$

$$dE = F dx \quad (1.10)$$

olduğuna göre;

$$P = \frac{dE}{dt} = F \frac{dx}{dt} = FV \quad (1.11)$$

Formül (1.9)'da bulunan F ifadesi yerine konulduğunda

$$P = \rho AV^2(V_1 - V_2) \quad (1.12)$$

Türbin kanatları tarafından alınan güç, birim zamanda, türbine gelen havanın kinetik enerjisi ile türbinden çıkan havanın kinetik enerjisi farkı ile bulunabilir.

$$P \cong \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

$$P \cong \frac{\frac{1}{2}mV_1^2 - \frac{1}{2}mV_2^2}{\Delta t}$$

$$P = \frac{1}{2}m'(V_1^2 - V_2^2) \quad (1.13)$$

Formül (1.8)'de bulunan m' ifadesi yerine formül (1.13)'de yerine konulduğunda;

$$P = \frac{1}{2}\rho AV(V_1^2 - V_2^2) \quad (1.14)$$

Formül (1.12) ve Formül (1.14) birlikte çözüldüğünde;

$$P = \frac{1}{2}\rho AV(V_1^2 - V_2^2) = \rho AV^2(V_1 - V_2)$$

Eşitliğin her iki tarafındaki ρAV ifadeleri sadeleştirilirse;

$$\frac{1}{2}(V_1^2 - V_2^2) = V(V_1 - V_2)$$

$$\frac{1}{2}(V_1 - V_2)(V_1 + V_2) = V(V_1 - V_2)$$

$$V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \quad (1.15)$$

Bulunur. Burada $(V_1 - V_2) \neq 0$ ve $V_1 \neq V_2$ olduğu kabul edilmiştir. Türbine giren havanın tamamı türbin kanatları tarafından durduruluyorsa yani türbinin arka tarafına hiç hava akımı geçmiyorsa, türbin bir duvar gibi rüzgârı kesiyor, dolayısıyla dönmüyor demektir. Giren hava hızı çıkan havanın hızına eşitse de

türbin kanatlarına rüzgâr hiç çarpıyor dolayısıyla türbin yine dönmüyor demektir. Her iki durumda da türbin dönmediği için enerji dönüşümü olmayacaktır.

$$F = \rho AV(V_1 - V_2) = \rho A \frac{1}{2} (V_1 + V_2)(V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \rho A (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.16)$$

$$P = \rho AV^2(V_1 - V_2) = \rho A \left(\frac{1}{2} (V_1 + V_2) \right)^2 (V_1 - V_2)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho A (V_1 + V_2)^2 (V_1 - V_2) = \frac{1}{4} \rho A (V_1 + V_2)(V_1 + V_2)(V_1 - V_2)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho A (V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2) \quad (1.17)$$

Rüzgâr türbinlerinde, kanatlardan çıkan havanın hızının kanatlara gelen havanın hızına oranına “interference factor (enterferans faktörü)” denir ve b sembolü ile gösterilir.

$$b = \frac{V_2}{V_1} \quad (1.18)$$

Formül (1.18), formül (1.16)’da kullanılırsa;

$$F = \frac{1}{2} \rho A (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{2} \rho A V_1^2 \left(\frac{V_1^2}{V_1^2} - \frac{V_2^2}{V_1^2} \right)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho A V_1^2 (1 - b^2) \quad (1.19)$$

Bu denkleme göre türbinden elde edilebilecek güç “enterferans faktörü” olan b’ye göre yazıldığında;

$$P = \frac{1}{4} \rho A (V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2) = \frac{1}{4} \rho A V_1^2 (1 - b^2) V_1 (1 + b)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho A V_1^3 (1 - b^2)(1 + b) \quad (1.20)$$

Elde edilir. Bu durum rüzgârdan elde edilebilecek gücün, türbin kanatlarına doğru gelen hızın (V_1) küpüyle ve türbinin enterferans faktörüyle ilgili olduğu göstermektedir.

1.2.4 Güç faktörü (c_p)

Havada sabit V_1 hızı ile hareket eden rüzgârın rüzgâr türbini kanatlarına çarptığı andaki hızı $V = V_1$ 'dir. Rüzgârın gücü;

$$P_{rüzgar} = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (1.21)$$

Rüzgâr türbininin güç faktörü (performans katsayısı), türbinin, havada akmakta olan rüzgârın gücünün ne kadarını alarak döndürme gücüne dönüştürdüğünü gösteren boyutsuz bir değerdir.

$$C_p = \frac{P_{türbin}}{P_{Rüzgar}} \quad (1.22)$$

$$C_p = \frac{\frac{1}{4} \rho A V_1^3 (1 - b^2)(1 + b)}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3}$$

$$C_p = \frac{1}{2} (1 - b^2)(1 + b) \quad (1.23)$$

İfadeden de anlaşıldığı gibi, türbinin güç faktörü direk olarak enterferans faktörü (b) ile bağlantılıdır. İfadenin b 'ye göre türevi alınıp 0'a eşitlenirse, C_p 'nin maksimuma ulaştığı andaki b değeri hesaplanabilir.

$$\frac{dC_p}{db} = \frac{1}{2} \frac{d}{db} [(1 - b^2)(1 + b)]$$

$$= \frac{1}{2} [(1 - b^2) - 2b(1 + b)]$$

$$= \frac{1}{2} (1 - b^2 - 2b - 2b^2)$$

$$= \frac{1}{2} (1 - 3b^2 - 2b)$$

$$= \frac{1}{2}(1 - 3b)(1 + b) \quad (1.24)$$

İfade parçalara ayrılarak 0'a eşitlenir.

$$(1 + b) = 0$$

$$b = \frac{V_2}{V_1} = -1$$

$$V_2 = -V_1$$

Sonuç anlamsızdır. Bu değer dikkate alınmaz.

$$1 - 3b = 0$$

$$b = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3}$$

$$V_2 = \frac{1}{3}V_1 \quad (1.25)$$

Bulunur. Bu durumda C_p 'nin en yüksek olduğu değer;

$$C_p = \frac{1}{2}(1 - b^2)(1 + b)$$

$$C_p = \frac{1}{2}\left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right)\left(1 + \frac{1}{3}\right)$$

$$C_{p\max} = \frac{16}{27} \quad (1.26)$$

$$C_{p\max} = 0.59259$$

Olarak bulunur. Bu değer Betz limiti olarak bilinir ve teorik olarak rüzgârdan elde edilebilecek gücün, rüzgâr gücünün %59.26'sını geçemeyeceğini ispatlar. Rüzgâr türbinindeki aerodinamik kayıplar dolayısıyla ulaşılabilen en yüksek verimin %40 civarında olduğu kabul edilir.

Denklem sistemi çözülmeye devam edildiğinde, formül (1.15)'den;

$$V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2)$$

$$V = \frac{1}{2}\left(V_1 + \frac{V_1}{3}\right)$$

$$V = \frac{2}{3}V_1 \quad (1.27)$$

Olarak bulunur. Formül (1.8)'de çözülürse;

$$m' = \rho A_1 V_1 = \rho A V = \rho A_2 V_2 = \text{sabit}$$

$$A = A_1 \frac{V_1}{V} = \frac{3}{2}A_1 \quad (1.28)$$

$$A_2 = A_1 \frac{V_1}{V_2} = 3A_1 \quad (1.29)$$

Sonuçları elde edilir.

1.2.5 Uç hız oranı (λ)

Bir rüzgâr türbininin hızı dakikadaki dönme hızıyla ifade edilir. Buna türbinin devir sayısı da denir. Eğer türbinin devir sayısı çok düşük ise, türbin kanatlarına gelen hava akımının bir kısmı kanatlara hiç çarpmadan geçecek ve mekanik enerjiye dönüştürülemeyecektir. Eğer türbinin devir sayısı çok yüksek ise, türbin kanatları, rüzgârın önüne bir duvar gibi duracak ve havanın kanatların arkasına geçmesini engelleyecektir. Her iki durumda da rüzgârdan alınabilecek enerjinin gücü düşecektir. En iyi uç hız oranı, gelen hava akımını yakalayan ve kanatlara çaptıktan sonra kanadın arkasına geçmesini sağlayan dönme hızıdır. Uç hız oranı, kullanılan kanat profiline, kanat sayısına ve türbin tipine bağlı olarak değişir. 3 kanatlı rüzgâr türbinlerinde λ değeri 6 – 8 arasında değişmektedir ve uygulamada en çok 7 olduğu görülmektedir (Ragheb & Ragheb, 2011).

Uygulamada uç hız oranının yüksek olması istenir. Çünkü devir sayısı ne kadar yüksek olursa üretilecek enerji de o kadar yüksek olacaktır. Fakat devir

sayısının yüksek olması uygulamada bazı sorunları da beraberinde getirmektedir.

Bu dezavantajlar;

1. Kanat uç hızının 80m/s'den daha yüksek olduğu durumlarda rüzgârla taşınan kum ve toz parçaları kanadı erozyona uğratarak normal ömründen daha çabuk yıpranmasına sebep olmaktadır.
2. Kanatlar ne kadar hızlı dönerse üreteceği gürültü de o kadar fazla olmaktadır.
3. Kanatların hızlı dönmesi titreşime sebep olarak rotora ve kuleye binen yükleri arttırmaktadır.
4. Artan dönme hızı kanat ucundaki kayıpları arttırarak kanat verimini düşürmektedir.
5. Hızlı dönen rotoru frenlemek için yapılacak düzenekler de daha büyük ve daha performanslı olmak zorundadır. Bu durum da türbin maliyetini arttırmaktadır.

$$Uç hız oranı = \lambda = \frac{V_{\phi}}{V_r} = \frac{\omega r}{V_r} \quad (1.30)$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$\lambda = \frac{2\pi f r}{V_r}$$

Formülü ile bulunur. Formülde kullanılan semboller;

V_{ϕ} : Kanat uç hızı (çevresel hız) (m/s)

V_r : Rüzgâr hızı (m/s)

r : Rotor yarıçapı (Kanat uzunluğu) (m)

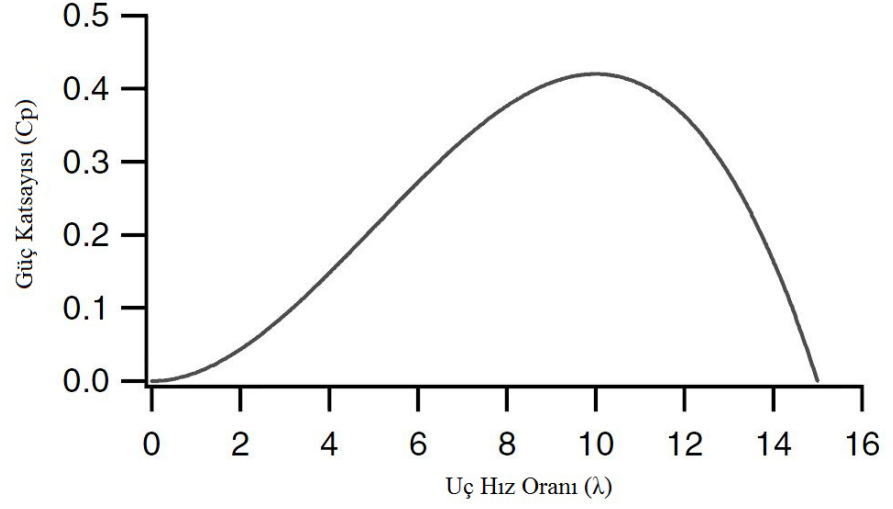
ω : Açısal hız (rad/s)

f : Frekans (Hz), (1/s)

1.2.6 Güç faktörü – uç hız oranı ilişkisi

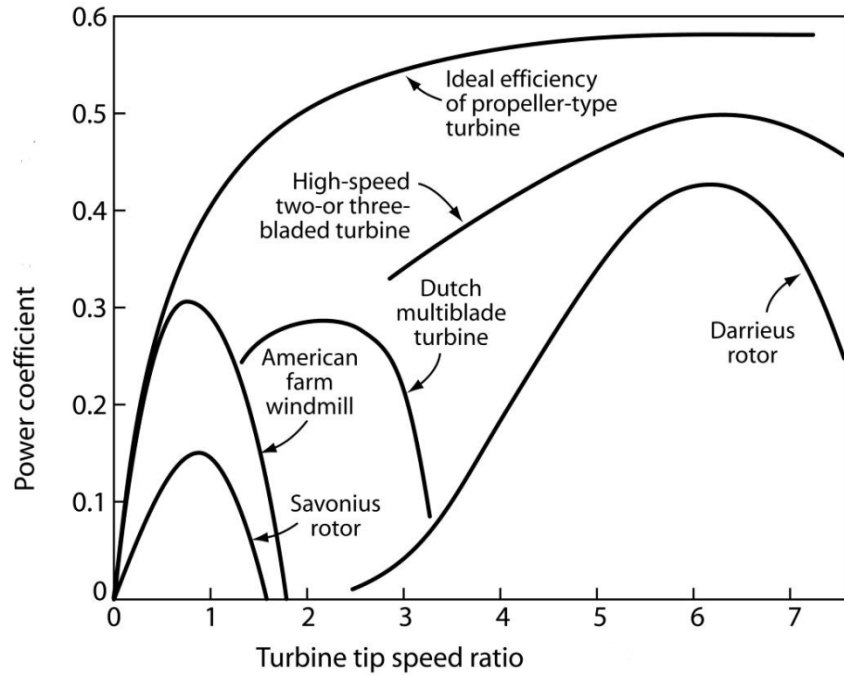
Bir rüzgâr türbini kanadı, optimum uç hız oranında çalışmak üzere dizayn edilir. Fakat uygulamada rüzgâr hızının sabit ve sürekli olmaması sebebiyle her zaman bu uç hız oranında çalışmaz. Bu da türbinin çıkış gücünü direk olarak etkiler. Rüzgâr türbininin aerodinamik güç performansını değerlendirebilmek için

Güç faktörü(C_p) ile uç hız oranı (λ) ilişkisini gösteren grafiğini incelemek gereklidir. Bu grafik genelde Şekil 1.12'deki gibidir (Manvwell, et al., 2009).



Şekil 1.12 Güç Katsayı (C_p) – Uç Hız Oranı (λ) Grafiği

Şekil 1.12'de verilen eğri 2 ya da 3 kanatlı bir türbinin ($C_p - \lambda$) bağıntısını göstermektedir. Diğer türbinler için de çıkarılmış olan eğriler Şekil 1.13'de verilmiştir.



Şekil 1.13 Türbin Çeşitlerine Göre C_p - λ Eğrileri (Justus, 1978)

Grafik incelendiğinde en yüksek güç katsayısına, %45 ile 2 ya da 3 kanatlı rüzgâr türbinlerinde ulaşılabildiği görülmektedir. Darrieus türbinlerinde %40

civarına gelindiği görülmektedir. Diğer türbin çeşitlerinde ise güç faktörü %30 ve altında olması sebebiyle elektrik üretimi için uygun olmadığı fakat su pompalama gibi işlerde kullanılabileceği anlaşılmaktadır.

1.2.7 Aerodinamik kayıplar

Bir rüzgâr enerjisi çevrim sisteminde ulaşılacak en yüksek güç faktörünün Betz kriterine göre %59.26 olduğu bilinmektedir. Fakat uygulamada hiçbir zaman bu verime ulaşamaz. Çünkü kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürürken karşımıza aerodinamik kayıplar çıkar. Bu kayıplar;

1. Profil kayıpları
2. Uç kayıpları
3. Girdap kayıpları

1.2.7.1 Profil kayıpları

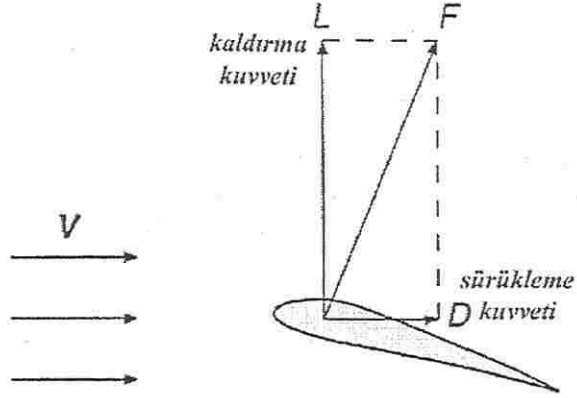
Rüzgâr türbinlerinin kanatları iki önemli aerodinamik kuvvetin etkisi ile dönme hareketi gerçekleştirir. Bu kuvvetler kaldırma (Lift) ve sürüklenme (Drag) kuvvetleridir.

Sürüklenme kuvveti, kanat üzerinde akış yönündemeydana gelen kuvvettir. Kanadı düz bir plaka gibi kabul edersek üzerindemeydanagelebilecek maksimum sürüklenme kuvveti hava akışının kanat üzerine 90° dik geldiği durumda iken; minimum sürüklenme kuvveti ise hava akışı kanat yüzeyine paralel ikenmeydana gelir. İdeal bir kanatta sürüklenme kuvvetinin en düşük seviyede olması tercih edilir.

Kaldırma kuvveti ise, akış yönüne dik olarakmeydana gelen kuvvettir. Uçakların yerden havalanmasına da bu kuvvet sebep olduğu için kaldırma kuvveti olarak adlandırılmıştır.

Kanat üzerine etkiyen kaldırma kuvveti, hava akışı kanat yüzeyine 0° açı ile geldiğinde görülür. Havanın akış yönüne göre meydana gelen küçük açılarda akış şiddetinin artmasıyla düşük basınçlı bölgelermeydana gelir. Bu bölgelere “akış altı (downstream)” denir. Dolayısıyla, hava akış hızı ile basınç arasında bir

ilişkimeydena gelmiş olur. Yani hava akışı hızlandıkça basınç düşer, hava akışı yavaşladıkça basınç artar. Bu olaya Bernoulli etkisi denir. Kaldırma kuvveti de cismin üzerinde emme veya çekmemeydena getirir. İdeal kanat tasarımında kaldırma kuvvetinin en yüksek seviyede olması tercih edilir. Bu sebeple rüzgâr türbinlerinin kanatları yağmur damlasını andıracak şekilde tasarlanırlar (Önder, 2006). Şekil 1.14’de bir rüzgar türbini kanadına etki eden kuvvetler görülmektedir.



Şekil 1.14 Rüzgâr Türbinin Kanadına Etki Eden Kuvvetler

Hazırlanan kanat profilinin verimi;

$$\eta_{profil} = 1 - \frac{\lambda_A}{\varepsilon}$$

olarak ifade edilir. Bu denklemde;

η_{profil} : Kanat profil verimi

λ_A : Kanat dizaynde virililik sayısı (d/dk)

ε : Kayma sayısıdır.

$$\lambda_A = \frac{V_\zeta}{V_r} = R n \frac{\pi}{30 V_r}$$

$$\varepsilon = \frac{C_D}{C_L}$$

Formülleri kullanılır. Denklemde kullanılan semboller;

V_{ϕ} : Kanat uç hızı (çevresel hız) (m/s)

V_r : Rüzgâr hızı (m/s)

R : Rotor çapı(m)

n : Devir sayısı (d/dk)

C_D : Sürüklenme katsayısı

C_L : Kaldırma katsayısıdır.

1.2.7.2 Uç kayıpları

Türbin kanatlarının uç kısmında rüzgâr kanadın alt kısmından üst kısmına doğru akmaya başlar. Kanadın uç kısmındaki bu akım, kanada gelen hava akımıyla üst üste binerek giderek genişleyen bir girdap oluşturur. Kanat uç verimi; kanat sayısına ve dizayndevirlilik sayısına bağlıdır.

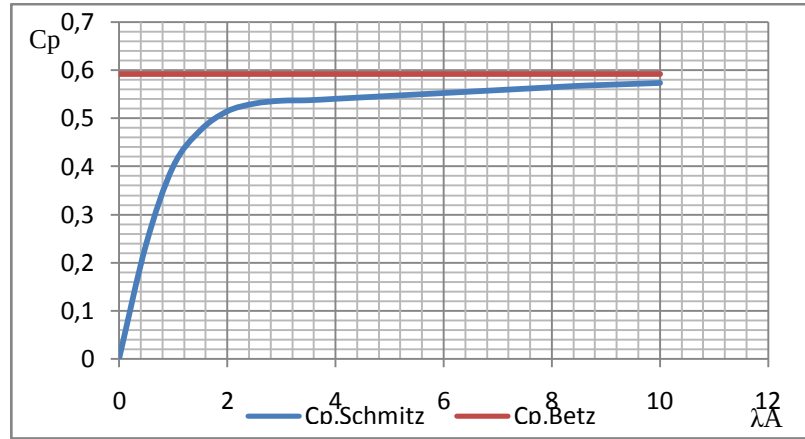
$$\eta_{uç} = 1 - \left(\frac{1.84}{Z \lambda_A} \right)$$

Z : Kanat sayısı

λ_A : Kanat dizayndevirlilik sayısı (d/dk)

1.2.7.3 Girdap kayıpları

Betz teoremine göre rüzgâr türbinine doğru gelen hava kütesinin doğrultusu, türbin kanatlarının önünde ve arkasında değişmez. Oysa gelen hava kütlesi kanada çarptığı anda kanat profiline ve dönme hızına bağlı olarak yön değiştirir. Kanat dönmeye devam ettiği için hava kütlesi kanadın arka tarafında girdap oluşturmaya başlar. Girdap kayıpları Schmitz tarafından verilen bir grafikte açıklanmıştır (Gasch, 1996)(Çetin, et al., 2005) (Gasch, 1996; Çetin vd.'den, 2005). Schmitz'in hesaplamada kullandığı profile göre $C_{p,Schmitz} - \lambda_A$ grafiği Şekil 1.15'de görüldüğü gibidir.



Şekil 1.15 $C_{p,Schmitz}$ – λ_A Grafiği

Bu grafiğe göre dizayn devirlilik sayısına bağlı $C_{p,Schmitz}$ değerleri de Çizelge 1.3’de verilmiştir.

Çizelge 1.3 $C_{p,Schmitz}$ – λ_A Değerleri

λ_A	$C_{p,Schmitz}$
0	0
0.5	0.238
1	0.4
1.5	0.475
2	0.515
2.5	0.531
3	0.537
3.5	0.538
4	0.541
4.5	0.544
5	0.547
5.5	0.55
6	0.553
6.5	0.556
7	0.559
7.5	0.562
8	0.565
8.5	0.568
9	0.57
9.5	0.572
10	0.574

1.2.8 Rüzgâr hızının yükseklikle değişimi

Rüzgâr enerjisi çevrim sistemlerinde çıkış gücüne etkisi en yüksek olan girdi rüzgâr hızıdır. Formül (1.21’de görüldüğü gibi rüzgârın gücü, hızının küpü

ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Rüzgâr hızları ölçülürken genellikle 10m ve 30m yüksekliklerde ölçülürler. Fakat rüzgâr türbinleri kurulurken hub yükseklikleri 10m ile 100m arasında değişmektedir. Ortalama hub yüksekliğinin 50m olduğu varsayıldığında 30m’de ölçülen rüzgâr verileri ile sağlıklı hesaplamalar yapmaktamükün olmamaktadır.

Rüzgâr hızı yerden yükseldikçe belli bir orana göre artış göstermektedir. Bu artışın hesaplanmasında kullanılan formüle “Hellman Yükseltme Bağıntısı” adı verilir (Yıldırım, 2008). Bağıntı; bilinen bir yükseklikte ölçülen rüzgâr hızından yola çıkılarak istenilen bir yükseklikteki rüzgâr hızını hesaplamak için kullanılır.

$$V_r = V_{ref} \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^\mu \quad (1.31)$$

V_r : Hesaplanmak istenen rüzgar hızı (m/s)

V_{ref} : Referans yükseklikte ölçülen rüzgar hızı (m/s)

H : İstenilen yükseklik (m)

H_{ref} : Rüzgar hızı ölçülen noktanın yüksekliği (m)

μ : Pürüzlülük katsayısı

Formülde gösterilen pürüzlülük katsayısı, rüzgâr hızı hesaplaması yapılacak olan bölgenin yüzey şekline göre değişen bir katsayıdır. Yüzey koşullarına göre pürüzlülük katsayılarıÇizelge 1.4’de verilmiştir (Patel, 1999).

Çizelge 1.4Yüzeylere Göre Pürüzlülük Katsayıları

Yüzey Durumu	μ
Göl, deniz, okyanus yüzeyleri ile sert ve düz zeminler	0.1
Çim ya da kısa boylu ekinleri olduğu alanlar	0.15
Uzun ekinlerin olduğu alanlar	0.20
Çiftlik arazileri ve az ağaçlı alanlar	0.25
Küçük kasabalar ve ağaçlık alanlar	0.30
Yüksek binalı kentsel alanlar	0.40

1.3 Tezin Amacı

Yeryüzündeki fosil yakıt rezervlerinin azalması ve çevresel hassasiyetlerin artmasına bağlı olarak; yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi artmış ve bu kaynakların kullanılmasına yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları hız kazanmıştır. Bunun dikkate değer göstergelerinden bir tanesi gelişmiş ülkelerin temiz enerji kaynaklarının kullanılmasına yönelik olarak, yapılan Ar-Ge çalışmalarına ayırdıkları fonların son zamanlarda büyük artış göstermesidir. Örneğin FP7 Çerçeve Programındaki Enerji Tematik Alanı'na ayrılan araştırma fonu 2.2milyar Euro'nun üzerindedir. Temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisinde, yıllık rüzgâr hızı ortalamasının 5m/s'nin üzerinde olduğu yerlerde kurulum maliyeti, rakipleri ile rekabet edebilecek düzeydedir. Rüzgâr enerjisi, özellikle ülkemiz için en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Rüzgâr türbin teknolojisindeki gelişmeler, elektrik enerjisi üretimi amaçlı rüzgâr türbinlerinin birim enerjimaliyetlerinin düşmesine sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak, rüzgâr türbinlerinin elektrik enerjisi üretimindeki payı gün geçtikçe artmaktadır.

Bu tezin amacı, küçük güçlü (20kW ve altı) otonom rüzgâr türbinlerinin testlerini yapabilecek özgün bir sistem oluşturulmasıdır. Ayrıca, simülasyonlarla, elde edilecek elektrik enerjisi tahmin edilen türbinlerin, gerçekte bu enerjiyi üretip üretmediklerini tespit edip, optimizasyonunun yapılmasıdır.

2 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Rüzgâr enerjisi MÖ 2800 yıllarında Ortadoğu’da, MÖ 17. yüzyılda Babil, Mezopotamya ve Çin’de sulama amaçlı, MÖ 200 yıllarında Babil’de tane öğütme amaçlı kullanılmıştır. Zaman içindeki gelişmelerle insanlar rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi elde etme amaçlı rüzgâr türbinlerini üretmişlerdir.

Elektrik üretimi için kullanılan rüzgâr türbinleri dikey ve yatay eksenli olmak üzere iki başlıkta toplanabilirler. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin dönme eksenleri ve kanatları düşeydir. Bu sebeple, rotamekanizmasına (yawmechanism) ihtiyaç duymadan, her yönden gelen rüzgârda dönebilme özelliğine sahiptir. Dikey eksenli türbinlerin üreteç ve vites kutusu toprak seviyesinde kurulabildiğinden kuleye gerek duymazlar. Genellikle düşük rüzgâr hızlarında elektrik enerjisi üretmek ve su pompalamak için tasarlanmışlardır. Kanat sayısının artması malzeme ağırlığını da beraberinde getirdiğinden, yüksek rüzgâr hızlarında verimsiz çalışır. Rotor çapı 5m olan türbinden yaklaşık 0,5kW güç elde edilir. Bu türbinleri yer yüzeyine bağlayabilmek için çelik halatlara gereksinim duyulmaktadır (Öger, 2006).

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin dezavantajlarından dolayı günümüzde elektrik enerjisi üretimi için yatay eksenli rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Bu sebeple tez çalışmasında bahsi geçen rüzgâr türbinleri ile yatay eksenli rüzgâr türbinleri kastedilmektedir.

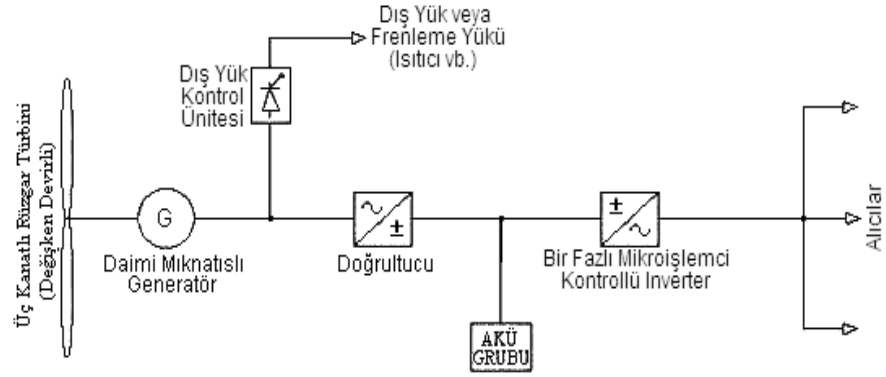
Rüzgâr türbinleri, önce, hareket halindeki havada bulunan kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürürler sonra mekanik enerjiyi bir generatör yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu dönüşümlerde en önemli kısım, havadaki kinetik enerjinin en yüksek verimle mekanik enerjiye dönüştürülebilmesidir. Kinetik enerjiden mekanik enerjiye dönüştürme teorik olarak en yüksek verim %59.26’dır. Bu değere Betz kriteri adı verilir.

Elde edilen mekanik enerji, generatöre aktarılınca kadar birmiktar yatak sistemleri ve dişli sistemleri üzerinde sürtünme şeklinde kayba uğrar. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri uygulamalarında mekanik verim, yüksek hızlı iki kanatlı

türbinlerde en yüksek %50, düşük hızlı ve çok kanatlı türbinlerde de %20 ile %40 arasında değişmektedir (Patel, 1999).

Elektrik enerjisi üretmek amaçlı kullanılan rüzgâr türbinlerinde kanat sayısı 1 ile 4 adet arasındadır. Tek kanatlı türbinlerde dengeleyici olarak karşı ağırlık kullanılır. Kanat sayısı arttıkça verim artar. Ancak 3 kanattan daha fazla sayıda kanat, maliyeti önemli ölçüde arttıracığından tercih edilmez. Bir ve iki kanatlı türbinler daha hızlı döndüklerinden, üç kanatlı türbinlere göre daha fazla gürültü yaparlar. Bütün bunların yanında, üç kanatlı türbinlerin estetik görünüşleri de bu tip türbinlerin daha çok tercih edilmesinde önemli bir etkidir. Bu sebeplerden dolayı, uygulamada en çok kullanılan tip üç kanatlı olanlardır.

Küçük güçlü otonom rüzgâr türbinlerinin blok yapısı genellikle Şekil 2.1'deki gibidir. Türbin mili, herhangi bir dişli sisteminden geçmeden, direk olarak daimi mıknatıslı generatöre bağlanır. Generatör çıkışında frekansı sabit olmayan alternatif gerilim elde edilir. Frekans değişken olduğu için de bu gerilim doğrudan şebekeye verilemez. Bir doğrultucu kullanılarak doğru gerilime çevrilir ve akü sistemine aktarılır. Akü çıkışında da sabit frekanslı ve genlikli alternatif gerilime çevrilerek kullanılır. Bu çevrimlerin tamamı sistemin verimini direkt olarak etkiler.



Şekil 2.1 Küçük Güçlü Otonom Rüzgâr Türbini Blok Yapısı

Küçük güçlü otonom bir rüzgâr enerjisi çevrim sisteminde, toplam verim;

1. Mekanik verim
2. Generatör verimi
3. Doğrultma sisteminin verimi
4. Akü grubu verimi (şarj – deşarj verimi)
5. İnvertör verimi değerlerine bağlıdır.

Rüzgâr türbin sistemleri ile çalışırken, tüm bu üniteler çok iyi şekilde bilinmeli ve uygulamalar buna göre yapılmalıdır. Literatürde rüzgâr türbini kullanılarak elektrik enerjisi elde etmeyi hedefleyen çok sayıda çalışmamevcuttur. Bu çalışmaları özelliklerine göre gruplamak faydalı olacaktır.

2.1 Rüzgâr Türbini Modelleme ve İnceleme Çalışmaları

Osman Oral Kıvrak'ın "ModelingAndSimulation Of Wind Turbines" isimli tez çalışmasında, rüzgâr türbinlerinde gerçekleşen enerji dönüşüm işlemini ve türbin aksamalarını incelenmiştir. Rüzgâr türbinlerini çeşitli kategorilere göre sınıflandırarak Matlab – Simulink programı ile Vestas V80 – 2.0MWmodel rüzgâr türbininin bilgisayar ortamındamodeli oluşturulmuştur. Türbinin çıkış gücü kontrolü "pitch control" yöntemiyle gerçekleştirilmiştir (Kıvrak, 2003).

2010 yılında Purdue Üniversitesinde Jon K. Engelsman tarafından "General Electric" firması tarafından üretilmiş olan 1.5MW güce sahip şebekeye paralel, çift beslemeli indüksiyon generatörlü rüzgâr türbininin rotor vemekanik kısmı, generatörü ve kontrol ünitesi detaylı bir şekildemodellenmiştir. Hazırlanan türbinmodeli sabit rüzgâr hızı ve artan rüzgâr hızı (rampa sinyali) ile simüle edilip çıkış gücü izlenerek kontrol sisteminin performansı test edilmiştir. Çalışmada,türbülanslırüzgâr hızı damodellenerek rüzgâr hızındaki dalgalanmaların türbin sistemine etkileri izlenmiştir. Çalışma sonunda hazırlanan türbinmodelinin ve türbülanslı havamodelinin, bir rüzgâr türbininin ya da rüzgâr tarlalarının elektrik çıkış gücündeki dalgalanmaları gösterebildiği ifade edilmiştir (Engelsman, 2010).

"Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin Aerodinamik Dizaynı" isimli çalışmada düşük katılık oranlı ve yatay eksenli rüzgâr türbinleri etrafındaki hava akımı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Türbin kanatlarının "Pala Elemanı Teorisi" ne göremodellemesi yapılarak teorideki kabullerin geçerlilikleri hakkında fikir elde edilmeye çalışılmıştır. Kanat dizaynı için Fortran dili ile bir program geliştirilmiştir. Bu programa ait sonuçların literatürde verilen sonuçlarla büyük benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Hesaplanan rüzgâr türbini kanatlarının geometrileri düzeltilerek yeni hallerinin performansı incelenmiş, uygun çalışma

aralıkları belirlenmiştir. Kanatların yeni tasarımlarındaki kayıpları karşılamak için rotor çapının %10 büyütülmesi gerektiği gözlemlenmiştir. Ayrıca yeni tasarım kanatların uygun çalışma uç hız aralığının çok daraldığı da görülmüştür (Beşerik, 1992).

Benzer bir çalışma da 2006 yılında Gazi Üniversitesinde yapılmıştır. “Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini Kanadının Bilgisayar Destekli Tasarımı” isimli çalışmada yatay eksenli rüzgâr türbinleri için istenilen koşullara göre kanat tasarımı yapabilecek bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Program “Kanat Elemanı Momentum Teorisi” ne göre kanat tasarımı gerçekleştirmektedir. Visual C#.NET tabanlı olarak geliştirilen programa “Kanat Simülatörü” adı verilmiştir. Kullanıcı, programın ara yüzüne, bölge ve kanat uzunluğunu girdiği zaman tasarım için gerekli ölçüleri (kanat giriş ölçüleri, tahmini güç, kanat açısı) hesaplayıp sonuçları verecek şekilde tasarlanmıştır (Önder, 2006).

Simülasyon çalışmalarından bir başkası da “PerformancePrediction Of HorizontalAxis Wind Turbines Using VortexTheory” çalışmasıdır. Bu çalışmada “Girdap Teorisi” açıklanarak bu teorinin deneylere yakınlığını anlamak için Visual Basic 6.0 ve Excell programları kullanılarak “Aeropower” adında bir yazılım geliştirilmiştir. Simülasyondamodel olarak “Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı” (NREL) rotoru kullanılmıştır. Programla dizaynrüzgâr hızına çok uzak olmayan hızlarda kabul edilebilir sonuçlar alınmıştır. Düşük rüzgâr hızlarında türbülans nedeniyle, yüksek rüzgâr hızlarında da frenleme sebebiyle programın iyi sonuçlar vermediği görülmüştür (Yücel, 2004).

İstanbul Teknik Üniversitesi’nde yapılan “Wind TurbineModelingAnd Controller Design” isimli çalışmada, rüzgâr türbin sisteminin aerodinamiği anlatılarak, güç, aerodinamik tork, itki kuvveti, uç hız oranı, güç faktörü ve tork katsayılarını veren denklemler çıkarılmıştır. Ayrıca bu katsayıların kontrolcü ve sistem tasarımı üzerindeki etkileri anlatılmıştır. 1.5MW gücünde değişken hız ve sabit kanat açılı türbinmodellenecek buna uygun bir PI kontrolcü tasarlanmıştır (Çokünlü, 2007).

“Bir Rüzgâr Türbininin modellenmesi, Simülasyonu ve Kontrolü” isimli Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü’nde yapılan çalışmada bir rüzgâr türbini Matlab – Simulink programı ile modellenerek sistem denklemleri üç ayrı kontrolmetodu (slidingmode, feedbacklinearization ve linearization) ile kontrol edilmiş ve sonuçları açıklanmıştır (Güneş, 2006).

Matlab programı kullanılarak bir başka simülasyon çalışması da Texas A&M Üniversitesi’nde yapılmıştır. “A SimulationStudy of Wind Energy Conversion SystemsUsing Matlab” isimli çalışmada rüzgâr türbin sisteminde, indüksiyon generatörü ve çift beslemeli indüksiyon generatörü kullanılarak dinamik kararlı hal simülasyonları yapılmıştır. Sistem sabit ve değişken rüzgâr hızları altında, farklı kompanzasyon yöntemleri ile bir rüzgâr çiftliği oluşturularak test edilmiştir (Garlapati, 2006).

Bu çalışmaların yanı sıra rüzgâr türbinlerinimodelleme üzerine hazırlanan yayınlardan bazılarını şu şekilde sıralayabiliriz: (Ergür, 2006), (Vitalea & Rossib, 2008), (No, et al., 2009), (Caliao, 2011), (Thapar, et al., 2011),(Mansouri, et al., 2004), (Malinga, et al., 2003), (Jelavic, et al., 2006), (Monfared, et al., 2008), (Mihet-Popa, et al., 2004)(Turhal, 2009)(Alyamaç, 2010)(Eisenhut, et al., 2007)(Ofualagba & Ubeku, 2008)(Sürgevil, 2004)(Akdoğan, 2011).

2.2 Rüzgâr Türbini ve Rüzgâr Çiftliği Tasarımı Çalışmaları

Rüzgâr türbinlerimekanik aksam, generatör aksamı ve kontrol ünitesi olmak üzere temelde üç ayrı üniteden oluşmaktadır. Rüzgâr türbini tasarımı yapılırken her üç ünite de ayrı ayrı fakat birbirlerine uyumlu olacak şekilde tasarlanırlar. Literatürde de tasarım ile ilgili çalışmalar araştırılıp gruplanarak verilmiştir.

2.2.1 Kanat tasarımı çalışmaları

Rüzgâr türbini tasarlanırken ilk olarak yapılması gereken rüzgârdaki kinetik enerjinin en yüksek verimlemekanik dönme enerjisine çevrilmesidir. Buradaki verim üretilen elektrik enerjisinin gücüne çok fazla etki edecektir. Bilindiği gibi, rüzgâr gücümekanik güce dönüştürülürken teorik olarak %59.26 olan verimi

aşmak mümkün değildir. Uygulamada ise %45-50'nin üzerine çıkılamaz. Rüzgâr türbininin diğer ünitelerinin hepsinde verim %80'lerden daha yüksektir. Bu sebeple tasarımcılar kanat verimini arttırmak için çok sayıda çalışma yapmaktadırlar.

Brian Gaunt tarafından, rotor çapı 14m olan bir türbin tasarlanarak laboratuvar ortamında test edilmiştir. Çalışmada iki hedef belirlenmiştir. İlk hedef olarak kanatların güç üretimi ölçülmüş ve ikinci hedef olarak da “Partical Image Velocimetry (PIV)” tekniğini kullanılarak kanat yakınlarındaki havanın fotoğrafları çekilip hız vektör haritası çıkarılmıştır. Ortalama 6.4m/s ile 11.1m/s rüzgâr hızları arasında ve 40 d/dk ile 220 d/dk arasında kanatlar test edilmiştir. Testler sonucunda rüzgâr hızına bağlı türbin çıkış gücü grafiği ve uç hız oranına bağlı güç faktörü (C_p/λ) grafiğini çıkartılmıştır. Tasarlanan kanatlarla en yüksek hız olan 11.1m/s rüzgâr hızında 220 d/dk'da 3080 W çıkış gücüne ulaşılmıştır. Ayrıca en yüksek uç hız oranı 8 olarak ölçülmüş ve en yüksek C_p değeri de 0.4 olarak ölçülmüştür (Gaunt, 2009).

“Computer-Aided Design Of Horizontal-Axis Wind Turbine Blades” isimli çalışmada Serhat Duran tarafından, türbin kanat tasarımı konusu akışkanlar dinamiği yönünden incelenmiştir. Türbin kanat tasarımı için “Pala Elemanı Moment Teorisi - Blade Element Momentum (BEM) yönteminden faydalanılmıştır. Çalışmada ilk olarak en iyi verim için kanat tasarımı yapılmıştır. Kanada etkiyen kuvvetlerin büyük olması sebebiyle tasarlanan kanadın geometrisi yeniden düzenlenmiş ve yeni tasarımın performansı incelenmiştir. Yeni tasarımın ilk tasarıma göre %10 daha az verimle çalıştığı görülmüş. Ayrıca istenilen herhangi bir güç için yeni tasarımın kanat boyunun ilk tasarıma oranla %5 daha uzun olması gerektiği görülmüştür. Çalışmada kullanıcının girdiği; istenilen türbin gücü, kanat sayısı, dizayn rüzgâr hızı ve kanat profili verilerine bağlı olarak kanat tasarımı yapabilen “BLADESIGN” isimli bir bilgisayar programı geliştirilmiştir (Duran, 2005).

Ege Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmada LS-1 0413 profil tipinde 20m uzunluğunda bir türbin kanadı tasarlanmıştır. Kanadın dizayn uç hız oranı $\lambda_{diz}=9$, ve dizayn hücum açısı $\alpha_{diz}=13.5^\circ$ olarak belirlenmiştir. Tasarımı yapılan kanadın

analitik ve nümerik yöntemlerle çıkarılan C_p - λ eğrilerinin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Analitik yöntem kullanılarak çıkarılan eğride en yüksek C_p değeri 0.5 olarak $\lambda=11$ değerinde olduğu görülmüştür. Nümerik yöntemle çıkarılan eğride de en yüksek C_p değeri 0.48 olarak $\lambda=13$ değerinde olduğu görülmüştür (Şentürk, 2007).

Trakya Üniversitesinde yapılan bir diğer kanat tasarım çalışmasında da DelftUniversity tarafından geliştirilen DU profilleri kullanılarak dizayn uç hız oranı $\lambda_{diz}=6$ olarak belirlenen kanat tasarımı yapılmıştır. Tasarımdan sonra kanat geometrisinde düzeltme yapılarak türbinin güç eğrisi ve güç kontrolü için kanat döndürme açıları tespit edilmiştir. Yeni tasarımın uç hız oranı 5 olacak şekilde çalıştırıldığında, olması gereken yeni rotor çapı ve güç eğrisi belirlenmiştir. Son çalışma şekliyle rotor çapının 37.5m'den 44.8m'ye çıkarılması gerektiğine karar verilmiştir. Bandırma'da pürüzlülük sınıfı 1 olan bölge için kapasite faktörünün %25.9'dan %31.8'e yükseldiği hesaplanmıştır (Emniyetli, 2007).

Yıldız Teknik Üniversitesinde yapılan çalışmada da NACA 4415 profili kullanılarak "SymLab" programı ile 21m uzunluğa sahip kanat tasarımı yapılmıştır. Hücüm açısı değişiminin türbinin güç faktörüne etkisi üzerinde durulan çalışmada uç hız oranı 8 olan üç kanatlı bir türbin tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan türbinin ortalama 7m/s rüzgâr hızına sahip Tekirdağ bölgesinde çalıştırıldığında 160kW güç üreteceği, aynı türbinin ortalama rüzgâr hızı 8.5m/s olan Osmaniye'de çalıştırıldığında ise 245kW güç üreteceği belirlenmiştir. Türbinin Osmaniye Sırtköy mevkiine kurulması halinde kendisini yaklaşık 6 yıl gibi bir sürede amorti edeceği hesaplanmıştır (Karadağ, 2009).

"Investigation Of AerodynamicEffects On Performance Of Wind TurbineBladesBy Using Finite Element Method" isimli çalışmada, aerodinamik etkileri göz önünde bulundurularak İYTE kampüs alanı için en uygun kanat profili tasarımını gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. "Fluent" isimli bilgisayar yazılımı ile çeşitli kanat profillerinin aerodinamik özellikleri incelenmiştir. Kampüs alanında 10m yükseklikte ölçülen ortalama rüzgâr hızları temel alınarak, kanat elemanımomentum teorisi (BEM) ile veter kalınlıkları ve burulma açıları hesaplanmış ve burulma açılarının uç hız oranına etkileri araştırılmıştır. Yeni

tasarım kanadın en yüksek güç faktörü $C_p=0.4313$, başka bir tasarımın da uç hız oranı $C_p=0.4044$ olarak bulunmuştur. Yeni kanat tasarımının 10m yükseklikte 6.85m/s rüzgâr hızı ve 25 °C sıcaklıkta en yüksek C_p değerine ulaştığı görülmüştür. 5.8m/s rüzgâr hızından sonraki değerlerde yeni yapılan kanat tasarımının, kullanılmakta olan tasarıma oranla daha yüksek çıkış gücüne ulaştığı gözlemlenmiştir (Tosun, 2005).

2.2.2 Generatör tasarımı çalışmaları

“Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri İçin Generatör Sistemleri” isimli çalışmada, rüzgâr türbinlerinde en çok kullanılan senkron, asenkron ve doğru akım generatörleri incelenmiştir. Rüzgârın sürekli olduğu bölgelerde büyük güçlü senkron generatörlerin, değişken olduğu bölgelerde ise asenkron ve doğru akım generatörlerinin kullanıldığı vurgulanmıştır. Çalışmada generatörler kısaca tanıtarak birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları açıklanmıştır (Uyar, et al., 2010).

“Doğrudan Tahrikli Rüzgâr Türbinleri İçin Enine – Eksenel Akıllı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör Tasarımı” isimli çalışmada, enine eksenel akıllı makine yapısını incelenerek özgün bir çift rotorlu yapı tasarımı yapılmıştır. Örnek olarak 500kW’lık bir makinenin manyetik devresini kurularak hava aralığı uzunlukları ve statorun doyuma girmemesi için en iyi ölçüler hesaplanmıştır. Ortaya atılan çift rotorlu yeni tasarım makinenin 3 boyutlu analizi için simülasyon yapılarak sonuçlar incelenmiştir. Yapılan hesaplamalar ile simülasyon sonuçlarının büyük oranda uyduğu ve manyetik doyuma gidilmediği gözlemlenmiştir (Ege, 2009).

“20kW Otonom Rüzgâr Türbininde Kullanılan Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörün Sonlu Eleman Yöntemi İle Optimizasyonu” isimli çalışmada, Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde kullanılan sürekli mıknatıslı senkron generatörün manyetik alan hesaplaması yapılmıştır. Generatör üretilmeden önce hava aralığı, oluk geometrisi ve çaprazlama açısı gibi parametreler üretimden önce optimize edilmiştir. Generatörün demir kayıpları da analiz sonuçlarına göre tahmin edilmiştir. Generatörün üretim sonrası yapılan

boşta çalışma deneylerinde ölçülen gerilim değerleri ile hesaplanan gerilim değerlerinin uyduğu gözlemlenmiştir (Göngör & Çetin, 2009).

“Elle Yapılabilir Küçük Güçlü Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Bir Rüzgâr Generatörü Uygulaması” isimli çalışmada kırsal bölgelerde kullanılabilecek küçük güçlü bir rüzgâr türbininde kullanmak amacıyla yapımı kolay bir generatör tasarımının imalatı açıklanmıştır. Sürekli mıknatıslı, eksenel akılı, statoru çekirdeksiz, çift rotorlu senkron generatörün sonlu elemanlar yöntemi ile modellemesi yapılmış ve elektromanyetik analizi gerçekleştirilmiştir. İmalat sonrası yapılan ölçümlerle analiz sonuçlarının uyduğu gözlemlenmiştir (Yıldırım & Aydemir, 2009).

2.2.3 Kontrol sistemi tasarımı çalışmaları

Rüzgârdan en yüksek verimle elektrik enerjisi alabilmek amacıyla rüzgâr türbinlerinde oldukça karmaşık kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Yüksek verim için türbinler hem mekanik hem de elektronik olarak kontrol edilmektedir. Temelde, türbin kontrol yöntemleri;

1. Rüzgâr yönüne göre türbin yönünün çevrilmesi
2. Rüzgâr hızına göre türbin dönüş hızının mekanik olarak frenlenmesi
3. Rüzgâr hızına göre kanat açısını çevirerek türbinin frenlenmesi
4. Çıkış yükünü ayarlayarak türbin devir sayısının ayarlanması

olarak sıralanabilir.

“Rüzgâr Türbinlerinde Kontrol Sistemleri Etüdü” isimli çalışmada, kontrol sistemlerinde uygulanan yaklaşımlar tanıtılarak birbirlerine göre farklılıkları açıklanmıştır. Kontrol yöntemleri, yönetsel ve dinamik kontrol sistemleri olarak ikiye ayrılarak incelenmiştir. Yönetsel kontrol sistemi olarak sistemdeki sensörlerden gelen verilere bağlı olarak kontrol komutları üreten elektronik devreler gösterilmiştir. Dinamik kontrol sistemi olarak da yönetsel kontrolden gelen verilere göre çalışmeme mekanik kısımlar vurgulanmıştır (Söylemez, 2005).

Orta Doğu Teknik Üniversitesi’nde yapılan bir çalışmada kendinden uyarımlı asenkron generatör için Matlab – Simulink ortamında kontrol blokları

oluşturulmuştur. Bir rüzgâr türbini tarafından sürülen asenkron generatörün sabit gerilim ve frekansta çalıştığı ve şebekeden bağımsız bir yükü beslediği düşünülmüştür. Oluşturulan kontrol blokları ile rüzgâr hızı ve/veya yükteki değişimler sebebiyle generatör çıkışındaki sabit gerilim ve sabit frekans üzerinde sapmalara sebep olmaması sağlanmaya çalışılmıştır. Simülasyonlarda sincap-kafesli asenkron generatör, frekans kontrolü için sabit kondansatör ile tristör kontrollü reaktör ve gerilim kontrolü için statora bağlı, anahtarlanabilen dirençler kullanılmıştır (Çalışkan, 2005).

Afyon Kocatepe Üniversitesi'nde yapılan “Değişken Hızlı – Değişken Kanat Açılı Rüzgâr Türbinlerinin Tork Ve Kanat Açısı Kontrolü” isimli çalışmada otonom bir rüzgâr türbininin kanat açısı ayarlanarak tork kontrolü yapılmıştır. Türbinde kanat açısı kontrolü için; Matlab – Simulink programı ile doyum sınırlarına sahip integratörlü kanat hareketmekanizması ve 3 eğim hız seviyeli kanat hareketmekanizması kullanılmıştır. Sonuçta; 3 eğim hız seviyeli kanat hareketmekanizmasının doyum sınırlarına sahip integratörlü kanat hareketmekanizmasına göre daha çok güç ürettiği görülmüştür (Fidan, 2010).

“Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Nonlinear Kontrolü” isimli çalışmada, Matlab programı ile bir rüzgâr türbinindekimekanik ve elektriksel dinamikler temel alınarak, genel backstepping ve adaptifbackstepping kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan kontrol sistemleri Matlab – Simulink programı ile test edilmiş ve adaptif kontrol tekniğinin daha düzgün çalışma şartları sağladığı ve daha yüksek çıkış gücü ürettiği gözlemlenmiştir (Köse, 2007).

2.2.4 Rüzgâr çiftliği tasarımı çalışmaları

“Muğla BölgesindeMermer Endüstrisinin Elektrik Enerji Talebini Karşılama İçin, Matlab Paket Programı İle Rüzgâr Çiftliği Tasarım Çalışması” ile Muğla ilinde bulunanmermer işletmelerinin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak amacıyla Datça – Reşadiye bölgesinde Matlab programı yardımıyla rüzgâr çiftliği tasarımı yapılmıştır. Tasarımda kullanılmak üzere Datça bölgesinin 2003 yılı rüzgâr verileri Elektrik İşleri Etüt İdaresinden satın alınmıştır. “Rüzgâr Çiftliği Tasarım Aracı” ismi verilen yazılımamermer işletmelerinin kurulu güç

kapasiteleri, Datça – Reşadiye bölgesinin topoğrafya bilgileri girilmiştir. 8 farklı türbin ve 4 farklı türbinmesafesi düşünülerek 32 farklı rüzgâr çiftliği için tasarım yapılmıştır. Tasarım sonucunda yıllık üretilen enerji, çiftliklerin kapasite faktörleri, gerekli arazi alanı, emisyon tasarrufları, yatırımmaliyetleri ve Datça bölgesinin rüzgâr analizleri gerçekleştirilmiştir (Ceylan, 2006).

Dokuz Eylül Üniversitesi’nde yapılan “Gökçeada’nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgâr Enerjisi İle Karşılanması” isimli çalışmada Gökçeada’nın elektrik enerjisi ihtiyacı ve bu ihtiyacı karşılamak için kurulması gereken türbin sayısı “De Wind” firmasının ürettiği türbinler karşılaştırılarak hesaplanmıştır. Tasarlanan santrallerin ürettikleri elektrik enerjisi miktarları, ihtiyacı karşılama oranları, kapasite faktörleri ve maliyet analizleri yapılarak geri ödeme süreleri bulunmuştur. Hesaplanan değerlere göre bölgeye kurulacak 10 adet De Wind 48 tipi rüzgâr türbininin bölge ihtiyacını karşılama oranı % 81.06, kapasite faktörü % 47.31, birim enerjimaliyeti 0.038 \$/kWh ve sistemin amortisman süresi 2.664 yıl olarak bulunmuştur (Şen, 2003).

Cumhuriyet Üniversitesi’nde yapılan bir çalışmada SivasMeraküm Tepe bölgesinin 2005 yılı rüzgâr verileri değerlendirilerek rüzgâr enerjisi potansiyel araştırması yapılmıştır. Bölgenin rüzgâr verilerine uygun olduğu düşünülen 2300kW ve 5kW çıkış güçlerinde iki farklı rüzgâr türbininin üreteceği elektrik enerjisinin birim fiyatı çıkarılmıştır. Enerji birim fiyatları; 2300kW’lık türbin için 16.06 €/kWh ve 5kW’lık türbin için 45.97 €/kWh olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre SivasMeraküm Tepe bölgesine kurulacak ticari amaçlı bir rüzgâr türbin sisteminin en iyi şartlar altında yatırımmaliyetini 20 yılda karşılayabileceği görülmüştür (Şimşek, 2007).

Karadeniz’e kıyısı olan yerlerde iyi bir rüzgâr potansiyeli olduğunu vurgulayan Özön ve Kılıçaslan tarafından Kocaeli bölgesinin enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla kurulabilecek rüzgâr çiftliği için uygun alanlar tespit edilmiştir. Çalışmada Devlet Meteoroloji İşleri ve Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü verilerine göre Marmara bölgesinin yıllık ortalama rüzgâr hızının 3m/s’nin üzerinde olduğu ve rüzgâr güç yoğunluğunun 51.91 W/m² olması sebebiyle rüzgâr santralleri için uygun olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca

İzmitmeteoroloji istasyonunun 2003 ve 2004 yıllarına ait rüzgâr verileri incelenerek aylık ortalama rüzgâr hızlarının 2.5m/s'nin altına inmediği görülmüştür. Bu duruma göre bölgede rüzgâr çiftliği kurulabilecek yerler; Kerpe, Cebeci, Kefken ve Kefken Adası olarak belirlenmiştir (Özön & Kılıçaslan, 2007).

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin güç sistemi üzerine etkilerini bir rüzgâr çiftliği üzerinden incelenen çalışmada, 12 adet yuvarlak rotorlu asenkron generatör kullanan rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin elektrikselmodelini oluşturulmuştur. Önce tek makine sistemimodellenmiş sonra tüm çiftlik ve sistemin bağlantı noktası itibariyle güç sistemimodellenerek analizler yapılmıştır. Sistemin bağlı bulunduğu trafo merkezinden yapılan ölçümler ve rüzgâr çiftliği işletmecileri tarafından yapılan rüzgâr hızı ölçüm sonuçlarımodellere girdi olarak kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçları kullanılarak örnek rüzgâr çiftliğinin elektrik güç sistemi ile karşılıklı etkileşimi incelenmiştir (Mutlu, 2009).

2.2.5 Türbin imalat çalışmaları

“Rüzgâr Enerjisi İle Elektrik Üretimi” isimli çalışmada, bir evin elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla 1kW güce sahip, sabitmıknatıslı bir türbin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Rotor çapı 2.4m ve uç hız oranı $\lambda=7$ olacak şekilde kanat tasarımı yapılmıştır. Sabitmıknatısliekksenel akı yollu 14 kutuplu generatör kanatlara doğrudan bağlanmıştır. Çıkışta elde edilen AC çıkış gerilimi doğrultulup DC gerilime çevrilerek kullanılmıştır. Türbin kurulan test düzeneği ile kontrol edilerek ölçüm sonuçları verilmiştir (Uğuz, 2005).

Gazi Üniversitesi'nde yapılan “Fırçasız DA Generatörü Kullanan Düşük Güçlü Bir Rüzgâr Türbininin Gerçekleştirilmesi” isimli çalışmada, kırsal kesimlerde kullanılmak üzere nüvesizstatorlueksenel akıllı süreklımıknatıslı bir rüzgâr türbini imalatı yapılmıştır. Düşük güçlü olarak tasarlanan rüzgâr türbininin sonlu elemanlar yöntemi kullanan “Ansoftmaxwell” isimli program yardımıyla 3 boyutlumodellemesi yapılarak sistem değişken rüzgâr hızları altında analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre 200 d/dk hızda doğrultucu çıkışı 26.5687 V olması gerektiği görülmüş ve sistemin aynı devirde çıkış gerilimi 26.6 V olarak ölçülmüştür (Yıldırım, 2008).

Celal Bayar Üniversitesi, Kırkağaç Meslek Yüksekokulu yerleşkesine şebekeden bağımsız, hub yüksekliği 15m olan, değişken devirli, 3kW'lık bir rüzgâr türbini kurulmuştur. Türbin çıkışı doğrultularak 2V-200Ah'lık 24 adet aküyü şarj edecek şekilde tasarlanmıştır. Akülerin çıkışı da 48 V_{DC} giriş ve bir fazlı 220V 50 Hz çıkışlı, 3kVA'lık tam sinüs inverttere bağlanmıştır. Sistemin enerji üretim hesabı için, kurulduğu yere yaklaşık 20km mesafede bulunan EİE rüzgâr gözlem istasyonu verileri dikkate alınmıştır. Ölçüm istasyonundan alınan veriler düzenlenerek yapılan hesaplamalarda sistemden elde edilebilecek yıllık toplam enerji 7926.86kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Kurulan sistemin en yüksek C_p değeri %42 olarak ölçülmüştür (Ata & Çetin, 2008).

Gaziantep Üniversitesi yerleşke alanı için de 20m hub yüksekliğine sahip 11kW çıkış gücünde yatay eksenli bir rüzgâr türbini tasarım ve imalat çalışması yapılmıştır. Sistemin kurulacağı alana 10, 20 ve 30m yüksekliklere anemometreler yerleştirilerek rüzgâr ölçümleri alınmaya başlanmıştır. Türbin hesapları yapılırken Gaziantep yöresinin ortalama rüzgâr hızı 7m/s olarak alınmış ve buna göre türbinin kanat uzunluğu 4m olarak hesaplanmıştır. Generatör devir sayısını ayarlamak için türbin mili üzerine yerleştirilen dişli sisteminin en uygun çevirme oranı olarak 21.6 değeri hesaplanmıştır. Sistemin kontrolünün PLC ile yapılmasına karar verilmiştir. Tasarım çalışmaları henüz sonuçlandırılmamıştır. Sistemin ön testlerinin başarılı olduğu bildirilmiştir (Karşı, 2011).

2.3 Rüzgâr Türbini Ölçüm Sistemi Tasarımı Çalışmaları

Literatürde, rüzgâr türbinleri ile ilgili çok sayıda modelleme, tasarım ve imalat çalışması olmasına rağmen türbin testi yapmaya yönelik az sayıda çalışmaya rastlanmıştır.

Rüzgâr türbinlerinin modelleyerek analiz etmek teorik olarak karakteristiklerini anlamaya yardım eder ama gerçekte türbinin karakteristiklerini görebilmek için bu türbini test edecek ve karakteristik çıkaracak sistemlere ihtiyaç vardır. Türbin testi yapmak için oluşturulmuş çeşitli düzenekler laboratuvar ortamında türbin testlerini yaparak karakteristiklerini çıkarabilmektedir.

“Test System of a Small Wind Turbine Under Laboratory Conditions” isimli çalışmada, “LabView” platformu kullanılarak küçük güçlü otonom rüzgâr türbinleri için, türbin çıkış gücü performansı ve titreşim testleri yapabilen bir sistem tasarlanmıştır. Test sisteminin simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçları karşılaştırılarak doğrulanmıştır (Jiang, et al., 2009).

“Flexible Development And Test System For 11kW Wind Turbine” isimli çalışmada, 11kW çıkış gücüne sahip bir rüzgâr enerjisi çevrim sistemini şebeke bağlantılı ve otonom çalışma şartları altında, farklı kontrol stratejileri ile test etmeye yönelik esnek bir geliştirme platformu “dSPACE” simülasyon nesneleri kullanılarak tasarlanmış ve “Simulink” programı altında çalıştırılmıştır. Yapılan simülasyon hazırlanan ölçüm sisteminden alınan sonuçlarla karşılaştırılarak test edilmiş ve başarılı olduğu görülmüştür (Teodorescu, et al., 2003).

Murdoch Üniversitesi’nde yapılan “Design And Construction Of A Simple Blade Pitch Measurement System For Small Wind Turbines” isimli çalışmada, “Research Institute Of Sustainable Energy (RISE)” tarafından geliştirilen “Blade Pitch Measurement System (BPMS)” isimli test düzeneği açıklanmıştır. Yapılan çalışmanın, küçük güçlü rüzgâr türbini üreten firmaların kendi ürettikleri türbinlerdeki kanat döndürmemekanizmalarını test edebilmeleri için yardımcı olması düşünülmüştür. 20kW ve 30kW güçlere sahip türbinler üzerinde yapılan alan testlerinde tasarlanan sistemin başarılı olduğu gözlenmiştir (Whale, 2009).

“PLC Based Test Platform For Wind Turbine Gearbox” isimli çalışmada, rüzgâr türbinlerinin en pahalı ve kurulumu, tamiri en zor olan dişli kutusunu test etmeye yönelik bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem aynı anda iki farklı vites kutusunu test edebilmektedir. Sistemin, vites kutularının çalışma şartlarını ve parametrelerini başarılı bir şekilde verebildiği görülmüştür (Xingyu, 2010).

“Design Of The DC/DC Converter For Aerodynamic Characteristics Testing Of Wind Turbine” isimli çalışmada, çıkış gerilimi 25 V olan ve akımı 0.5 A ile 100 A arasında değişebilen bir DC/DC konvertör tasarlanarak, çıkış gerilimi 25 V ile 300 V arasında değişebilen, sürekli mıknatıslı senkronjeneratöre sahip 2kW’lık bir rüzgâr türbini çıkışına bağlanmıştır. Rüzgâr türbininin. Konvertör

çıkışına da yük olarak aküler bağlanmıştır. Test sistemi; rüzgâr hızını, kanatlardan generatöre iletilen torku, devir sayısını ve konvertör çıkış akımını ölçerek rüzgâr türbininin C_p/λ eğrisini çıkarmaktadır (Chen, et al., 2009).

“Automatic Sytem For Wind Turbine Testing” isimli çalışmada, rüzgâr tünelineki bir düşey eksenli rüzgâr türbininin testini yapabilecek bilgisayar bağlantılı elektronik bir sistem gerçekleştirilmiştir. 4 kanatlı, 60 cm uzunluğunda NACA 0015 profile sahip düşey eksenli, doğru akım generatörlü bir türbin, 1 X 1m ölçülere sahip bir rüzgâr tüneline test edilmiştir. Rüzgâr tüneline 10m/s hızında sabit rüzgâr verilerek türbinin dönme hızı, ürettiği tork ve çıkış gerilimi ölçülmüştür. Türbin devrinin en çok 700 d/dk'ya kadar çıkmasına izin verilmiştir. Türbinin testi tamamen bilgisayar ile yapılmış ve test işlemi sırasında herhangi bir kullanıcı müdahalesi olmamıştır (Camporeale, et al., 2001).

Türkiye'deki türbin üreticilerinin hangisi modeli kullandıkları açıklanmamakta, bu sebeple hedeflenen üretim miktarı ile uygulamadaki üretim miktarının örtüşmeleri kontrol edilememektedir.

Laboratuvar ortamında yapılan test çalışmaları, kısa süreli ve önceden belirlenen kriterlere göre yapılmaktadır. Bu testler, rüzgâr tüneline bulunan bir türbine farklı rüzgâr hızları uygulanarak, çıkışına ya sabit bir yük ya da değişken bir yük bağlanarak türbin çıkışlarını ölçme temeline dayanır. Fakat gerçek meteorolojik şartlar ve sistem çıkışındaki yükler sürekli olarak değişmektedir. Bu da uzun dönemli ve gerçek koşullar altında test yapma zorunluluğunu beraberinde getirmektedir.

Bugüne kadar yapılan modeller genellikle laboratuvar ortamlarında olumlu sonuçlar vermiştir. Fakat bu algoritmaları doğrulamak için uzun dönemli alan testlerine duyulan ihtiyaç vurgulanmıştır (Wang, 2003).

Yapılan çalışmada, sahada üretim yapan bir rüzgâr türbini üzerine birçok sensör bağlanıp, uzun dönemli olarak, sensörlerden gelen veriler bilgisayar ortamına aktarılmış ve bu verilere göre türbinin gerçek karakteristikleri çıkarılmıştır.

Yurtdışında, İngiltere merkezli “Intertek” firması rüzgâr türbini testi yaparak sertifikalandırma işlemlerini yapmaktadır. İspanya’da “National Renewable Energy Centre - Wind Turbine Test Laboratory (LEA)” isimli kurum türbin testleri yapmaktadır. “Deutsches Windenergie-Institut” isimli kuruluş ise Almanya, İtalya, Fransa, İspanya, Çin, Brezilya ve Kanada gibi ülkelerde kurduğu laboratuvarlar ile rüzgâr türbini testleri yapmaktadır. Türkiye’de de “Türk Loydu Vakfı” 2008 yılından beri rüzgâr türbinleri sertifikalandırma işlemlerini yapmaktadır.

Sistemde kullanılan sensörler;

1. Tork ve devir sensörü (Döner tip tork ve devir sensörü DRBK)
2. Sıcaklık sensörü (LM35)
3. Gerilim sensörü (TV-111 0-220VAC)
4. Gerilim sensörü (TV-111 0-220VAC)
5. Gerilim sensörü (TV-111 0-220VAC)
6. Akım sensörü (ACS756 – 100A)
7. Akım sensörü (ACS756 – 100A)
8. Akım sensörü (ACS756 – 100A)
9. Gerilim sensörü (TV-111 0-220VAC)
10. Gerilim sensörü (TV-111 0-220VAC)
11. Gerilim sensörü (TV-111 0-220VAC)
12. Akım Sensörü (ACS756 – 100A)
13. Gerilim sensörü (0-65VDC)
14. Akım sensörü (ACS756 – 100A)
15. Yön sensörü (MRV50 manyetik yön enkoderi)
16. Rüzgâr hız sensörü (NRG #40C)
17. Rüzgâr yön sensörü (NRG #200P)
18. Sıcaklık sensörü (NRG #110S)
19. Basınç sensörü (NRG #BP20)
20. Nem sensörü (NRG RH5X)
21. Akım sensörü (ACS756 – 100A)
22. Gerilim sensörü (TV-111 0-220VAC)

Akü gerilimini ölçmek için kullanılacak gerilim sensörü yerine gerilim bölücü dirençler yardımıyla ölçülmek istenen gerilim 0 – 5 V aralığına düşürülerek ADC yardımıyla sayısal veriye çevrilip değeri okunmuştur.

Formül (1.7)'den bilindiği gibi rüzgârın gücü,

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

Formülü ile bulunur. Bu formülde;

P_r : Rüzgâr gücü (W)

ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

A : Rüzgâr alanı (m^2)

V : Rüzgârın hızıdır (m/s).

Hava yoğunluğu, 15° sıcaklıkta ve 1 atmosfer basınç altında 1,225 kg/m³
'tür. İdeal gaz kanunu;

$$P.V = n.R.T \quad (3.1)$$

P: mutlak basınç (atm)

V: Hacim (m³)

n: Kütle (mol)

R: Gaz sabiti (8,2056.10⁻⁵ m³.atm/ Kmol)

T: Sıcaklık (°K)

Bu formülde n yerine havanın moleküler ağırlığı olan 28,97 g/mol yazılacak olursa;

$$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{n (mol). 28,97 \left(\frac{g}{mol} \right). 10^{-3} (kg/g)}{V (m^3)} \quad (3.2)$$

Denklemleri elde edilir. Daha sade bir ifadeyle denklemi tekrar yazarsak;

$$\rho = \frac{P. 28,97. 10^{-3}}{R.T} \quad (3.3)$$

İfadesi elde edilir. Bu formüllere göre, havanın yoğunluğu, sıcaklık ve basınç değerlerinden hesaplanır.

Türbin mili üzerinde bulunan tork ve devir sensörü yardımı ile rüzgârdan elde edilen mekanik güç hesaplanır. Güç;

$$P = T\omega \quad (3.4)$$

P : Güç (Watt)

T : Tork (Nm)

ω : Açısal Hız (Radyan)

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30} \quad (3.5)$$

n : Devir sayısı (d/dk)

birimleri yerleştirdiğimizde;

$$P(Watt) = \frac{T (Newton \cdot metre) \cdot \pi \cdot n (\frac{devir}{dakika})}{30} \quad (3.6)$$

$$\frac{\pi}{30} = \frac{3.14}{30} \cong \frac{1}{9.554} \quad (3.7)$$

olarak bulunur. Bulduğumuz değeri formülde yerine koyduğumuzda değerlerin son hali;

$$Watt = \frac{Nm \cdot \frac{d}{dk}}{9.554} \quad (3.8)$$

Birim dönüşümleri sonunda, türbinmekanik gücü;

$$P_m = \frac{T \cdot n}{9.554} \quad (3.9)$$

Formülü ile bulunur.

P_m : Türbinmekanik gücü (W)

T : Tork (Nm)

n : Devir sayısı (d/dk)

Türbinin güç faktörü de;

$$C_p = \frac{P_m}{P_r} \quad (3.10)$$

Formülü ile hesaplanır. Yapılan ölçüm sistemi ile farklı rüzgâr hızlarında ölçülen devir sayıları ve tork değerlerine bağlı olarak türbinmekanik gücü

hesaplanır. Rüzgâr gücü hesaplandığı için rüzgâr hızına bağlı türbin güç faktörü grafiği çıkarılır.

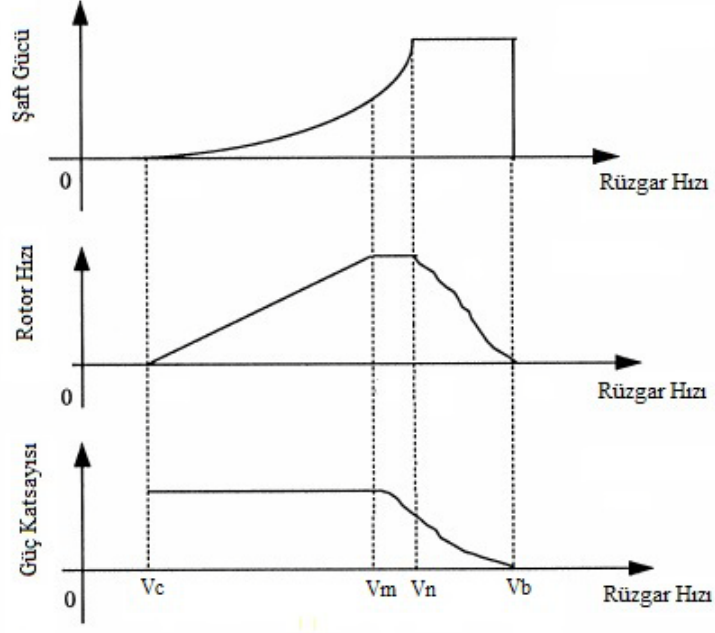
Türbin çıkışında 3 fazın gerilimleri ayrı ayrı ölçülmüştür. Aynı gerilimler, türbin kontrol odasında yeniden ölçülerek, aralarındaki farklardan, türbinde kullanılan fırça-kömür sistemi ve kabloların kayıpları hesaplanır. Ayrıca kontrol odasında bulunan 6, 7 ve 8 nolu sensörler aracılığıyla ölçülen akımlar ile türbin üzerinde bulunan 3, 4 ve 5 nolu sensörlerden okunan gerilim değerleri kullanılarak, generatör çıkışındaki elektrik gücü hesaplanır. Generatör girişine uygulanan mekanik güç hesaplandığı için generatör verimi hesaplanır. Bununla birlikte, 12 ve 13 nolu sensörler yardımıyla ölçülen akım ve gerilim değerlerinden şarj ünitesinin verimi de hesaplanabilir. 12 ve 14 nolu sensörler yardımıyla ölçülen akım değerinden de aküye giden ya da aküden çekilen akımlar hesaplanabilir. Akü gerilimi 13 nolu sensörle okunduğu için inverter giriş gücü hesaplanır. İnverter çıkışlarının ölçümü sonucunda da inverter verimi hesaplanır.

Tez çalışması 4 iş paketine bölünerek yürütülmüştür. Bunlar;

1. Simülasyon çalışması
2. Veri aktarma modüllerinin tasarımı ve uygulanması
3. Veri tabanı tasarımı ve veri alma programının yazılması
4. Karakteristik çıkarma programının yazılması şeklindedir.

3.1 Simülasyon Çalışması

Bir rüzgâr türbininin çalışması sırasında izlemesi istenen şaft gücü, rotor hızı ve güç faktörü tipik olarak Şekil 3.2'deki gibidir (Song, et al., 2000).



Şekil 3.2 Rüzgâr Hızına Bağlı Çalışma Parametreleri

Bu grafiklerdeki rüzgâr hızları;

V_c : Türbinin güç üretimine başladığı andaki rüzgâr hızı (Başlangıç rüzgâr hızı)

V_m : Rotor hızının, dizayn devirlik sayısına ulaştığı andaki rüzgâr hızı

V_n : Türbinin istenilen çıkış gücüne ulaştığı andaki rüzgâr hızı (Nominal rüzgâr hızı)

V_b : Türbinin, koruma amacıyla, elektrik üretiminin durdurulduğu andaki rüzgâr hızıdır. (Maksimum rüzgâr hızı)

Türbinden maksimum verim alabilmek için türbin 3 ayrı aralıkta farklı şekillerde çalıştırılmaktadır.

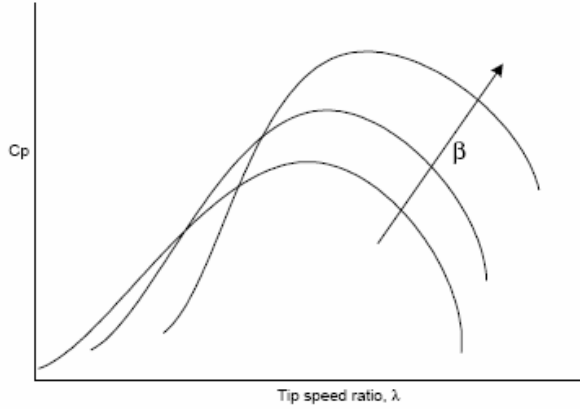
Değişken rotor hızı / değişken uç hız oranı ($V_c < V < V_m$)

Sabit rotor hızı / değişken uç hız oranı ($V_m < V < V_n$)

Değişken rotor hızı / sabit çıkış gücü ($V_n < V < V_b$)

3.1.1 Güç faktörünün hız oranına göre değişimi

Bir rüzgâr türbininin güç faktörü, kanatların dönme hızına bağlıdır. Kanatların dönmesi sırasında kanat uçlarındaki hızın rüzgâr hızına oranına uç hız oranı denir ve λ sembolü ile gösterilir. Uç hız oranı kanat pitch açısına ve kanat profiline bağlıdır. Kanat (pitch) açısı β sembolü ile gösterilir. Bir rüzgâr türbininin güç faktörünün uç hız oranı ve kanat açısına göre değişimi Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3 C_p 'nin, Uç Hız Oranı Ve Kanat (Pitch) Açısıyla Değişimi

$C_p(\lambda, \beta)$ eğrisi türbin imalatı sırasında belirlenir ve her bir uç hız oranı ve kanat açısı için güç faktörü hesaplanır. Hesaplanarak oluşturulan bu eğri türbini imal eden firma tarafından verilir. Eğer kanatların, açısal dönme hızı ve pitch açısı β biliniyorsa herhangi bir rüzgâr hızı V için türbinin mekanik çıkış gücü P_m türbin üreticisi tarafından verilen bu grafiğe bakılarak hesaplanabilir.

Bazen üreticiler $C_p(\lambda, \beta)$ eğrisini vermeyebilir ya da hesaplamayabilir. O zaman güç faktörü doğrudan hesaplanamaz. Bu durumda C_p 'nin tahmini aşağıdaki denklemle yapılabilir (Justus, 1978).

$$C_p = C_{pm} \left[1 - A \left(\frac{V_m}{V} - 1 \right)^2 - B \left(\frac{V_m}{V} - 1 \right)^3 \right] \quad (3.11) \quad V_c < V < V_n$$

$$C_p = C_{pr} = \left(\frac{V_r^3}{V^3} \right) \quad (3.12) \quad V_n < V < V_b$$

Burada;

C_p : Güç katsayısı (Güç faktörü)

C_{pm} : Dizayn (maksimum) güç faktörü

V : Rüzgâr hızı (m/s)

C_{pr} : Türbinin nominalrüzgâr hızındaki güç faktörü

A ve B değerleri V_c ve V_n sınır rüzgâr hızları için hesaplanabilir.

$$C_p(V_c) = 0 = C_{pm} \left[1 - A \left(\frac{V_m}{V_c} - 1 \right)^2 - B \left(\frac{V_m}{V_c} - 1 \right)^3 \right] \quad (3.13)$$

$$C_p(V_n) = C_{pr} = C_{pm} \left[1 - A \left(\frac{V_m}{V_n} - 1 \right)^2 - B \left(\frac{V_m}{V_n} - 1 \right)^3 \right] \quad (3.14)$$

Bu iki denklemin birarada çözülmesi ile A ve B değerlerini hesaplamak için aşağıdaki matrisler bulunur.

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\left(\frac{V_m}{V_c} \right) - 1 \right)^2 & \left(\left(\frac{V_m}{V_c} \right) - 1 \right)^3 \\ \left(\left(\frac{V_m}{V_n} \right) - 1 \right)^2 & \left(\left(\frac{V_m}{V_n} \right) - 1 \right)^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 - \frac{C_{pr}}{C_{pm}} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Yukarıda bulunan formül değerlerine göre, Matlab programı ile küçük güçlü bir rüzgâr türbininin karakteristikleri simüle edilmiştir. Küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde genellikle kanat açısı değişken olmadığı için simülasyonda 0 olarak kabul edilmiştir.

Simülasyon çalışması Matlab programı ile yapılmıştır. Matlab programı ile yapılan simülasyon programının kodları EK 1’de verilmiştir.

Tez çalışmasında simülasyon sonuçları ile türbinden ölçülen gerçek veriler aynı grafik üzerine yerleştirilmek istenmektedir. Bu sayede simülasyon sonuçları ile sistemden ölçülen veriler karşılaştırılacak ve sistemin sağlanması yapılabilecektir. Tasarlanan sistemde, aynı anda birçok sensörden veri okunması ve bu verilerin format ve birim dönüşümlerinin yapılması gerekmektedir. Matlab programı ile hem simülasyonu ekrana gösterip hem de aynı anda portlardan

verileri okuyup format ve birim dönüşümlerini yaptıktan sonra simülasyon sonuç grafiğine, ölçülen verileri eklemek ve bu işlemi birer saniye aralıklarla yapmaktümükün olmadığı için, Matlab programında yapılan simülasyon sonuçlarının aynısını veren ikinci bir simülasyon programı Delphi programlama dili ile yazılmıştır. Yazılan bu simülasyon programına “Türbin Simülatörü” adı verilmiştir. “Türbin Simülatörü” programının kodları EK 2’de verilmiştir.

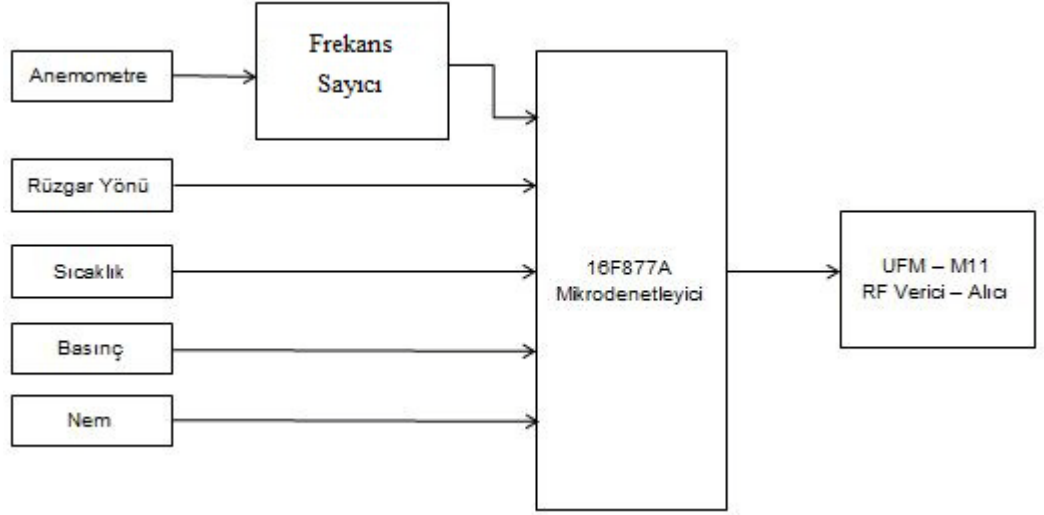
“Türbin Simülatörü” sadece türbin için girilen verilere göre simülasyon yapıp türbinin teorik olarak hesaplanan eğrilerini çıkarmaktadır. Sistemden okunan verileri simülasyon grafikleri üzerine aktarmak için bu programdan bağımsız bir karakteristik çıkarma programı hazırlanmıştır.

3.2 VeriAktarma Modüllerinin Tasarımı ve Uygulanması

Sistem karakteristiklerinin doğru çıkarılabilmesi için meteorolojik verilerin, türbin içindeki verilerin ve sistem kontrol odasındaki verilerin aynı anda okunması gereklidir. Tek bir devre ile tüm verileri aynı anda okuyup bilgisayara aktarmak ve bu aktarımı tek bir port üzerinden ve aynı saniye içerisinde yapmaktümükün değildir. Bu sebeple sistem 4 ayrı devre şeklinde tasarlanmıştır. İlk devre türbinin bulunduğu ortamın meteorolojik verilerini bilgisayara aktaran modüldür.

3.2.1 Meteorolojik verileri okuma modülü

Bu modülde rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, sıcaklık, basınç ve nem değerleri analog çıkışlı sensörlerden, 16F877A isimli PIC kullanılarak okunup sayısal veriye çevrilerek kodlanmış ve seri çıkış portundan bilgisayara gönderilmiştir.



Şekil 3.4 Meteorolojik Verileri Aktaran Devrenin Blok Şeması

Sensörler türbinin bulunduğu direktte olduğu için seri kablo yardımıyla bu verileri kontrol odasına taşımak yerine UDEA firmasından hazır olarak alınan RF verici/alıcı (UFMm11) ünite üzerinden kablosuz olarak kontrol odasına aktarılmıştır. Devrenin blok diyagramı Şekil 3.4’de verilmiştir. Bu devre 8 adet analog sensör girişi ve 1 adet düşük genlikli (0–1V) sinüs sinyal okuyacak şekilde tasarlanmıştır. Rüzgâr hız sensörünün çıkışı düşük genlikli sinüzoidal sinyaldir. Rüzgâr hızına bağlı olarak anemometrenin ürettiği sinyalin frekansı değişmektedir. Bu sebeple düşük genlikli sinüs sinyal girişine rüzgâr hız sensörü bağlanmış, 4 adet analog sinyal girişlerine de diğer meteorolojik ölçüm sensörleri bağlanmıştır. Kalan diğer 4 analog giriş de ileride olası başka sensörler bağlanabilecek şekilde boşta bırakılmıştır.

Anemometreden gelen sinüs sinyal Schmitt-Trigger devresi yardımıyla yükseltilerek kare dalgaya çevrilir. Bu kare dalga sinyalin frekansını ölçmek amacıyla 16F628 entegresi kullanılmıştır. Her bir saniyede 16F877’den üretilen kontrol sinyali ile 16F628’in okuduğu kare dalga frekans sayısı B Portuna iletilir ve içindeki sayaç sıfırlanarak tekrar kare dalga sinyal saymaya başlar. Bu şekilde anemometrenin her bir turu frekansa çevrilerek 16F877’ye iletilir.

Devrede kullanılan 16F877 entegresi 20mHz hızda çalışmaktadır. Tasarlanan sistemin verileri her bir saniyede düzenli ve eksiksiz okuması önemli olduğu için 16F877’nin kendi içindeki TIMER 0 zamanlama ünitesi aktif olarak kullanılmıştır. 16F877’de çalışan program sonsuz döngü şeklinde sürekli olarak

sensörlerin çıkışlarındaki analog verileri okumaktadır. Her bir saniyede önce 16F628'e kontrol sinyali göndererek okuduğu frekansı almaktadır ardından da o ana kadar okuduğu sensör verilerin her birinin kendi içinde ortalamalarını almakta ve entegrenin B0 ve B1 portlarına bağlı olan dip-switch'in durumunu da okumaktadır. Ayrıca geçen bir saniye içinde sensörleri kaç kez okuduğunu gösteren döngü değerini de alıp tüm verileri bir dizide saklamaktadır.

Veri okuyucu sistem kendi başına herhangi bir sinyal göndermez. Sistemin okuduğu verileri alabilmek için bilgisayardan gönderilen RF sinyal ile uyarılması gerekir. bilgisayardan gönderilen uyarı sinyali '\$RF0END' şeklinde ise sistem o ana kadar okuduğu tüm verileri silerek zamanlamayı yeniden başlatır. Bilgisayardan gönderilen sinyalin başında yer alan '\$RF' ve sonunda yer alan 'END' kodları değişmez. Ortasında gönderilen kod eğer 16F877'nin B0 ve B1'den okuduğu rakama eşit isemodül bir önceki saniyede okuyup kendi içindeki dizide sakladığı verileri RF sinyal ile bilgisayara gönderir.

Modülün gönderdiği sinyal '\$RF 1 814 429 849 395 0 0 0 0 41250END' şeklindedir. Bu sinyaldeki rakamlar dörder haneli olarak kodlanmışlardır. İlk 4 hane okuyucunun numarasını gösterir. Buradaki '1' rakamı okuyucununmeteorolojik verileri okuyan sensör olduğunu göstermektedir. Sonraki 8 adet rakam ise 16F877'nin analog portlarından okuduğu sinyallerdir. Onuncu rakam olan '4' rakamı anemometreden okunan frekansı gösterir. En sondaki rakam olan '1250' de bu saniye içerisinde analog sensörlerin 1250 kez okuduğunu gösterir.

Bumodülebağlananmeteorolojik sensörleri bağlamak için, türbinin bulunduğu direğe,metal profillerden oluşan bir platform tasarlanmıştır. Bu platformun tasarımı sırasında çekilen bir resmi Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5 Meteorolojik Sensörleri Bağlamak İçin Tasarlanan Platform

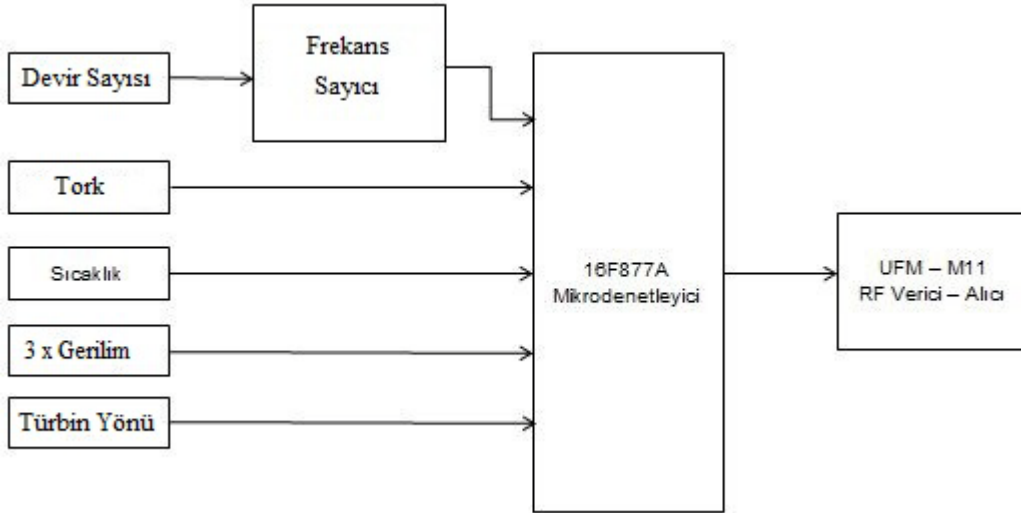
Tasarlanan platform türbinin bulunduğu direğe, anemometre türbinin 2 metre altına gelecek şekilde monte edilmiştir. Tasarlanan platformun montajdan sonraki resmi Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6 Meteorolojik Verileri Okuyan Platform

3.2.2 Türbin verilerini okuma modülü

Meteorolojik verileri okuma modülü üzerinde küçük değişiklikler yapılarak ikinci bir modül tasarlanmıştır. Bu modül de türbin içindeki sensörlerden toplanan verileri yine RF verici/alıcı ünite üzerinden bilgisayara aktarmaktadır. Bu devrenin blok şeması Şekil 3.7’de ve devrenin resmi de Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.7 Türbin İçinden Verileri Aktaran Modülün Blok Şeması



Şekil 3.8 Türbin İçinden Verileri Aktaran Modülün Resmi

Türbin torkunu ölçmek için kullanılan tork sensörü aynı zamanda devir sayısını da ölçmektedir. Kullanılan sensör her bir turda 60 puls üretmektedir. Türbin devir sayısının dakikada 400 devire kadar çıkabileceği düşünüldüğünden

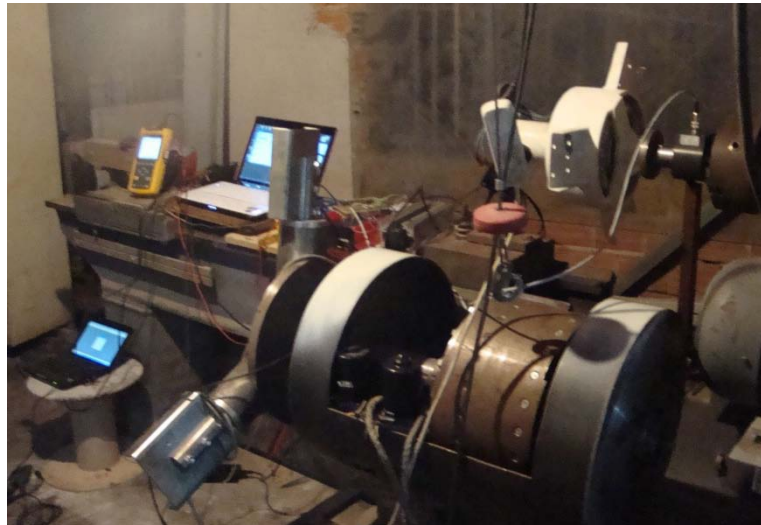
devrede frekans ölçmek için 16F628 entegresi kullanılamamaktadır. Bu sebeple devir sayısı ölçmek için 4040 sayıcı entegresi kullanılmıştır.

Generatör çıkışlarındaki gerilimleri okumak için TV-111 AC gerilim sensörleri kullanılmıştır. Generatör çıkışlarında 3 fazlı AC gerilim 3 kablo ile çıkmakta ve kontrol odasına bu şekilde iletilmektedir. Nötr sinyali olmadığı için fazların gerilimleri okunurken birbirlerine göre okuma işlemi yapılmıştır.

Türbinin rüzgâra göre sapma yönünü ölçmek için de Optronik Elektronik firmasının ürettiği MRV50model analog çıkışlımanyetik yön enkoderi kullanılmıştır. Türbinin gövdesi üzerinemonte edilen sensöre rüzgâr yön sensörlerinde olduğu gibi bir kuyrukmekanizması takılmıştır. Bu sayede rüzgâr türbinin yan veya arka tarafından geldiğinde sensör dönmekte ve çıkışında 0 – 5 V arasında sapma derecesine bağlı olarak bir gerilim okunmaktadır.

Rüzgâr türbinini direktten indirip tekrar yerinemonte etmek oldukça zahmetli bir işlem olduğu için türbin içine takılacak olan tüm sensörler yerine monte edilmeden önce test edilmiştir. Tezin önemli noktalarından birisi olan tork ölçümü için de ayrı bir düzenek tasarlanmış ve türbin indirildiğinde kanatlar ile generatör arasına tork sensörü bağlanarak generatör verimi ölçülmüştür.

Generatör verimi için kurulan düzenek Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9GeneratörVerimini Ölçme Düzeneği



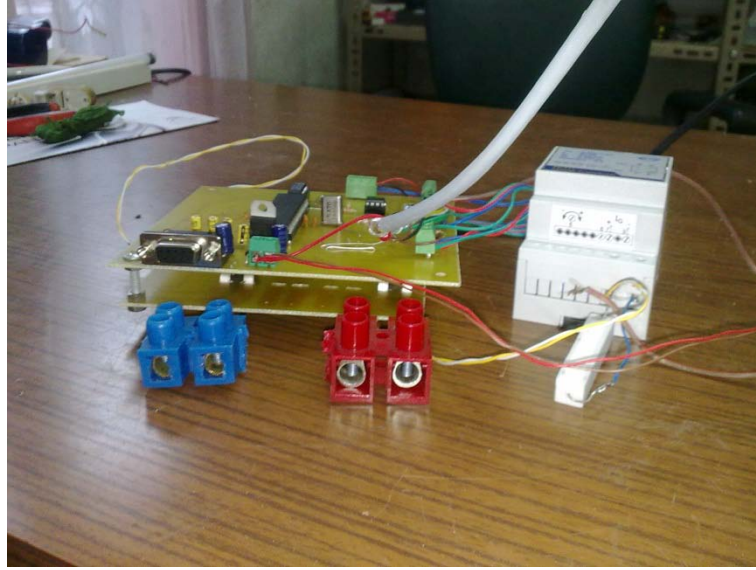
Şekil 3.10Tork Sensörü Bağlantısı

Kurulan düzenekte tork sensörü girişine 5kW'lık bir motor, çıkışına da türbinin generatör girişi bağlanmıştır (Şekil 3.10). Kontrollü olarak devri ayarlanan motor yardımıyla türbinin generatör kısmı döndürülmüş ve çıkış yükü de değiştirilerek generatör giriş ve çıkışlarından,

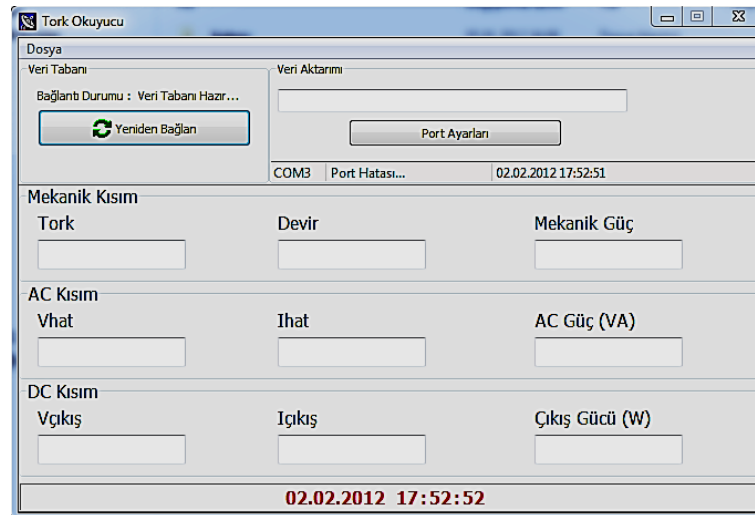
1. Giriş tork değeri
2. Devir sayısı
3. İki faz arasındaki AC gerilim farkı
4. Bir fazdan geçen AC akım
5. Doğrultma ünitesi çıkışındaki DC gerilim
6. Doğrultma ünitesi çıkışındaki DC akım

değerleri ölçülmüştür. Ölçülen değerlerden generatör verimi hesaplanmış ve aynı zamanda kullanılan sensörlerin kalibrasyonları yapılmıştır. Generatör verimini çıkarabilmek için tüm sensörleri aynı anda okuyup değerleri bilgisayarın seri portuna gönderen bir modül tasarlanmıştır (Şekil 3.11).modülden gelen verileri seri porttan alıp veri tabanına aktarmak ve güç hesaplamalarını yapmak amacıyla “Tork Okuyucu” adında bir bilgisayar programı yazılmıştır (Şekil 3.12).

Ölçülen tüm değerler birer saniyelik periyotlarla kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3.11 Generator Verim Ölçümü İçin Tasarlanan modül

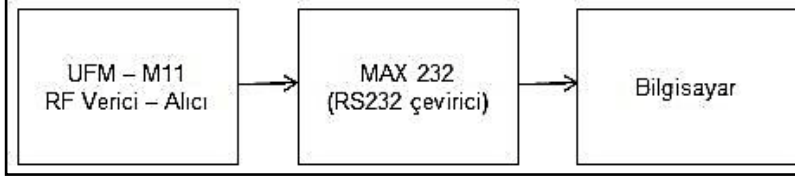


Şekil 3.12 “Tork Okuyucu” Programı

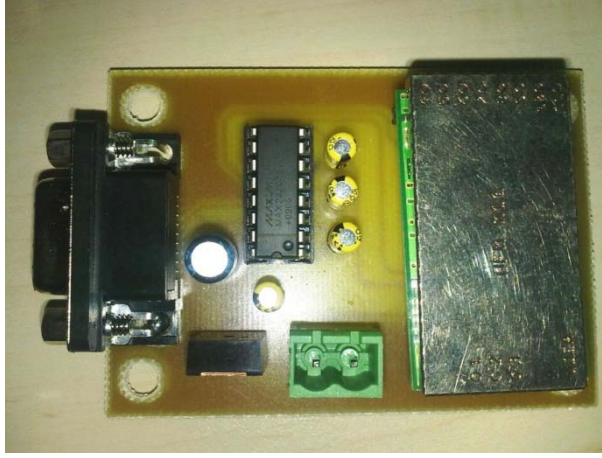
3.2.3 RF verileri okumamodülü

RF olarak verileri gönderen ikimodülün gönderdiği verileri alıp bilgisayarın seri portuna iletmek için de alıcı bir ünite tasarlanmıştır. Alıcı ünite, sistem ilk çalıştığında her iki verici ünitenin senkronizasyonunu sağlamak için reset sinyali gönderir. Bu sinyali alan veri aktarmamodülleri, kendi içlerindeki zamanlayıcıları sıfırlayarak 1saniye bekler ve tüm verileri tekrar okumaya başlar. Bu sayede tüm verilerin aynı anda okunmaya başlanması sağlanmış olur. Alıcı ünite veri aktarmamodüllerinden gelen sinyallerin karışmaması için veri aktarmamodüllerine veri göndermeleri için sıra ile kodlanmış olarakmodül numarasını gönderir.Modüller üzerindeki dip-switch yardımıyla,modüllere

numara verilir. Kendi numarasını alanmodül bir önceki saniyede okuduğu verileri alıcımodüle gönderir. Bu sayede türbin içindeki veriler vemeteorolojik veriler senkron bir şekilde okunmuş olur. Senkronizasyonu sağlayıp verileri alan alıcı ünitenin blok diyagramı Şekil 3.13’de vefotoğrafı Şekil 3.14’de verilmiştir.



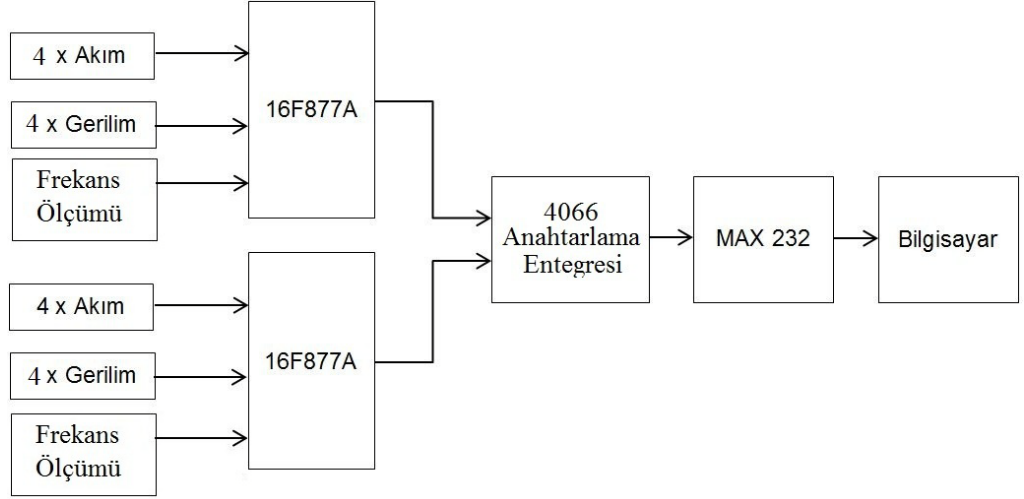
Şekil 3.13RF Alıcı Devre Blok Diyagramı



Şekil 3.14 RF Alıcı Devre

3.2.4 Kontrol odasındaki verileri okumamodülü

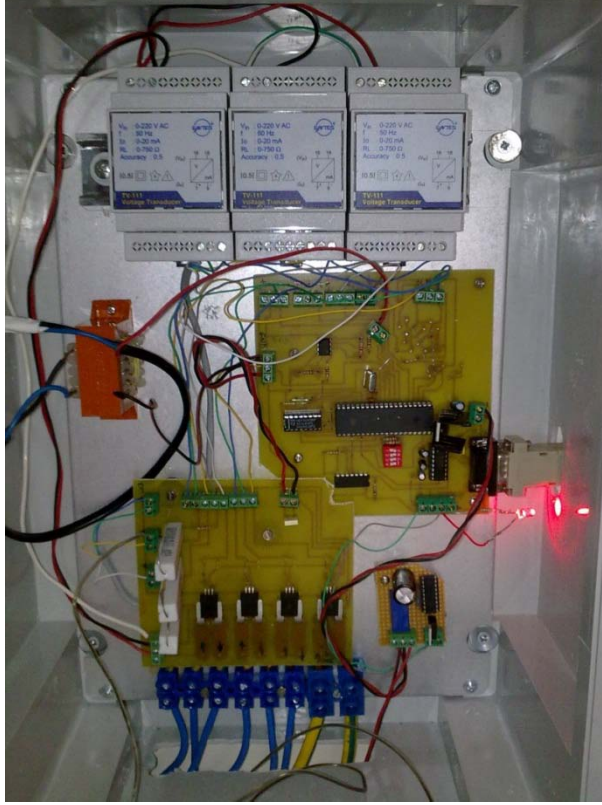
Şarj ünitesi, akü gurubu ve inverter verimini ölçmek için de ayrı bir devre tasarlanarak kontrol odasına yerleştirilmiştir. Bilgisayar da kontrol odasında bulunduğu için, bu devre verileri seri kablo üzerinden direk olarak bilgisayarın diğer bir seri portuna aktaracak şekilde tasarlanmıştır. Devrenin blok diyagramı Şekil 3.15’de verilmiştir.



Şekil 3.15 Kontrol Odasında Kullanılan Devrenin Blok Şeması

Bumodül iki ayrı karttan oluşacak şekilde tasarlanmıştır. İlkmodül türbinden gelen 3 fazlı gerilimin voltaj, akım ve frekans değerlerini okumaktadır. Şarj regülatörü çıkışındaki akım ve gerilim değerleri de bu kart üzerinden okunmaktadır. İkinci kartta ise inverter girişindeki akım ve gerilim ile inverter çıkışındaki akım ve gerilim ve frekans değerleri okunmaktadır. Bumodül tasarlanırken bilgisayarda fazladan seri port işgal etmek yerine tek bir seri porttan tüm değerlerin okunması amaçlanmıştır. Bu sayede her iki kartı ayrıca senkronize etmeye gerek kalmayacak ve bilgisayarda da fazladan bir seri port işgal edilmeyecektir.

Kontrol odasına kurulan veri okuma devresininmontaj sırasında çekilen bir resmi Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16 Kontrol Odasına Kurulan Veri Okuma Modülü

Tüm devrelerin senkronizasyonu ve okuduğu verilerin veri tabanına aktarılması için bilgisayarda “Veri Okuyucu” adında bir program yazılmıştır.

3.3 Veri Tabanı Tasarımı ve “Veri Okuyucu” Programının Yazılması

Hazırlanan veri okuma modülleri ile 1 saniyelik süre içerisinde 22 adet sensörden okunan veriler, 3 ayrı kanal üzerinden bilgisayara aktarılmıştır. Bu işlemde 2 kanal RF üzerinden 1 kanal da seri kablo üzerinden veri aktaracak şekilde tasarlanmıştır. Ölçümler ve aktarımlar sırasındaki senkronizasyon, tez için geliştirilen, “Veri Okuyucu” isimli bilgisayar programı ile sağlanmıştır. Program “Delphi” programlama dili ile yazılmıştır. Veri tabanı olarak da “MSSQL Server” kullanılmıştır. Programın ekran görüntüsü Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17"Veri Okuyucu" İsimli Programın Ekran Görüntüsü

Program çalışmaya başladığında, tüm okuyucu devrelerdeki senkronizasyonu sağlamak için, tüm okuyuculara aynı anda “reset” sinyali gönderir. Veri aktarmamodülleri aldıkları “reset” sinyali ile kendi içlerindeki tüm verileri sıfırlayarak sensörleri okumaya yeniden başlarlar. Her bir saniyede, okudukları verileri kendi içlerine kaydedip yeniden okumaya başlarlar. “Veri Okuyucu” isimli bilgisayar programı seri portlar üzerinden sırayla tüm okuyuculara kendi numaralarını göndererek, içlerinde kayıtlı olan, bir önceki saniyede okuyup sakladıkları verileri göndermelerini ister. Tümmodüller de sırayla bu verileri bilgisayara iletirler. Bu sayede sensörlerin aynı anda okunup tüm verilerin senkron bir şekilde bilgisayara aktarılması sağlanmış olur.

Seri portlardan gelen veriler “string” türünden, kodlanmış verilerdir. Zaman kaybı olmaması için RF alıcının bağlı olduğu porttan gelen veriler direk olarak veri tabanında “gelenstr” isimli tabloya (Şekil 3.18), kontrol odasındaki okuyucudan seri kablo aracılığıyla gelen veriler de “gelenstr2” isimli tabloya (Şekil 3.19) aktarılırlar. Tabloların yapısı birbirleri ile aynı olmakla beraber sadece isimleri farklıdır. Çünkü tüm veri okumamodüllerinden gelen veriler aynı uzunlukta ve aynı formatta “string” veridir.

ATEŞ-PC.ege - dbo.gelenstr			Object Explorer Details
	Column Name	Data Type	Allow Nulls
▶	id	bigint	☐
	veri	varchar(60)	☒
	zaman	datetime	☒
			☐

Şekil 3.18"gelenstr" Tablosunun Yapısı

ATEŞ-PC.ege - dbo.gelenstr2			Object Explorer Details
	Column Name	Data Type	Allow Nulls
▶	id	bigint	☐
	veri	varchar(60)	☒
	zaman	datetime	☒
			☐

Şekil 3.19"gelenstr2" Tablosunun Yapısı

Tabloların içindeki verilerden bir örnek de Şekil 3.20’de verilmiştir.

ATEŞ-PC.ege - dbo.gelenstr			Object Explorer Details
	id	veri	zaman
▶	1	\$RF 1 814 429 849 395 0 0 0 0 41250END	23.06.2011 14:12:24
	2	\$RF 1 774 430 849 395 0 0 0 0 41182END	23.06.2011 14:12:25
	3	\$RF 1 784 430 850 396 0 0 0 0 51182END	23.06.2011 14:12:26
	4	\$RF 1 801 430 850 397 0 0 0 0 41183END	23.06.2011 14:12:27
	5	\$RF 1 796 429 850 397 0 0 0 0 51182END	23.06.2011 14:12:28
	6	\$RF 1 827 430 850 397 0 0 0 0 31182END	23.06.2011 14:12:29
	7	\$RF 1 777 430 849 397 0 0 0 0 41183END	23.06.2011 14:12:30
	8	\$RF 1 778 430 850 397 0 0 0 0 41182END	23.06.2011 14:12:31
	9	\$RF 1 795 430 850 397 0 0 0 0 41182END	23.06.2011 14:12:32

Şekil 3.20"gelenstr" İsimli Tablodan Okunan Örnek Veriler

Gelen “string” türündeki verilerin, veri tabanı içine yazılan “trigger” programlar sayesinde, kodları çözülür. Elimizdeki verilerin ölçü birim dönüştürmeleri de veri tabanı içinde hazırlanan fonksiyonlar tarafından yapılır. Verileri listeleme işlemleri sırasında da hazırlanan “view”lar kullanılır. Verilerin dönüştürmeleri yapıldıktan sonra ekrana listelenen son hali Şekil 3.21’deki gibidir.

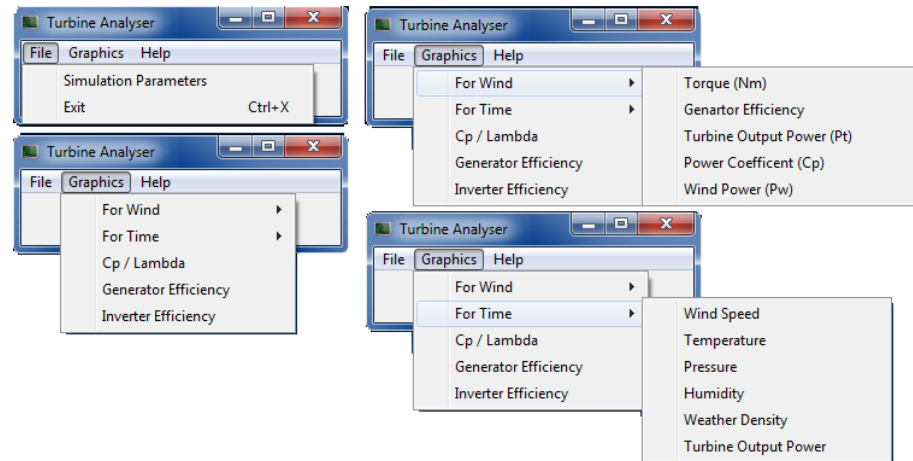
Results		Messages													
	zaman	yl	ay	gun	saat	dakika	saniye	ruzgarhizi	ruzgaryonu	sicakcelcius	sicakkel...	basinckpa	basincatm	baginlem	yogunluk
1	2011-06-23 14:12:24.000	2011	6	23	14	12	24	3,41	16	29,45	302,6	95,45	0.9420183	35,55	1.099078
2	2011-06-23 14:12:25.000	2011	6	23	14	12	25	3,41	15	29,72	302,87	95,45	0.9420183	35,55	1.098098
3	2011-06-23 14:12:26.000	2011	6	23	14	12	26	4,175	15	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,64	1.099249
4	2011-06-23 14:12:27.000	2011	6	23	14	12	27	3,41	16	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,73	1.099249
5	2011-06-23 14:12:28.000	2011	6	23	14	12	28	4,175	15	29,45	302,6	95,55	0.9430052	35,73	1.10023
6	2011-06-23 14:12:29.000	2011	6	23	14	12	29	2,645	16	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,73	1.099249
7	2011-06-23 14:12:30.000	2011	6	23	14	12	30	3,41	15	29,72	302,87	95,45	0.9420183	35,73	1.098098
8	2011-06-23 14:12:31.000	2011	6	23	14	12	31	3,41	15	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,73	1.099249
9	2011-06-23 14:12:32.000	2011	6	23	14	12	32	3,41	15	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,73	1.099249
10	2011-06-23 14:12:33.000	2011	6	23	14	12	33	3,41	15	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,73	1.099249
11	2011-06-23 14:12:34.000	2011	6	23	14	12	34	3,41	15	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,73	1.099249
12	2011-06-23 14:12:35.000	2011	6	23	14	12	35	4,175	15	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,73	1.099249
13	2011-06-23 14:12:36.000	2011	6	23	14	12	36	4,175	15	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,73	1.099249
14	2011-06-23 14:12:37.000	2011	6	23	14	12	37	4,175	15	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,73	1.099249
15	2011-06-23 14:12:38.000	2011	6	23	14	12	38	3,41	15	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,73	1.099249
16	2011-06-23 14:12:39.000	2011	6	23	14	12	39	3,41	15	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,73	1.099249
17	2011-06-23 14:12:40.000	2011	6	23	14	12	40	3,41	15	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,73	1.099249
18	2011-06-23 14:12:41.000	2011	6	23	14	12	41	3,41	15	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,73	1.099249
19	2011-06-23 14:12:42.000	2011	6	23	14	12	42	3,41	15	29,72	302,87	95,45	0.9420183	35,73	1.098098
20	2011-06-23 14:12:43.000	2011	6	23	14	12	43	2,645	15	29,45	302,6	95,55	0.9430052	35,73	1.10023
21	2011-06-23 14:12:44.000	2011	6	23	14	12	44	3,41	15	29,72	302,87	95,55	0.9430052	35,73	1.099249

Şekil 3.21Veri Tabanında Kayıtlı Verilerin Son Hali

Diğermodüllerden gelen veriler de “gelenstr” ve gelenstr2” isimli tablolara kaydedilerek yazılan trigger programlar, fonksiyonlar ve view’lar aracılığıyla uygun formatlara dönüştürülmüşlerdir.

3.4 Veri Analiz Programı

Simülasyon sonuçları ile türbinden ölçülen gerçek verileri aynı grafikler üzerinde görüntülemek amacıyla “Turbine Analyser” adında bir program Delphi programlama dili ile yazılmıştır. Bu programınmenüleriŞekil 3.22’de verilmiştir.



Şekil 3.22“Turbine Analyser” Programı Menüleri

Programın “File”menüsü altındaki “Simulation Parameters” kısmında test sisteminin bağlı olduğu türbine ait parametreler girilmekte ve türbinin ideal şartlar altında olması gereken çıkış değerleri hesaplanmaktadır.

“Graphics” menüsü altında bulunan “For Wind” altmenüsü yardımıyla, rüzgâr hızına bağlı, türbin çıkış gücü, güç faktörü ve rüzgâr gücü değerleri, veri okuyucumodüller yardımıyla ölçülen değerler üzerinden hesaplanarak çıkarılmakta ve grafiğe işlenmektedir. Bu grafiklerin üzerine simülasyonda hesaplanan grafikler de işlenerek, ölçülen değerler ile simülasyon değerleri karşılaştırılmaktadır.

“For Time” altmenüsü yardımıyla ölçüm sistemleri tarafından bilgisayara aktarılan verilerin, seçilen aralıktaki değişimleri grafik üzerinden izlenebilmektedir.

“Cp / Lambdaaltmenüsü yardımıyla da türbinin C_p/λ eğrisi çıkarılmaktadır. Bu grafiğin üzerine simülasyonda hesaplanan değerler de işlenerek ölçülen değerler ile karşılaştırılması yapılmaktadır.

4 BULGULAR

4.1 Simülasyon Sonuçları

Tezde kullanılan, türbinin parametreleri;

P_m : 5000 W (Türbin mekanik gücü)

R : 2m (Rotor yarıçapı)

ρ : 1.225 kg/m³ (Hava yoğunluğu)

V_c : 2.75m/s (Başlangıç rüzgâr hızı)

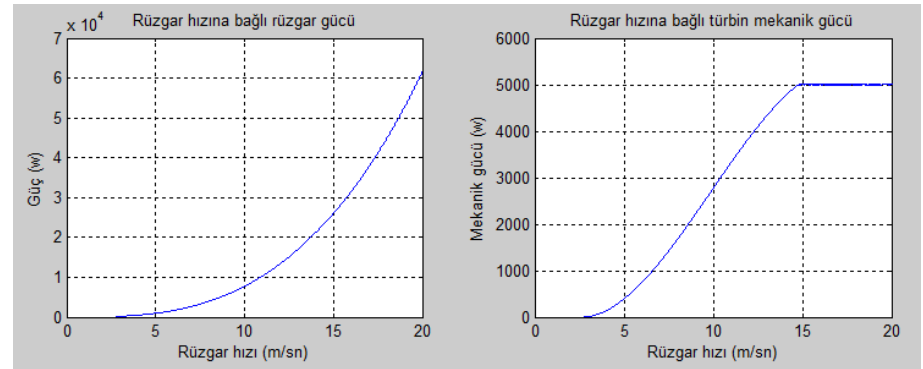
V_n : 14.8m/s (Nominal güçteki rüzgâr hızı)

V_b : 20m/s (Türbinin durdurulduğu rüzgâr hızı)

n : 225 d/dk (Türbinin devir sayısı)

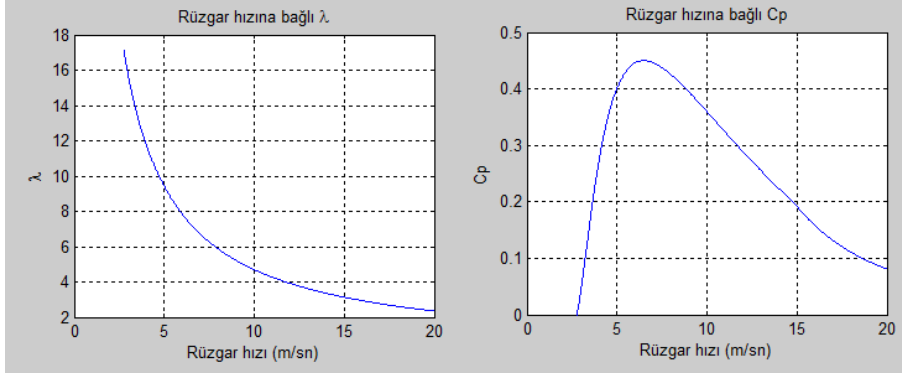
C_{pm} : 0.45 (Maksimum C_p değeri) olarak alınmıştır.

Bu değerlere göre “Matlab” paket programı ile yapılan simülasyonda elde edilen rüzgâr hızına bağlı rüzgâr gücü ve türbin çıkış gücü grafikleri Şekil 4.1’de verilmiştir.

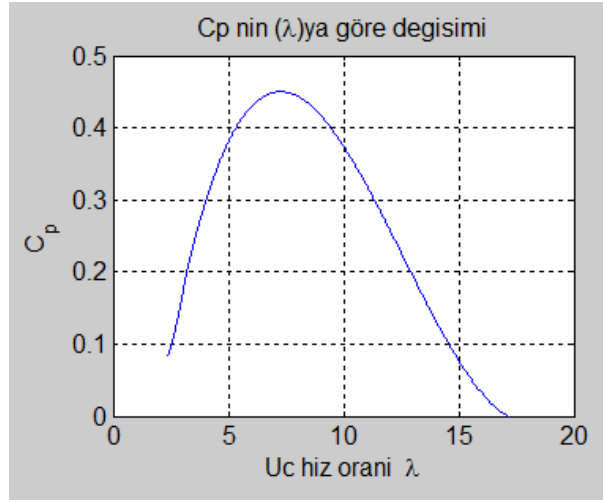


Şekil 4.1 Rüzgâr Gücü ve Türbin Çıkış Gücü Grafikleri

C_p ve λ 'nın rüzgâr hızına göre değişimleri de Şekil 4.2’de görülmektedir.

Şekil 4.2 Rüzgâr Hızına Bağlı λ ve C_p Grafikleri

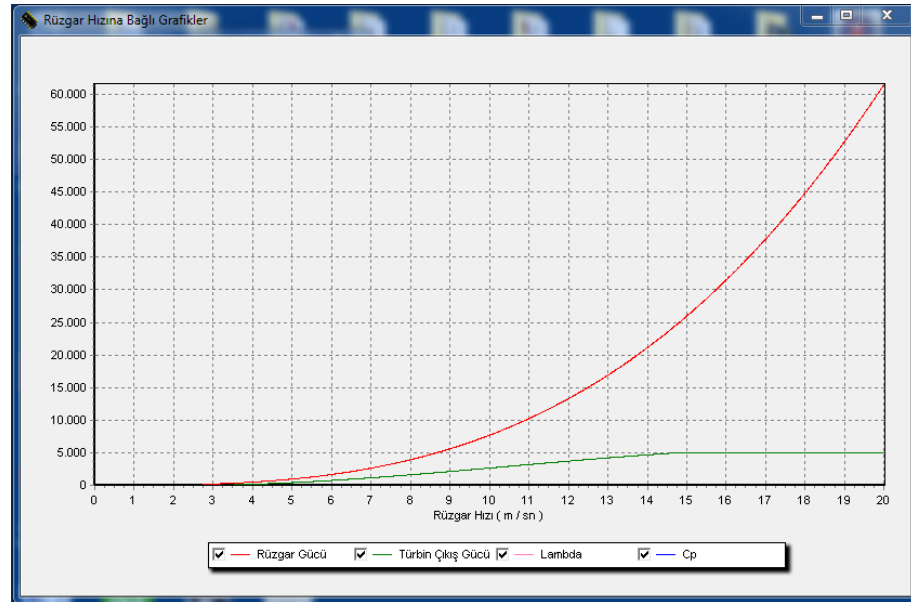
Güç faktörü C_p 'nin, uç hız oranı λ 'ya göre değişim grafiği de Şekil 4.3'te verilmiştir.

Şekil 4.3 $C_p - \lambda$ Grafiği

Tez çalışmasında, simülasyonda elde edilen grafiklerin üzerine sensörlerden okunan gerçek zamanlı değerlerin de işlenmesi gerekmektedir. Matlab programı ile bunu yapmaktamümkündür. Fakat 22 sensörden aynı anda verilerin okunması, simülasyonun yapılması ve okunan değerlerin aynı grafiklere işlenmesi 1 saniyelik süre içerisinde yapılamamaktadır. Bu durumda grafikleri ayrı bir programla birleştirmek gerekmektedir. Bu sebeple, Delphi programlama dili kullanılarak “Türbin Simülatörü” adı verilen yeni bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılımda yapılan simülasyonun sonuçları “Matlab” ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçların aynı olduğu görülmüştür.

Türbin Simülatörü programının giriş ekran görüntüsü Şekil 4.4'te verilmiştir.

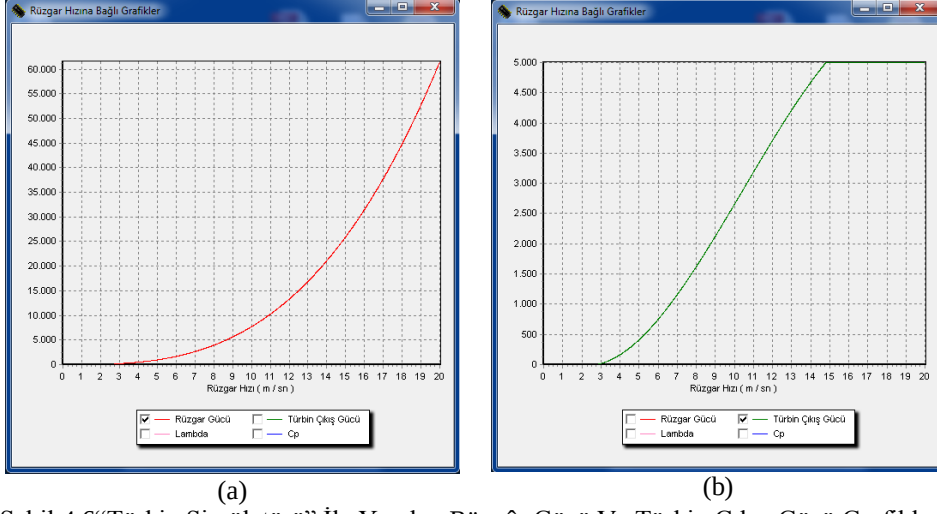
Şekil 4.4 "Türbin Simülâtörü" Programının Giriş Ekranı



Şekil 4.5 "Türbin Simülâtörü" Programı Ekran Görüntüleri

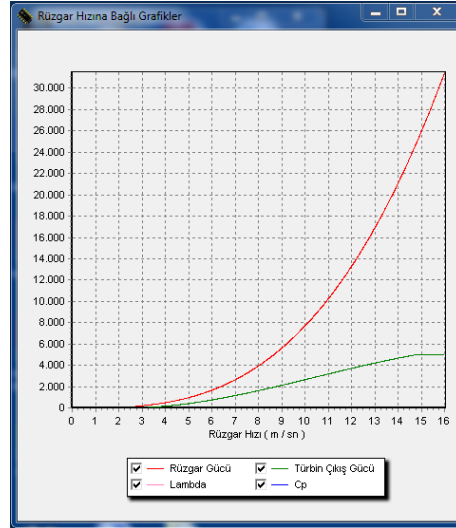
Programda, giriş ekranında değerler istenildiği şekilde girilerek hesapla butonuna basıldığında, türbinin simülasyon değerleri hesaplanmaktadır. "Rüzgâra Bağlı Grafikleri Göster" butonuna basılarak, türbin için rüzgâra bağlı grafikler ekrana getirilir (Şekil 4.5). Bu ekranda rüzgâr gücü, türbin çıkış gücü, uç hız oranı (λ) ve C_p faktörü (C_p) eğrileri ekrana getirilir. Grafiğin lejant kısmındaki işaretleme butonlarına basılarak birkaç grafik aynı anda ekranda görüntülenebileceği gibi sadece bir tane işaretleme butonuna basılarak tek bir grafik te detaylı incelenebilmektedir. Ayrıca grafik üzerinde fare yardımıyla seçilen kısım büyütülebilmektedir.

Türbin Simülâtörü programı ile yapılan simülasyonda elde edilen rüzgâr gücü ve türbin çıkış gücü grafikleri ayrı ayrı olarak Şekil 4.6’da verilmiştir.



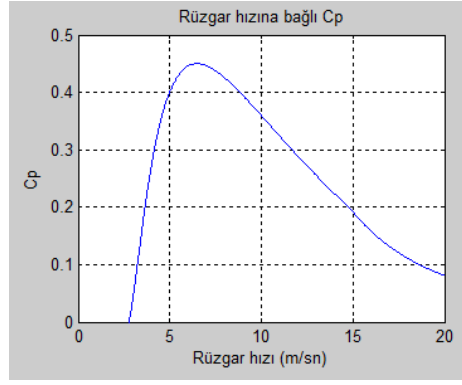
Şekil 4.6“Türbin Simülâtörü” İle Yapılan Rüzgâr Gücü Ve Türbin Çıkış Gücü Grafikleri

Türbin Simülâtörü programında aynı grafik üzerinde birden çok eğri de izlenebilmektedir. Örnek olarak rüzgâr gücü ve türbin çıkış gücünün birlikte görüldüğü grafik Şekil 4.7’de verilmiştir.

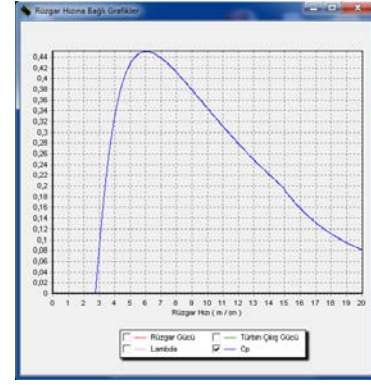


Şekil 4.7Rüzgâr Gücü Ve Türbin Çıkış Gücünün Çakıştırılarak Görüntülenmesi

Türbin Simülâtörü programında elde edilen grafikler ile Matlab programında elde edilen grafikler yan yana konarak incelendiğinde aralarında fark olmadığı görülmüştür (Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10).

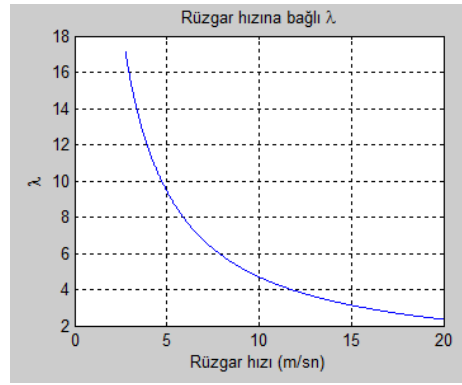


(a)

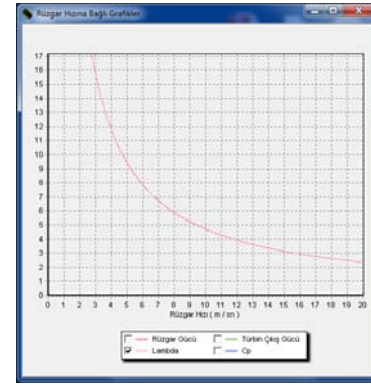


(b)

Şekil 4.8 Rüzgâr Hızına Bağlı Cp Grafikleri

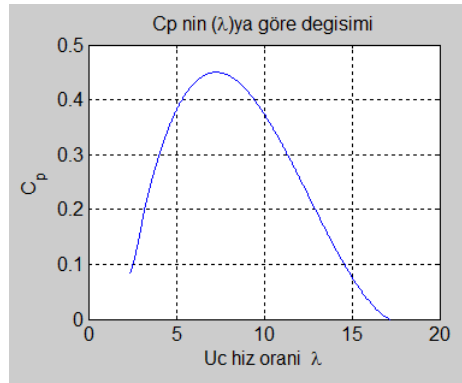


(a)

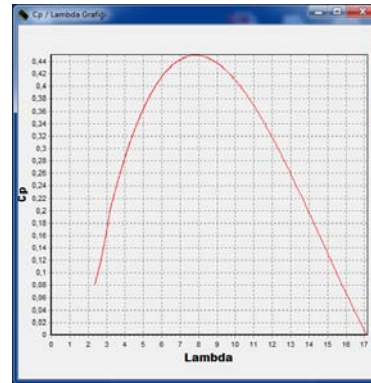


(b)

Şekil 4.9 Rüzgâr Hızına Bağlı λ Grafikleri



(a)



(b)

Şekil 4.10 $C_p - \lambda$ Grafikleri

4.2 Deneyisel Bulgular

Enstitü bahçesinde bulunan türbine ait veriler, 01.07.2011 tarihi itibarıyla ölçülmeye ve kayıt altına alınmaya başlanmıştır. Planlandığı gibi birer saniyelik aralıklarla yapılan ölçümlerin sonuçları, tez ekibi tarafından yazılan, “Turbine Analyser” isimli programla değerlendirilmiştir. Programda ilk olarak türbinin

parametreleri girilerek simülasyonu yapılır. Simülasyon sonuçları veri tabanında saklandığı için sistem parametreleri değişmediği sürece simülasyonu tekrarlamaya ihtiyaç yoktur. programın simülasyon parametreleri giriş ekranı görüntüsü Şekil 4.11’de verilmiştir.

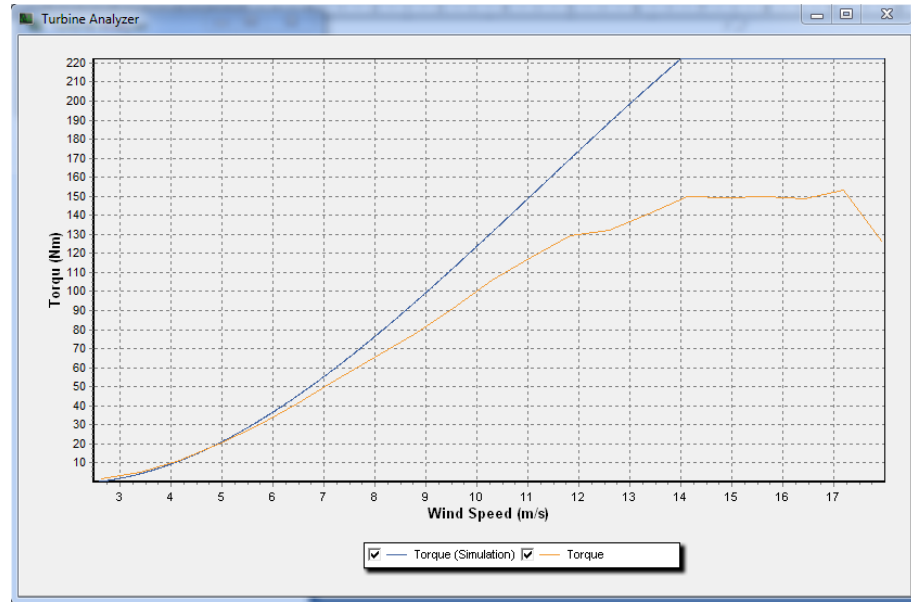
Simülasyon parametreleri girildikten sonra “Re-Calculate” butonuna basılarak yeni girilen parametrelere göre sonuçlar hesaplanır. Sonuçlar veri tabanında saklanır ve ekranda görüntülenmez. Ancak türbinden ölçülen veriler ekrana görüntülenirken aynı grafik üzerine simülasyon sonuçları da işlenerek karşılaştırmaları yapılabilir.

Parameter	Value
Pt (Turbine power W)	5000
Vcut-in (m/s)	2,75
r (Rotor radius m)	2
Vnominal (m/s)	14,8
Rho	1,225
Vcut-out (m/s)	20
n (Rpm)	225
Vm (Speed on Cpmax)	6,5
Cpmax	0,45

Re-Calculate

Şekil 4.11 Simülasyon Parametreleri Giriş Ekranı

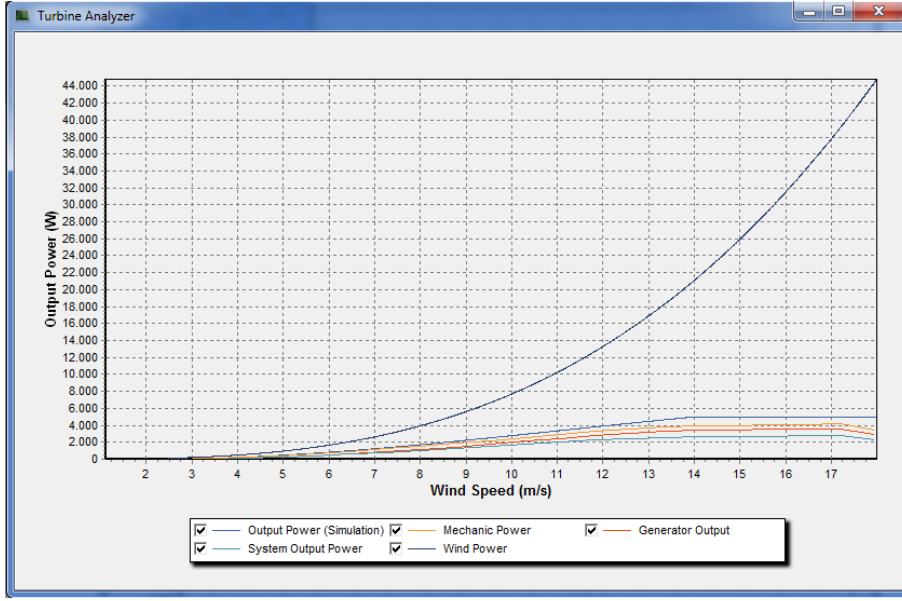
Türbin mili üzerine takılan tork sensörü aracılığıyla, türbinin üretmiş olduğu mekanik tork değerleri ölçülmüştür. Ölçülen tork değerleri rüzgâr hızına göre gruplanıp ortalamaları alınarak rüzgâr hızına bağlı tork değerleri grafik haline getirilmiştir. Aynı grafik üzerine simülasyonla hesaplanan tork değerleri de eklenerek verilmiştir (Şekil 4.12). Rüzgâr hızına göre ortalama alınarak yapılan hesaplamalarda ortalaması en yüksek olan tork değeri 14,82m/s rüzgâr hızında 151.8Nm’dir.



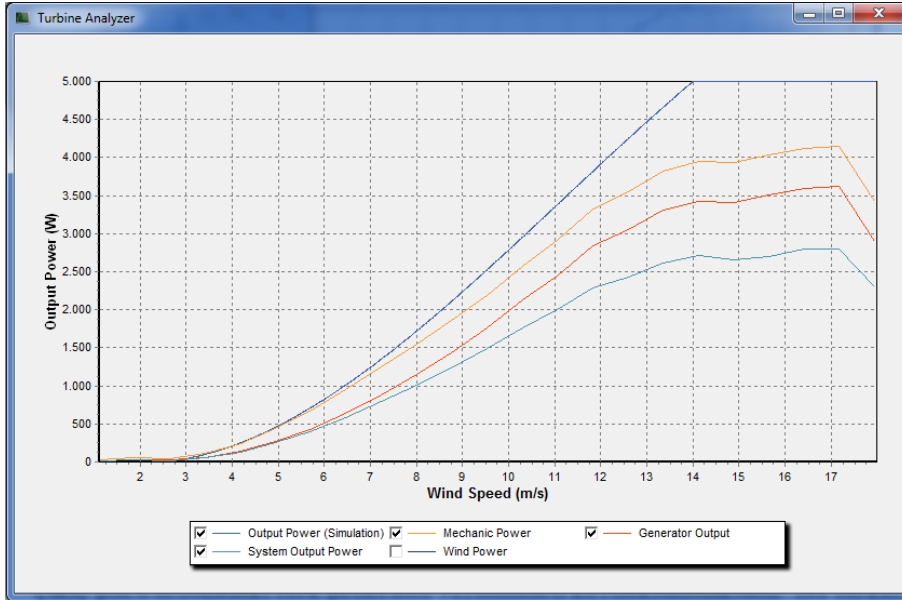
Şekil 4.12 Rüzgâr Hızına Bağlı Tork Grafiği

Ölçülen tork değerleri üzerinden türbinin rüzgâr hızına bağlı mekanik güç değerleri hesaplanmıştır. Generatör çıkışlarındaki 3 fazın gerilimi türbin kabini içine konan gerilim sensörleri ve kontrol odasına konan gerilim sensörleri üzerinden ölçülmüştür. Aynı zamanda kontrol odasına konan akım sensörleri ile de generatör çıkış akımları ölçüldüğü için generatör çıkış gücü ve kontrol odasına iletilen güç değerleri hesaplanarak aynı grafik üzerinde görüntülenmiştir. Grafiklere rüzgâr gücü de eklenerek Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te verilmiştir.

Şekil 4.14'te generatör çıkış gücü ile kontrol odasında ölçülen, sistem çıkış gücü arasındaki fark, türbin çıkışından akülere kadar olan fırça-bilezik sisteminin, yaklaşık 80m olan enerji iletim hattının ve doğrultma - akü şarj sisteminin kayıplarının toplamından kaynaklanmaktadır.

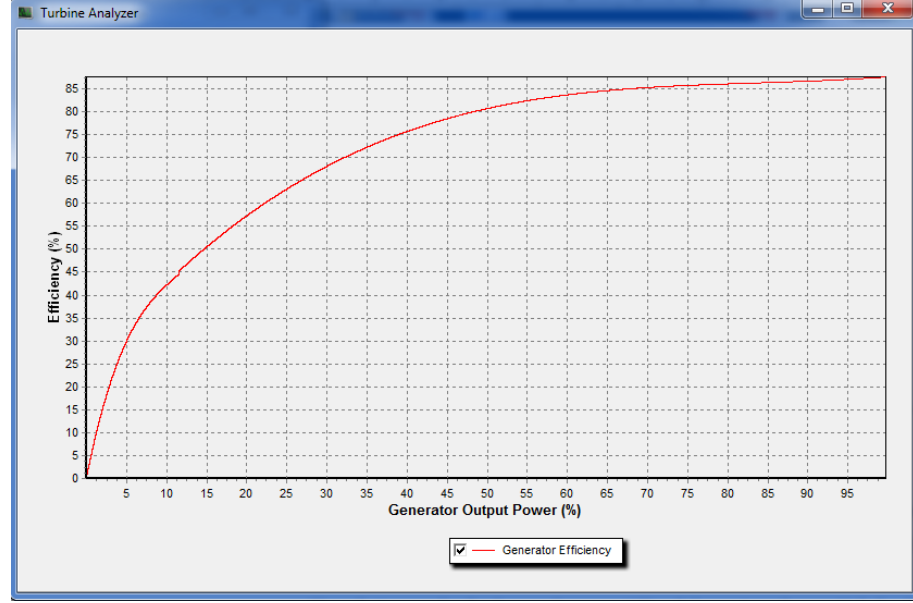


Şekil 4.13Rüzgâr Hızına Bağlı Rüzgâr Gücü Ve Türbin Çıkış Gücü Grafiği



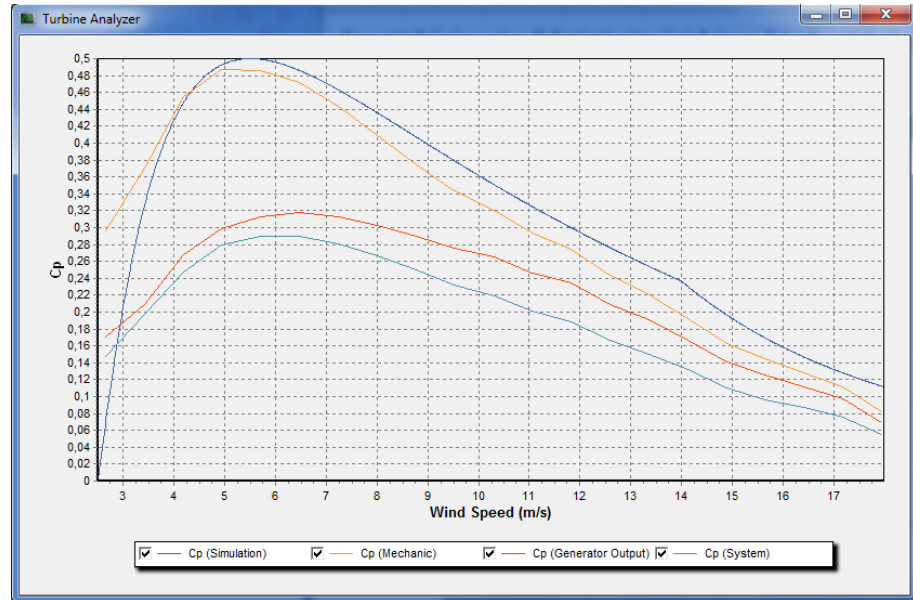
Şekil 4.14Rüzgar Hızına Bağlı Türbin Çıkış Gücü Grafiği

Rüzgâr hızına bağlı türbin çıkış gücü grafiğinde, mekanik güç ve generatör çıkış gücü arasındaki fark generatör veriminden kaynaklanmaktadır. Bu farkın çok yüksek olmaması Ege Üniversitesi bünyesinde 08-GEE-02 kodlu BAP projesi ile modernizasyonu yapılan rüzgâr türbini generatörünün veriminin yüksek olduğunu göstermektedir. Generatör verimini daha iyi analiz etmek için generatör çıkış gücüne bağlı generatör verim grafiği oluşturulmuştur (Şekil 4.15).



Şekil 4.15Çıkış Gücüne Bağlı Generatör Verimi

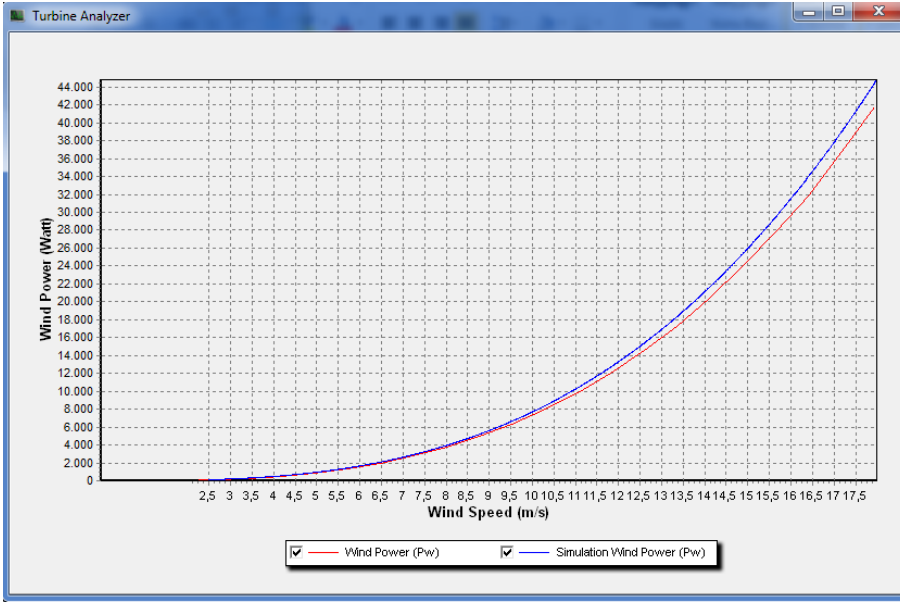
Tez bünyesinde hazırlanan “Turbine Analyser” isimli program aracılığıyla rüzgâr türbin sisteminin rüzgâr hızına bağlı güç faktörü (C_p) grafikleri çıkarılmıştır. Şekil 4.16’da verilen grafikler incelendiğinde türbin kanatlarının vemekanik kısımlarının güç faktörünü gösteren $C_{p(Mechanic)}$ eğrisinin tepe noktası 0.39’dur. Bu C_p değeri de türbinin güç faktörünün iyi bir noktada olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.16Rüzgâr Hızına Bağlı Türbin Güç Faktörü Grafiği

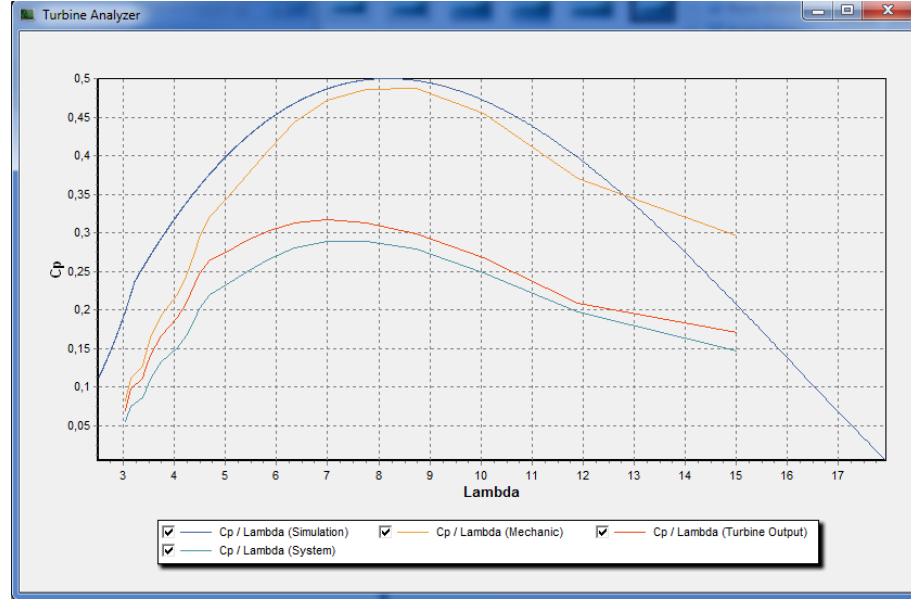
“Turbine Analyser” programındasimülasyonla hesaplanan rüzgâr gücü ile ölçülen rüzgâr gücü karşılaştırılmıştır. Simülasyon için hesaplanan rüzgâr gücü ile

ölçülen rüzgâr gücü arasındaki küçük fark, simülasyonda hava yoğunluğunun sabit (1.225kg/m^3) alınması sebebiyledir (Şekil 4.17). Tasarlanan ölçüm sistemi ile Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü bahçesinde parametreleri ölçülerek hesaplanan en yüksek hava yoğunluğu 18.01.2012 tarihinde saat 08:30 civarlarında 1.229kg/m^3 olarak belirlenmiştir. En düşük hava yoğunluğu da 20.07.2011 tarihinde saat 16:35 civarlarında 1.060kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Yapılan 15.000.000'dan fazla saniyelik ölçüm içerisinde hava yoğunluğunun sabit kabul edilen 1.225kg/m^3 değerine eşit ya da üzerinde olduğu süre 26,652 saniyedir. Diğer tüm ölçümlerde hava yoğunluğu 1.225kg/m^3 değerinin altındadır. Bu da hava yoğunluğu sabit kabul edilerek yapılan hesaplamaların türbin güç faktörü hesabında sapmalara neden olduğunu göstermektedir.

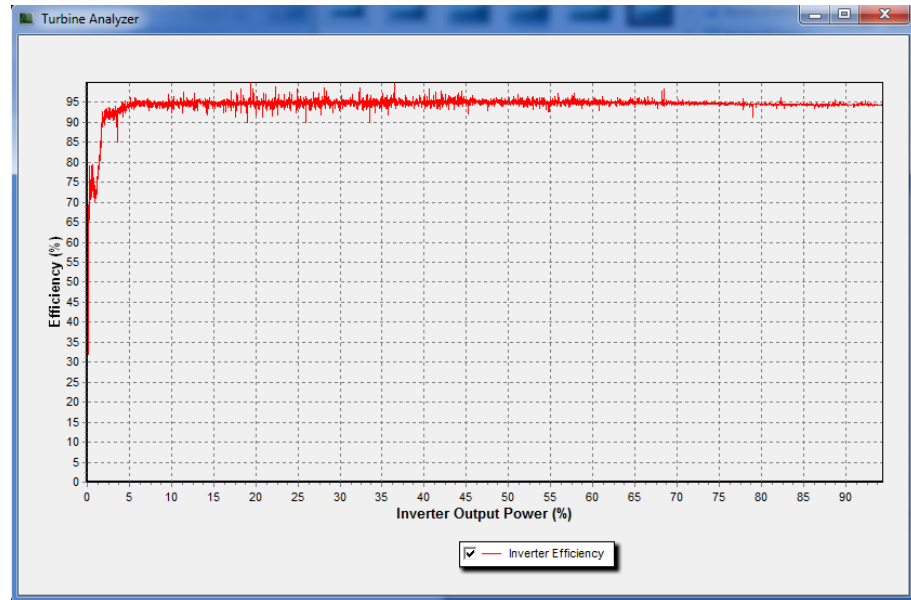


Şekil 4.17 Rüzgâr Gücü Grafiği

Yapılan ölçümlerden yararlanılarak çıkarılan C_p/λ grafiği Şekil 4.18'de verilmiştir. Grafiklerde mekanik C_p/λ eğrisinin tepe noktası λ 'nın 7.41 olduğu andadır. Fakat türbin generatör çıkışından hesaplanan C_p/λ eğrisinin tepe noktası ise λ 'nın 7.23 olduğu andadır. İki eğri arasındaki tepe noktalarının yatay ekseninde (λ) kaymasının sebebi generatör veriminin sabit olmayıp, devir sayısına ve yüke göre değişim göstermesidir.

Şekil 4.18 C_p / λ Grafiği

Tez bünyesinde geliştirilen ölçüm sistemi aracılığıyla, kontrol odasında bulunan ve akülerde depolanan elektrik enerjisini tek fazlı 220V AC gerilime çeviren tam sinüs inverterin çıkış gücüne bağlı verim grafiği Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19 Çıkış Gücüne Bağlı İnverter Verimi

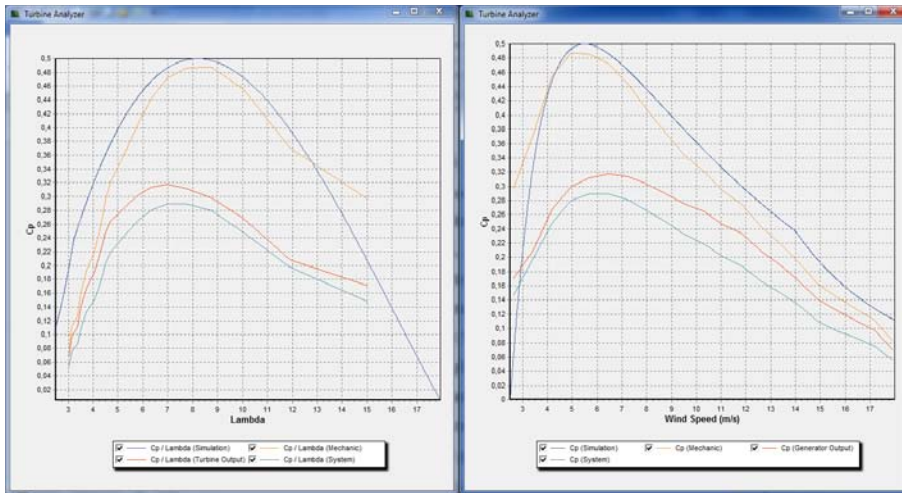
5 OPTİMİZASON

Optimizasyon, eldeki kaynakların en verimli şekilde kullanımı olarak tanımlanabilir(Bunday, 1984). Matematiksel olarak optimizasyon, bir fonksiyonun minimize yada maksimize edilmesidir (Kahaner, et al., 1989). Başka bir tanımla “belirli koşullar altında herhangi bir şeyi en iyi yapma” olarak da tanımlanır (Kübat, 1983).

Optimizasyonun ilk uygulamaları 1940’larda, George Dantzig’in askeri uygulamalar için matematiksel teknikleri kullanmasıyla görülmüştür. Günümüzdeoptimizasyon, yöneylem araştırması, yapay zeka ve bilgisayar bilimleri gibi bir çok alanda karar vermede kullanılmaktadır(Aydın, 2010).

5.1 Test Edilen RüzgarTürbininin Optimizasyonu

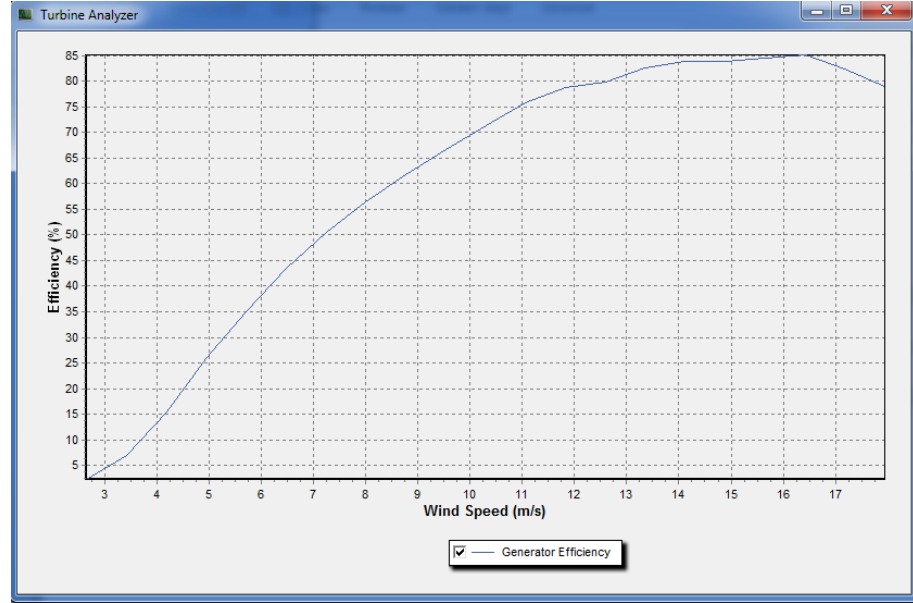
Günümüz ekonomik koşullarında rüzgar türbinlerinin kurulum maliyetleri kW başına 900 – 1100€ arasında değişmektedir (Fazlıoğlu, 2010). Türbin gücü arttıkça kW başına olan maliyet azalmakta, türbin gücü azaldıkça da maliyet artmaktadır. Rüzgar türbinlerinde kurulum maliyetlerinin yüksek olması sebebiyletürbinintüm parametrelerinin optimum değerlerde olması çok önemlidir.



Şekil 5.1 C_p/λ ve Rüzgar Hızına Bağlı C_p

Testi yapılan sistemin C_p/λ ve Rüzgar Hızına Bağlı C_p grafikleri (Şekil 5.1) birlikte incelendiğinde $C_{pSistemMax}=0.29$, $C_{pTürbinOutMax}=0.32$ ve $C_{pMekanikMax}=0.48$ olduğu ve sistemin uç hız oranının 8 olduğu görülmektedir. Bu değerler, kanat

veriminin oldukça iyi olmasına karşın elektriksel kayıpların fazla olduğunu göstermektedir. Mekanik C_p değeri, türbin kanatlarına gelen hava akımının mekanik enerjiye dönüştürülmesi sırasındaki verimini ifade etmektedir. %48'lik mekanik verim değeri kanat tasarımının oldukça iyi olduğunu göstermektedir. Bu değer zaten hiçbir zaman %59.26'yı geçemez (Betz Limiti). Türbin çıkışındaki akım ve gerilimlerden hesaplanan C_p değerinin 0.32 olması generatörde %16'lık bir kayıp olduğunu göstermektedir. Bu kaybın hangi rüzgar hızlarında oluştuğunu incelemek için rüzgar hızına bağlı generatör verim eğrisi (Şekil 5.2) çıkarılmıştır. Eğriden görüldüğü gibi generatör 12.5m/s rüzgar hızına kadar %80 verimin altında çalışmaktadır. Türbinin kurulu olduğu bölgede 15m yükseklikte 5 – 6m/s rüzgar hızlarının 7 aylık esme süresi yaklaşık 750 saattir. Bu aralıkta ölçülen generatör verimi %27 – %37 bandındadır. Verilerden de görüldüğü gibi, generatör

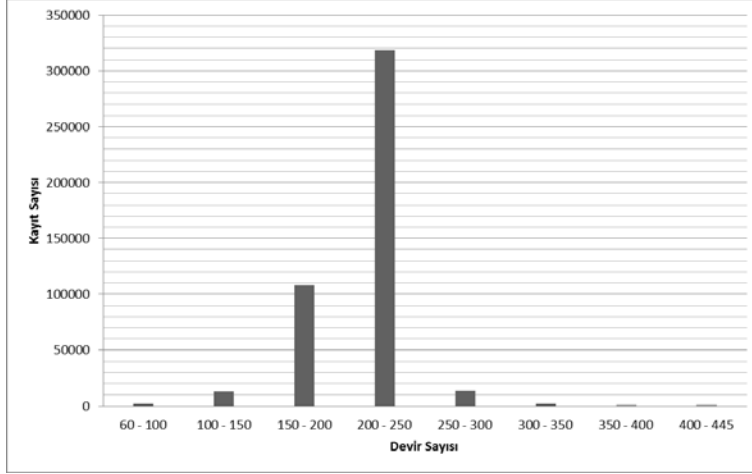


Şekil 5.2 Rüzgar Hızına Bağlı Generatör Verimi

12.5m/s rüzgar hızına kadar, oldukça düşük verimde çalışmaktadır. Bu durumu optimize etmek için generatörün, düşük devirlerde yüksek verim üretebilecek şekilde yeniden tasarlanması gerekmektedir.

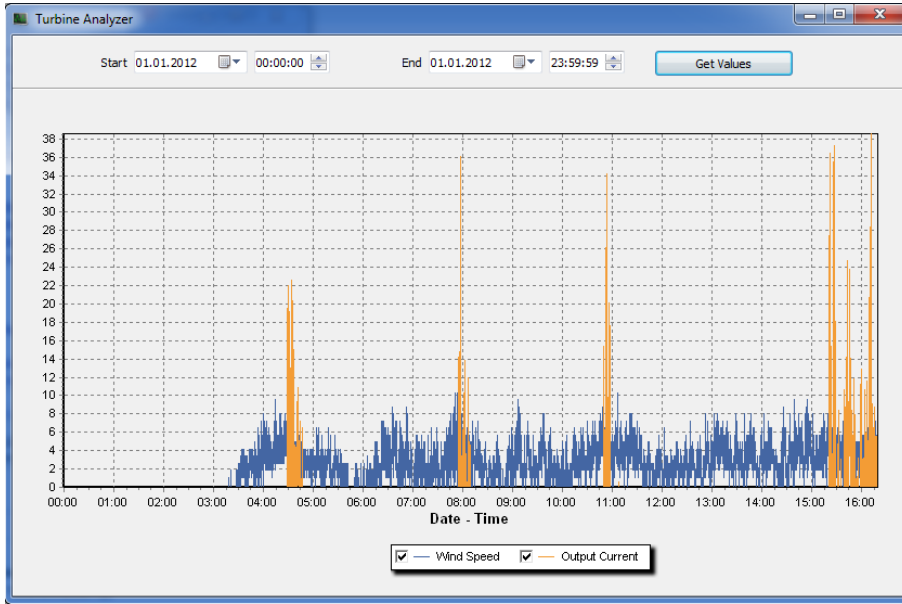
Rüzgar türbininin ölçülüp kaydedilen en yüksek devir sayısı 445d/dk'dır. Ortalama devir sayısı da 135d/dk'dır. Firma verilerine göre, türbinin tasarım devir sayısı 375d/dk'dır. 8 aylık ölçüm sonuçlarına göre, 100W çıkış gücüne ulaşılabilmesi için, türbinin en az 60d/dk hızla dönmesi gerekmektedir. Şekil 5.3'te

türbinin devir sayılarının veri tabanındaki kayıt adetleri görülmektedir. Türbinin genellikle 200 – 250d/dk ile döndüğü görülmektedir. Türbinin, 60 – 300 arasında devirle döndüğü kayıt sayısı toplamı 455,813'tür. 300 – 455d/dk arasında döndüğü devir sayısı da 2,430'dur.



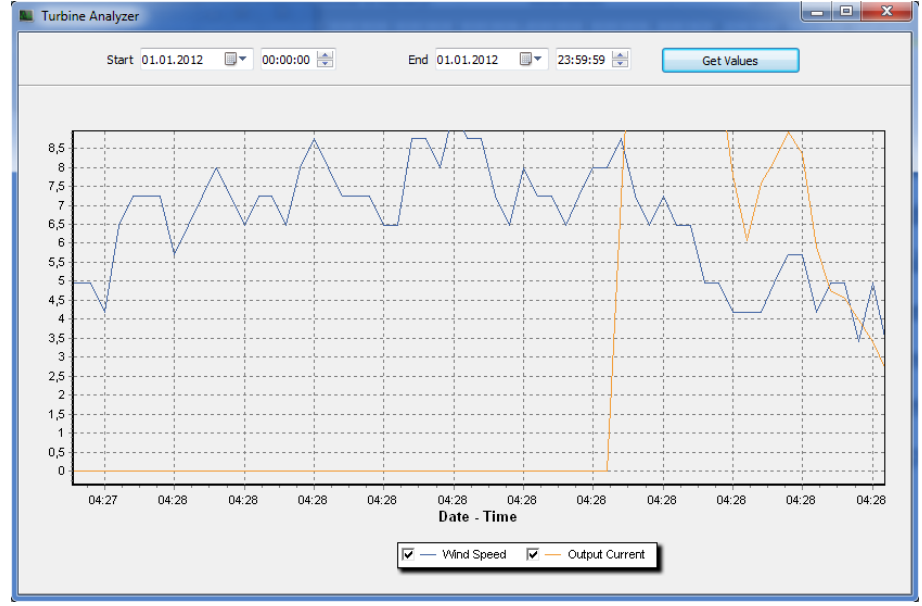
Şekil 5.3 Türbinin Devir Sayısı Kayıtları

Rakamlar, türbinin genel olarak, tasarım devir sayısının altında çalıştığını göstermektedir. Bu durumu optimize etmek için, kanatların bağlama açısı değiştirilerek türbinin daha düşük rüzgar hızlarında üretime başlaması sağlanabilir. Bunun sonucunda yıllık elektrik enerjisi eldesi yükseltilmiş olacaktır.

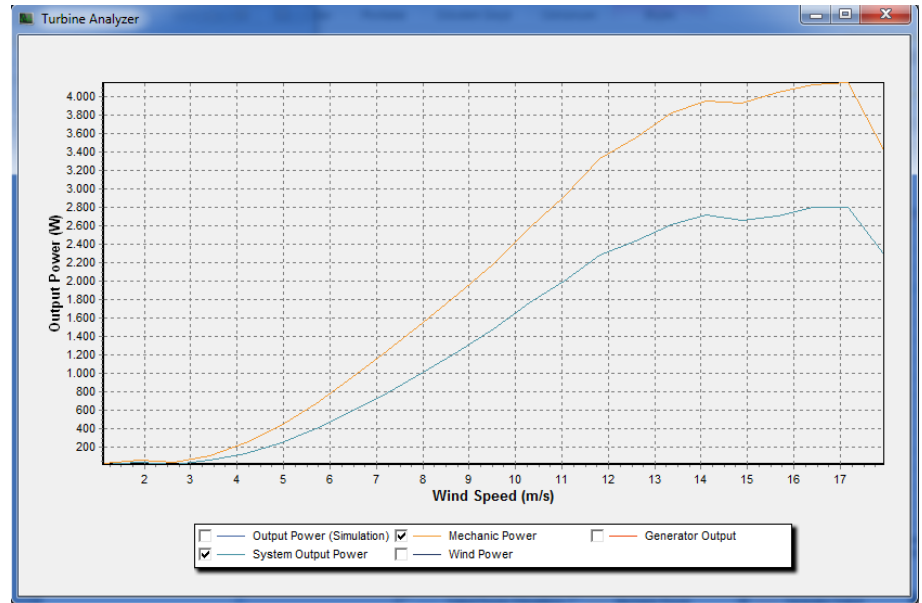


Şekil 5.4 Rüzgar Hızı Ve Generatör Çıkış Akımı

Şekil 5.4 zamana bağlı rüzgar hızını ve generatör çıkış akımını göstermektedir. Grafik detaylı incelendiğinde (Şekil 5.5),Türbinin tam durma pozisyonundan dönmeye başlayıp enerji üretebileceği devir sayısına ulaşabilmesi için (60d/dk), rüzgarın hızına ve esme süresine bağlı olarak değişmekle beraber, yaklaşık 10s kadar 7m/s yada üzerinde rüzgar hızına maruz kalması gerektiği görülmektedir. Eğer rüzgar hızları daha düşük seyrederse (5 – 6m/s civarında) bu süre 15 – 20s'ye kadar çıkmaktadır. Kanat bağlama açısının optimize edilmesiyle bu değerler de düzelecektir.



Şekil 5.5 Grafik Detayları



Şekil 5.6 Rüzgar Hızına Bağlı Generatör Çıkış Gücü ve Sistem Çıkış Gücü

Şekil 5.6’da rüzgar hızına bağlı generatör çıkış gücü ve akülere şarj olan güç grafikleri görülmektedir. 5m/s rüzgar hızından başlayarak güçler arasında giderek artan bir fark görülmektedir. 10m/s rüzgar hızında bu fark yaklaşık %17 (350W) civarına, 14m/s’de %20 (700W) ve 17m/s rüzgar hızında %33 oranına (1,600W) kadar çıkmaktadır. Bu fark generatör çıkışında kullanılan fırça – kömür sistemi ve türbinden kontrol odasına kadar gelen ve yaklaşık 80m uzunluğa sahip kablolardankaynaklanmaktadır.Modern türbinlerde, kaybı minimize etmek için fırça – kömür ve türbin yönünü rüzgara göre ayarlayan kuyruk sistemi yerine elektronik kontrol sistemleri uygulanmaktadır. Türbindeki fırça – kömür sistemi yerine modern kontrol yöntemleri uygulanarak generatörden akülere kadar olan kayıp minimize edilebilir.

Tasarlanan ölçüm sistemi ile Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü bahçesinde parametreleri ölçülerek hesaplanan en yüksek hava yoğunluğu 18.010.2012 tarihinde saat 08:30 civarlarında 1.229kg/m^3 olarak belirlenmiştir. En düşük hava yoğunluğu da 20.07.2011 tarihinde saat 16:35 civarlarında 1.060kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Hava yoğunluğu ortalaması 1.135kg/m^3 ’tür. Simülasyonlarda hava yoğunluğu 1.225kg/m^3 olarak sabit kabul edilmektedir. Ölçümlerden hesaplanan hava yoğunluğu ortalaması ile sabit kabul edilen hava yoğunluğu ortalaması arasında yaklaşık %7 civarında bir fark görülmektedir. Bu durum da simülasyonlarda hesaplanan rüzgar gücü değerlerinin %7 civarında bir farkla gerçeğe yaklaştığı kabul edilebilir. Simülasyon değerlerini optimize etmek amacıyla, hava yoğunluğunu sabit kabul etmek yerine simülasyona, türbin kurulum noktasındaki hava yoğunluğundaki farkı ifade edecek şekilde bir katsayı eklenebilir.

Tez çalışmasında tasarlanan ölçüm sistemi sayesinde, “türbin tasarım parametrelerinin doğrulanmasına veya daha optimum değerlere getirilmesine katkı sağlama” amacına ulaşılmıştır.

6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemizde üretimi yapılan ya da ithal edilen küçük güçlü (20kW ve altı) rüzgâr türbinlerinin, ayrıntılı olarak, karakteristiklerini çıkaran bir laboratuvar bulunmamaktadır. Üretim yapan firmaların, kataloglarında türbin karakteristiklerine ait sınırlı bazı veriler bulunmaktadır. Bu türbinlerin gerçekte sistem verimleri ve şartlara bağlı gerçek üretimleri bilinmemektedir.

Bu tez çalışmasında otonom bir rüzgâr türbin sistemi simüle edilmiş ve türbinin bulunduğu ortamdakimeteorolojik veriler ve türbinin karakteristik verileri ölçülmüştür. Ölçümlerden yola çıkarak, simülasyon değerleri ile ölçülen gerçek değerler, grafik ortamda hazırlanan yazılımla eşzamanlı olarak karşılaştırılmıştır. Ortam koşullarını ve türbinin karakteristik verilerini ölçmek için kullanılan birçok ölçüm cihazı vardır. Bu cihazların en yüksek çözünürlüklü olanları, dakika bazlı ölçüm yapmaktadır. Tezde, ölçümler birer saniyelik aralıklarla yapılarak sonuçlar direk olarak bilgisayara aktarılmıştır. Bu sayede türbinin karakteristikleri çok daha hassas bir şekilde çıkarılmıştır. Tez çalışması sonunda türbin testi yapabilen, özgün bir sistem oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen sistem sayesinde küçük güçlü (20kW ve altı) otonom rüzgâr türbinlerinin testleri yapılabilmektedir. Tasarlanan ve kurulan bu test sistemi, rüzgâr tüneli tasarımı ile birleştirilerek bir laboratuvar kurulması sağlanabilir. Bu sayede Türkiye’ de, küçük güçlü rüzgâr türbinlerinin testlerini yapabilen ve bu türbinlerin karakteristiklerini çıkarabilen ilk laboratuvar oluşturulabilir.

Tezde tasarlanıp yerinemontajı yapılan her bir sensörden, 01.07.2011 ile 31.10.2011 tarihleri arasında, yaklaşık 10milyon ölçüm sonucu alınarak analiz yapılmıştır. Türbinmili üzerinde bulunan tork sensörü ile 14.82m/s rüzgâr hızında ölçülen değer 151.8Nm’dir. Aynı rüzgâr hızında hesaplananmekanik güç değeri 3813W, generatör çıkışından ölçülen güç değeri de 3427.7W’tır.

Çalışmada, grafikler çizilirken, ölçülen değerler rüzgâr hızına göre gruplanarak ortalama alma yöntemi ile çizilmiştir. Grafiklerde, hesaplanarak çizdirilen simülasyon değerleri, ideal şartlar altında olması gereken değerleri göstermektedir. Fakat ölçülen değerler simülasyon değerleri ile tamamen üst üste

çakışmamaktadır. Bunun en önemli sebebi, türbininmekaniksel cevap süresi ile elektriksel cevap süresinin senkron olmaması, aralarında mutlaka bir zaman farkının olmasıdır. Türbininmekanik sisteminin ani değişimlere verdiği tepkinin gecikmesi, çıkış gücünün olması gereken güce ulaşmaya kadar geçen süre içerisinde üretim değerlerinin düşük veya yüksek olması ve bu değerlerin ortalamayı aşağıya veya yukarıya çekmesine sebep olmaktadır.

Grafiklerin simülasyonlarla üst üste oturmamasının ikinci bir nedeni de, türbin çıkışındaki akülerin her zaman boş olmamasıdır. Bazı günlerde rüzgâr hızlarının 10 – 12m/s'nin üzerinde uzun süreli esmesi sebebiyle aküler çabucak şarj olmakta ve türbin elektrik üretimini kesmektedir. Türbin üretmekte olduğu bütün enerjiyi yük direncine aktararak, frenleme yapmaktadır. Bu durumda rüzgâr hızları uygun olmasına rağmen sistem çıkış gücü ortalamasının oldukça aşağılara düştüğü gözlemlenmiştir.

Uygulamada kullanılan rüzgâr enerjisi ölçüm ve veri depolama cihazlarının (data logger) en hassas olanları dahi birer dakika arayla veri kaydı yapmaktadır. Tezde tasarlanan veri ölçme ve depolama sistemi ile saniyelik aralıklarla meteorolojik verileri ve türbin verilerini ölçüp depolama imkânı olmuştur. Tezin ikincil derecede önemli bir sonucu da, tasarlanan veri ölçme ve depolama sisteminin seri üretimi yapılarak meteorolojik verilerin daha sık aralıklarla kaydedilmesi sağlanabilir. Bu sayede çok daha hassas meteorolojik haritalar çıkarılabilecektir.

Meteorolojik verileri ve türbin verilerini birer saniye aralıklarla kayıt altına alan ölçüm sisteminin çıkışındaki RF modül, verileri kablosuz olarak yaklaşık 100m uzakta bulunan bir bilgisayara aktarmaktadır. Bu modülün çıkışındaki RF modül yerine GPRS modül takılarak, ölçülen veriler direk olarak internette bir sunucuya aktarılabilir. Bu sayede türbin yakınlarına bir bilgisayar sistemi koyma ve ona enerji sağlama zorunluluğu ortadan kalkacaktır. Kayıt altına alınan veriler internet üzerinden, dünyanın herhangi bir yerinden izlenebilecektir. Bu sistem sayesinde birçok noktada kurulumu yapılan küçük güçlü rüzgâr türbinleri ile ilgili veriler, eş zamanlı olarak incelenip analiz edilebilecektir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Acar, E. & Doğan, A., 2008., *Türkiye'nin Rüzgar ve Hidroelektrik Enerji Potansiyeli Ve Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi*. İstanbul, s. 675-682.
- Akdoğan, Ş., 2011., *Değişken Hızlı Değişken Kanat Açılı Bir Rüzgar Türbininin Modellenmesi, Simülasyonu ve Kontrolü*, Kocaeli, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- Alyamaç, D., 2010., *İTÜ RT-1 Rüzgar Türbini Performans Analizi*, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Ata, R. & Çetin, N. S., 2008., 3 kW Otonom Bir Rüzgar Türbini Kurulumu ve Enerji Eldesi. *Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, ISSN 1304-4915, Cilt 23, No 1, p. 41-47.
- Aydın, G., 2010., *Rüzgar Enerjisinin Optimizasyonu*, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- Beşerik, G., 1992., *Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Aerodinamik Dizaynı*, İstanbul, Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Boğaziçi Üniversitesi, 2011., *Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Meteoroloji Laboratuvarı*. [Çevrimiçi] <http://web.boun.edu.tr/meteoroloji/yenerji.php> [10 Temmuz 2011 tarihinde erişilmiştir].
- Bunday, B. D., 1984., *Basic Optimization Methods*, 1. edition., London: Edward Adnold Ltd..
- Caliao, N. D., 2011., Dynamic modelling and control of fully rated converter wind turbines. *Renewable Energy* 36, p. 2287-2297.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Camporeale, S. M., Fortunato, B. & Marilli, G., 2001., Automatic Sytem For Wind Türbine Testing. *Journal Of Solar Energy Engineering* Vol. 123, p. 333-338.

Ceylan, M., 2006.,*Muğla Bölgesinde Mermer Endüstrisinin Elektrik Enerji Talebini Karşılama İçin, Matlab Paket Programı İle Rüzgar Çiftliği Tasarım Çalışması*, Muğla, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniversitesi.

Chen, J. et al., 2009.,*Design Of The DC/DC Converter For Aerodynamic Characteristics Testing Of Wind Türbine*. Nanjing, China, p. 1-6.

Çalışkan, A., 2005. *Constant-Voltage, Constant Frequency Operation of a Self-Excited Induction Generator*, Ankara: Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.

Çetin, N. S., 2006.,*Şebeke Bağlantısız PM Generatörlü Rüzgar Türbinlerinin YSA ile Sistem Optimizasyonu*, İzmir, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi.

Çetin, N. S. & Salmanoğlu, F., 2009.,*Rüzgar-PV Otonom Hibrid Güç Sistemlerinin Optimal Maliyetle Boyutlandırılması*. Samsun, RÜGES 2009, 2. Rüzgar Enerjisi Sempozyumu

Çetin, N. S., Yurdusev, M. A., Ata, R. & Özdemir, A., 2005., Assessment Of Tip Speed Ratio Of Wind Turbines. *Mathematical And Computational Application* Vol. 10 No. 1, p. 147-154.

Çokünlü, G., 2007.,*Wind Turbine Modeling And Controller Design*, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Duran, S., 2005.,*Computer-Aided Design Of Horizontal-Axis Wind Turbine Blades*, Ankara, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2002.,*Türkiye Enerji Raporu*, Ankara, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi.
- EEA, 2009.,*Europe's Onshore And Offshore Wind Energy Potential*, Copenhagen: European Environment Agency Technical Report No 6.
- Ege, E. S., 2009.,*Doğrudan Tahrikli Rüzgar Türbinleri İçin Enine – Eksenel Akıllı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generator Tasarımı*, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- EİE, 2012.,*Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü*. [Çevrimiçi] http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/ruzgar/Turkiye_RES.html [12 Şubat 2012] tarihinde erişilmiştir.
- Eisenhut, C., Krug, F., Schram, C. & Klöck, B., 2007., Wind-Turbine Model for System Simulations Near Cut-In Wind Speed. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 22, No. 2, p. 414-420.
- Elektrik İşleri Etüd İdaresi, 2011.,*Rüzgar Enerjisi Çalışmaları*. [Çevrimiçi] http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_en_hak.html [04 Ağustos 2011 tarihinde erişilmiştir].
- Emniyetli, G., 2007.,*Eysel Elektrik İhtiyacının Karşılanması İçin Rüzgar Türbini Tasarımı*, Edirne, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi.
- Engelsman, J. K., 2010.,*Control And Dynamic Performance Of A Grid-Connected Wind Turbine A Doubly-Fed Induction Generator*, Indiana, Msc. Thesis, Purdue University.
- Ergür, Ö., 2006.,*Rüzgar Türbinleri İle Enerji Üretimi*, Kocaeli, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Fazlıoğlu, M., 2010., *Güneş Haber*. [Çevrimiçi]
<http://www.guneshaber.net/haber/834-teknik-bilgiler-ruzgar-santralleri-maliyet-ve-guc-analizi-programi.html> [10 02 2012 tarihinde erişilmiştir].

Fidan, Ş., 2010., *Değişken Hızlı – Değişken Kanat Açılı Rüzgar Türbinlerinin Tork Ve Kanat Açısı Kontrolü*, Afyon, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.

Garlapati, S. K., 2006., *A Simulation Study Of Wind Energy Conversion Systems Using Matlab*, Kingsville, Msc. Thesis, Texas A&M University.

Gasch, R., 1996., *Windcraftanlagen*. Stuttgart, Germany: B.G. Teubner Verlag s. 157-158.

Gaunt, B., 2009., *Power Generation and Blade Flow Measurements of a Full Scale Wind Turbine*, Waterloo, Msc. Thesis, University of Waterloo.

Göngör, S. & Çetin, N. S., 2009., *20 kW Otonom Rüzgar Türbininde Kullanılan Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörün Sonlu Eleman Yöntemi İle Optimizasyonu*. Samsun, Bildiriler Kitabı, s. 100-103.

Greenpeace, 2004., *A Blueprint To Achieve 12% Of The World's Electricity From Wind Power By 2020*, s.l.: European Wind Energy Association "EWEA".

Güneş, İ. İ., 2006., *Bir Rüzgar Türbininin Modellenmesi, Simülasyonu ve Kontrolü*, Kocaeli, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

GWEC, 2011., *Global Wind Statistics*, Brussels, Belgium: Global Wind Energy Council.

Jelavic, M., Peric, N. & Petrovic, I., 2006., Identification of Wind Turbine Model for Controller Design. *IEEE* ISBN:1-4244-0121-6, p. 1608-1613.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Jiang, D., Huang, Q. & Hong, L., 2009., *Test System of a Small Wind Turbine Under Laboratory Conditions*. Nanjing, China, p. 1-4.

Justus, C. G., 1978., *Winds And Wind System Performance*. Philadelphia, Pennsylvania: The Franklin Institute Press.

Kahaner, D., Moler, C. & Nash, S., 1989., *Numerical Methods and Software*. NJ: Prentice Hall.

Karadağ, H. İ., 2009., *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Rüzgar Enerjisinin Önemi ve Rüzgar Türbini Tasarımı*, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Karlı, V. M., 2011., *Gaziantep Üniversitesi 11 kW Yatay Eksen Rüzgar Türbini Tasarım Ve İmalatı*. Denizli, IV. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu

Kıvrak, O. O., 2003., *Modeling And Simulation Of Wind Turbines*, İzmir, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.

Köse, S., 2007., *Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Nonlinear Kontrolü*, Kocaeli, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

Kübat, C., 1983., *Yöneylem Araştırması 8. Ulusal Kongresi*. Ankara

Limitsiz Enerji, 2010., *Bir Rüzgar Türbininin Anatomisi*. [Çevrimiçi] <http://www.limitsizenerji.com/haberler/makaleler/933-bir-ruzgar-turbininin-anatomisi>[23 Ağustos 2011 tarihinde erişilmiştir].

Malinga, B., Sneckenberger, J. E. & Feliachi, A., 2003., Modeling and Control of a Wind Turbine as a Distributed Resource. *IEEE Proceedings of the 35th Southeastern Symposium*, p. 108-112.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Mansouri, M. N., Mimouni, M. F., Benghanem, B. & Annabi, M., 2004., Simulation model for wind turbine with asynchronous generator interconnected to the electric network. *Renewable Energy* 29, p. 421-431.

Manvwell, J., McGowan, J. & Rogers, A., 2009., *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application Second Edition*. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd..

Mihet-Popa, L., Blaabjerg, F. & Boldea, I., 2004., Wind Turbine Generator Modeling And Simulation Where Rotational Speed Is The Controlled Variable. *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 40, No. 1, p. 3-10.

Monfared, M., Kojabadi, H. M. & Rastegar, H., 2008., Static And Dynamic Wind Turbine Simulator Using A Converter Controlled Dc Motor. *Renewable Energy* 33, p. 906-913.

Mutlu, Ö. S., 2009., *Effect Of Wind Turbines On Power System Operation*, İzmir, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.

No, T. S., Kim, J. E., Moon, J. H. & Kim, S. J., 2009., Modeling, control, and simulation of dual rotor wind turbine generator system. *Renewable Energy* 34, p. 2124-2132.

Nurbay, N. & Çınar, A., 2005., *Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması*. Mersin, s. 164-168.

Ofualagba, G. & Ubeku, E. U., 2008., *Wind Energy Conversion System-Wind Turbine Modeling*. Pittsburgh, IEEE, p. 1-8.

Öger, Ö. G., 2006., *Pelton Tipi Rüzgar Türbini Kullanarak Elektrik Enerjisi Üretme*, Ankara, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Önder, M., 2006., *Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Kanadının Bilgisayar Destekli Tasarımı*, Ankara, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- Özön, N. N. & Kılıçaslan, İ., 2007., *Kocaeli İlinde Rüzgar Çiftliği İçin Yer Seçimi*. Gaziantep, s. 1-4.
- Patel, M. R. P. P., 1999., *Wind and Solar Power Systems*. Newyork, CRC Press LLC.
- Ragheb, M. & Ragheb, A. M., 2011., Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio. *Fundamental And Advanced Topics In Wind Power*. Rijeka, Croatia, InTech, p. 21.
- Song, Y. D., Dhinakaran, B. & Bao, X. Y., 2000., Variable Speed Control Of Wind Turbines Using Nonlinear And Adaptive Algorithms. *Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, Volume 85, Issue 3*, p. 293-308.
- Söylemez, O., 2005., *Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Sistemleri Etüdü*, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Sürgevil, T., 2004., *Modeling And Simulation Of Wind Energy Conversion System Using PWM Converters*, İzmir, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Şen, Ç., 2003., *Gökçeada'nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi İle Karşılanması*, İzmir, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Şentürk, U., 2007., *Bir Rüzgar Türbininin Performansının Analitik ve Nümerik Olarak İncelenmesi*, İzmir, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi.
- Şimşek, V., 2007., *Rüzgar Enerjisi ve Sivas Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı*, Sivas, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Teodorescu, R., Iov, F. & Blaabjerg, F., 2003., *Flexible Development And Test System For 11 kW Wind Turbine*. Acapulco, Mexico, p. 67-72.

Thapar, V., Agnihotri, G. & Sethi, V. K., 2011., Critical analysis of methods for mathematical modelling of wind turbines. *Renewable Energy* 36, p. 3166-3177.

Tosun, M. M., 2005., *Investigation Of Aerodynamic Effects On Performance Of Wind Turbine Blades By Using Finite Element Method*, İzmir, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

Turhal, S., 2009., *Rüzgar Türbinleri ve Kontrol Sistemleri*, Hatay, Yüksek Lisans Tezi, Musfata Kemal Üniversitesi.

Uğuz, S., 2005., *Rüzgar Enerjisi İle Elektrik Üretimi*, Ankara, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.

Uyar, M., Gencoğlu, M. T. & Yıldırım, S., 2010., Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Generatör Sistemleri. *Kaynak Elektrik*, 249, Şubat, s. 116-120.

Vitalea, A. J. & Rossib, A. P., 2008., Software Tool For Horizontal-Axis Wind Turbine Simulation. *International Journal Of Hydrogen Energy* 33, p. 3460 – 3465.

Wang, Q. Q., 2003., *Maximum Wind Energy Extraction Strategies Using Power Electronic Converters*, Ottawa: Phd Thesis, The University of New Brunswick.

Whale, J., 2009., Design And Construction Of A Simple Blade Pitch Measurement System For Small Wind Turbines. *Renewable Energy* 34, p. 425-429.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Xingyu, Z., 2010.,*PLC Based Test Platform For Wind Turbine Gearbox*. Changsha, China, p. 909-913.

Yıldırım, T., 2008.,*Güneş ve Rüzgar Enerjisi Veri Toplama Sisteminin Geliştirilmesi*, Ankara, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi.

Yıldırım, E., 2008.,*Fırçasız DA Jeneratörü Kullanan Düşük Güçlü Bir Rüzgar Türbininin Gerçekleştirilmesi*, Ankara, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.

Yıldırım, E. & Aydemir, M. T., 2009.,*Elle Yapılabilir Küçük Güçlü Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Bir Rüzgar Jeneratörü Uygulaması*. Samsun, s. 104-107.

Yücel, B., 2004.,*Performance Prediction Of Horizontal Axis Wind Turbines Using Vortex Theory*, Ankara, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.

ÖZGEÇMİŞ

Ali Murat ATEŞ, 1972 yılında İzmir’de doğdu. 1990 yılında Çınarlı Teknik Lisesi, Elektronik Bölümünü bitirdi. 1995 yılında Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Bilgisayar Sistemleri Eğitimi Bölümü’nü bitirdi. Yüksek Lisansını, 2004 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Coğrafya Eğitimi Bölümü’nde tamamladı. 2006 yılında Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Enerji Teknolojisi Anabilim Dalı’nda doktora eğitimine başladı.

Meslek hayatına 1995 yılında M.E.B. Gaziantep Mehmet Akif Ersoy E.M. Lisesi’nde bilgisayar öğretmeni olarak başladı. 1998 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Programcılığı Programında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2011 yılı Mayıs ayından bugüne Celal Bayar Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Eğitimi Bölümü’nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir.

Doktora tezi çalışması sırasında sunulan bildiriler;

Çetin, N. S., Ateş, A. M., & Deniz, E. (2011). Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü’nde Kurulu Bulunan 5kW’lık Otonom Rüzgâr Türbininin Modernizasyonu. VI. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, (s. 587 - 600). Kayseri.

Çetin, N. S., Deniz, E., & Ateş, A. M. (2011). Şebekeye Bağlı Rüzgâr/Fotovoltaik Hibrid Güç Sistemleri. VI. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, (s. 166 - 172). Kayseri.

Doktora tezi çalışması sırasında görev aldığı projeler;

Araştırma Projesi Yürütücüsü: Yard. Doç. Dr. Numan Sabit ÇETİN, TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Projesi. "Ege Üniversitesi", "Otonom rüzgâr türbinlerinde sistem karakteristiklerinin belirlenmesi ve optimizasyonu.", Bursiyer, Katılımcı, 2010

Araştırma Projesi Koordinat6r6: Yard. Doç. Dr. Numan Sabit ÇETİN,
Doktora Tezi Projesi, "Ege Üniversitesi", "Otonom r6zgâr t6rbinlerinde sistem
karakteristiklerinin belirlenmesi ve optimizasyonu.", Proje alışanı, Katılımcı,
2009

Araştırma Projesi Koordinat6r6: Yard. Doç. Dr. Numan Sabit ÇETİN,
M6nferit Proje, "Ege Üniversitesi", "G6neř Enerjisi Enstit6s6'nde Kurulu Bulunan
2x5kW'lık Otonom R6zgârT6rbinlerinin Modernizasyonu", Proje alışanı,
Katılımcı, 2008

EKLER

EK 1 Matlab Simülasyon Kodları

```
clear;
Pm=5000; %Mekanik güç
R=2; %rotor yarıçapı
rho=1.225; %havanın yoğunluğu
Vbasla=2.75; %başlangıç rüzgar hızı
Vnom=14.8; %Nominal güçteki rüzgar hızı
Vdur=20; %türbinin durdurulduğu rüzgar hızı
n=375; %Türbin devir sayısı
Cpm=0.45; %Dizayn (Maksimum) Cp değeri
Vm=6.5;

Cpr=Pm/(0.5*rho*Vnom^3*R^2*pi);
omega=pi*n/30;

%A ve B değerlerinin hesabı
a=(Vm/Vbasla)-1;
b=(Vm/Vnom)-1;
AB=inv([a^2 a^3;b^2 b^3])*[1;1-Cpr/Cpm];
A=AB(1,1);
B=AB(2,1);

%Cp ve P nin değişiminin bulunması
V=[Vbasla:0.01:Vnom]';
V1=[Vnom+0.01:0.01:Vdur]';
%V2=[20+0.01:0.01:Vdur]';
hiz=[Vbasla:0.01:Vdur]'; %Rüzgar hızı

for i=1:size(V)
    Cp(i)=Cpm*(1-A*((Vm/V(i))-1)^2-B*((Vm/V(i))-1)^3);
    P(i)=0.5*rho*pi*R^2*Cp(i)*V(i)^3;
    lamb(i)=R*omega/V(i);
    Pr(i)=0.5*rho*pi*R^2*V(i)^3;
end

for k=1:size(V1)
    j=k+size(V,1);
```

```
Cp(j)=(Cpr*Vnom^3)/(V1(k)^3);
P(j)=0.5*rho*pi*R^2*Cp(j)*V1(k)^3;
lamb(j)=R*omega/V1(k);
Pr(j)=0.5*rho*pi*R^2*V1(k)^3;
end
```

```
subplot(2,3,1)
plot(hiz,Pr),grid;
title('Rüzgar hızına bağlı rüzgar gücü');
xlabel('Rüzgar hızı (m/sn)');
ylabel('Güç (w)');
```

```
subplot(2,3,2)
plot(hiz,P),grid;
title('Rüzgar hızına bağlı türbinmekanik gücü');
xlabel('Rüzgar hızı (m/sn)');
ylabel('Mekanik gücü (w)');
```

```
subplot(2,3,3)
plot(hiz,lamb), grid;
title('Rüzgar hızına bağlı \lambda');
xlabel('Rüzgar hızı (m/sn)');
ylabel('\lambda');
```

```
subplot(2,3,4)
plot(hiz,Cp),grid;
title('Rüzgar hızına bağlı Cp');
xlabel('Rüzgar hızı (m/sn)');
ylabel('Cp');
```

```
subplot(2,3,5)
plot(lamb,Cp),set(gca,'fontsize',12),grid;
title('Cp nin (\lambda)ya göre degisimi');
xlabel('Uchizorani \lambda');
ylabel('C_p');
```

EK 2 “Türbin Simülatörü” Program Kodları

```
programTurSim;
```

```
uses
```

```
  Forms,
```

```
  ana in 'ana.pas' {labl},
```

```
  rbg in 'rbg.pas' {frbg},
```

```
  cplamb in 'cplamb.pas' {fcplamb};
```

```
{ $R *.res }
```

```
begin
```

```
  Application.Initialize;
```

```
  Application.MainFormOnTaskbar := True;
```

```
  Application.Title := 'Türbin Simülatörü';
```

```
  Application.CreateForm(Tlabl, labl);
```

```
  Application.CreateForm(Tfrbg, frbg);
```

```
  Application.CreateForm(Tfcplamb, fcplamb);
```

```
  Application.Run;
```

```
end.
```

```
unit ana;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
  Windows, messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
```

```
  Dialogs, StdCtrls, Buttons, ExtCtrls, TeEngine, Series, TeeProcs, Chart;
```

```
type
```

```
  Tlabl = class(TForm)
```

```
    e1: TLabelEdit;
```

```
    e2: TLabelEdit;
```

```
    e3: TLabelEdit;
```

```
    e4: TLabelEdit;
```

```
    e8: TLabelEdit;
```

```
    e7: TLabelEdit;
```

```
    e6: TLabelEdit;
```

```
    e5: TLabelEdit;
```

```

    BitBtn1: TBitBtn;
    ListBox1: TListBox;
    BitBtn2: TBitBtn;
    BitBtn3: TBitBtn;
procedure BitBtn1Click(Sender: TObject);
procedure BitBtn2Click(Sender: TObject);
procedure BitBtn3Click(Sender: TObject);
private
    { Privatedeclarations }
public
    { Publicdeclarations }
end;

var
    labl: TLabl;
    pp,r,rho,vbasla,vnom,vdur,n,cpm,cpr,vm,omega,f,g:real;
    pr,p,cp,lamb,v:array of real;
    boyut:integer;

    cpd,pd,lambd,nd:array of real;
    nboyut:integer;
    ndoran:real;

implementation

usesmath, rbg, cplamb;

{$R *.dfm}

procedure TLabl.BitBtn1Click(Sender: TObject);
    vara,b,c:real;
    i:integer;
begin
    pp:=StrToFloat(e1.Text);
    r:=StrToFloat(e2.Text);
    rho:=StrToFloat(e3.Text);
    vbasla:=StrToFloat(e4.Text);
    vnom:=StrToFloat(e5.Text);
    vdur:=StrToFloat(e6.Text);
    n:=StrToFloat(e7.Text);

```

```

cpm:=StrToFloat(e8.Text);
cpr:=pp/(0.5*rho*power(vnom,3)*pi*power(r,2));
vm:=(vnom-vbasla)/2;
omega:=pi*n/30;
a:=(vm/vbasla)-1;
b:=(vm/vnom)-1;
c:=1-(cpr/cpm);
f:=((power(a,3)*c)-power(b,3))/(power(a,3)*power(b,2)-power(a,2)*power(b,3));
g:=(1-f*power(a,2))/power(a,3);
boyut:=ceil((vdur-vbasla)/0.01)+1;
SetLength(pr,boyut);
SetLength(p,boyut);
SetLength(cp,boyut);
SetLength(lamb,boyut);
SetLength(v,boyut);

SetLength(cpd,boyut);
SetLength(pd,boyut);
SetLength(lambd,boyut);
SetLength(nd,boyut);
nd[1]:=10;
nboyut:=ceil((vnom-vbasla)/0.01)+1;

ndoran:=(n-nd[1])/0.01;
for l := 2 to nboyut do nd[l]:=nd[1]+(l-1)*ndoran;

v[1]:=vbasla;
for l := 2 to boyut do v[l]:=v[1]+(l-1)*0.01;
  listBox1.Items.Add('Cpr='+FloatToStr(cpr));
  listBox1.Items.Add('Vm='+FloatToStr(vm));
  listBox1.Items.Add('omega='+FloatToStr(omega));
i:=1;
while v[i]<=vnom do
begin
a:=(Vm/V[i])-1;
  Cp[i]:=Cpm*(1-F*power(a,2)-G*power(a,3));
  P[i]:=0.5*rho*pi*power(R,2)*Cp[i]*power(V[i],3);
lamb[i]:=R*omega/V[i];
  Pr[i]:=0.5*rho*pi*power(R,2)*power(V[i],3);

```

```

i:=i+1;
end;
while v[i]<vdur do
begin
    Cp[i]:=(Cpr*power(Vnom,3))/power(V[i],3);
    P[i]:=0.5*rho*pi*power(R,2)*Cp[i]*power(V[i],3);
    lamb[i]:=R*omega/V[i];
    Pr[i]:=0.5*rho*pi*power(R,2)*power(V[i],3);
i:=i+1;
end;
end;

```

```

procedure Tlabl.BitBtn2Click(Sender: TObject);
var
i:integer;
begin
withfrbg do
begin
    c1.Series[0].Clear;
for l := 1 to boyut-1 do c1.Series[0].AddXY(v[i],pr[i]);
    c1.Series[1].Clear;
for l := 1 to boyut-1 do c1.Series[1].AddXY(v[i],p[i]);
    c1.Series[2].Clear;
for l := 1 to boyut-1 do c1.Series[2].AddXY(v[i],lamb[i]);
    c1.Series[3].Clear;
for l := 1 to boyut-1 do c1.Series[3].AddXY(v[i],cp[i]);
show;
end;
end;

```

```

procedure Tlabl.BitBtn3Click(Sender: TObject);
var
i:integer;
begin
withfcplamb do
begin
    c1.Series[0].Clear;
for l := 1 to boyut-1 do c1.Series[0].AddXY(lamb[i],cp[i]);
show;
end;

```

end;

end.

unitrbg;

interface

uses

Windows,messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
Dialogs, TeEngine, Series, ExtCtrls, TeeProcs, Chart;

type

Tfrbg = class(TForm)

 c1: TChart;

 Series1: TFastLineSeries;

 Series2: TFastLineSeries;

 Seri1: TFastLineSeries;

 seri0: TFastLineSeries;

 procedure c1DbClick(Sender: TObject);

private

 { Privatedeclarations }

public

 { Publicdeclarations }

end;

var

frbg: Tfrbg;

implementation

{ \$R *.dfm }

procedure Tfrbg.c1DbClick(Sender: TObject);

begin

 c1.UndoZoom;

end;

end.

unitcplamb;

interface

uses

Windows,messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
Dialogs, TeEngine, Series, ExtCtrls, TeeProcs, Chart;

type

Tfcplamb = class(TForm)

 c1: TChart;

 Series1: TFastLineSeries;

procedure c1DbClick(Sender: TObject);

private

 { Privatedeclarations }

public

 { Publicdeclarations }

end;

var

fcplamb: Tfcplamb;

implementation

{\$R *.dfm}

procedure Tfcplamb.c1DbClick(Sender: TObject);

begin

 c1.UndoZoom;

end;

end.